

MON
621.313
M538m
TES/ME4

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

MOTOR ESFÉRICO

Um tipo de posicionador

621.313 M538m /TES/FU
DIRBI/UFU 00301/96



1000022564

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por Rafael Manfrin Mendes, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica; aprovada em 26/01/96 pela seguinte banca examinadora :

- Dr. Luciano Martins Neto
- Dr. Darizon Alves de Andrade
- Dr. Ernesto Ruppert Filho

Uberlândia, 26 de Janeiro de 1996

500

MOTOR ESFÉRICO

Um tipo de posicionador

Rafael Manfrin Mendes

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dr. Luciano Martins Neto
Orientador

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 DIRETORIA DE BIBLIOTECAS

Procedência.....

Assunto..... Desquite

Reg. Nº..... 196

C.P.C.....

N.º F.º 001/196.....

Reg. 00301 / 96 Data 12.12.196

Vol. Ex. 1

FU-00005623-9

À minha esposa Darlene e às
 minhas filhas Júlia e Lídia.

Agradecimentos

- Ao prof. Dr. Luciano Martins Neto, pela orientação e incentivo;
- À CAPES, pelo apoio financeiro na concessão de bolsa de estudos;
- Às pessoas, que de diversas formas, contribuíram para a elaboração deste trabalho,
- Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio.

Resumo

Neste trabalho, uma concepção diferente de motor esférico é apresentada. São desenvolvidos o princípio de funcionamento e uma modelagem matemática da concepção teórica do referido motor. Diversos protótipos são analisados, com o objetivo de se chegar ao protótipo definitivo. É desenvolvido um sistema eletrônico que serve de interface "motor-microcomputador". Através da computação é possível enviar ao motor um comando para que este assuma um certo posicionamento, bem como receber de um sensor de posição a confirmação ou não do posicionamento desejado. Com base na modelagem matemática desenvolvida e nos resultados de ensaios do protótipo definitivo, são feitas comparações teórico-experimentais.

Abstract

A different conception of spherical motor is presented in this work. The principle of operation is discussed and a mathematical modeling based on the motor's theoretical conception is developed. In the practical work, several designs are analyzed aiming to reach a definitive prototype. Electronic hardware to drive the motor, an interface to allow the position control via microcomputer, and a position sensor to check also via microcomputer if the motor has reached the demanded position are designed and assembled. Comparisons of theoretical results obtained from mathematical model with experimental tests realized with the final prototype are presented and discussed.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Objetivos pretendidos	1
1.2 - Histórico	2
1.3 - Aplicações práticas	2
1.4 - Estratégias utilizadas	3
Capítulo 2 - Uma concepção teórica para o motor esférico	4
2.1 - Princípio de funcionamento	5
2.2 - Modelagem matemática	5
2.2.1 - Considerações gerais	5
2.2.2 - Conjugado eletromagnético	6
2.2.3 - Indutâncias mútuas	17
2.2.4 - Equações básicas	23
2.2.4.1 - Condição de equilíbrio	23
2.2.4.2 - Condição transitória	26
Capítulo 3 - Protótipos	
3.1 - Análise de opções para a montagem de protótipos	28
3.1.1 - Disposição física das bobinas do estator	28
3.1.2 - Suporte mecânico para o rotor	29
3.2 - Montagens iniciais	31
3.2.1 - Primeiro protótipo	31
3.2.2 - Segundo protótipo	32
3.2.3 - Terceiro protótipo	33
3.2.4 - Quarto protótipo	34
Capítulo 4 - Preparativos para os ensaios do protótipo	
4.1 - Introdução	37
4.2 - Sensor de posição	37
4.3 - Filosofia do posicionamento	45

4.3.1 - Digitalização da informação	47
4.4 - Montagem eletrônica	48
4.4.1 - Porta paralela	49
4.4.2 - Circuito conversor de digital para analógico	51
4.4.3 - Memória analógica	52
4.4.4 - Amplificador de potência	53
4.4.5 - Fonte de energia	54
Capítulo 5 - Ensaio	55
5.1 - Objetivos e procedimentos	55
5.2 - Resultados obtidos	56
5.3 - Análise dos resultados	84
Capítulo 6 - Conclusão	86
Referências bibliográficas	87
Bibliografia	88

Capítulo 1 - Introdução

[Com o desenvolvimento de novas máquinas, cada vez mais complexas, complicados movimentos mecânicos estão sendo requeridos para o posicionamento preciso de cargas.]

Atualmente os tipos de posicionamento, tanto rotativo como linear, utilizam geralmente motores de passo com complicadas engrenagens mecânicas. Esses movimentos são discretos e com apenas um grau de liberdade, ou seja, os movimentos rotativos admitem sentido horário e anti-horário e os lineares admitem sentido para esquerda e direita. Mecanismos de múltiplos graus de liberdade estão sendo requisitados, face às novas tendências de construção de máquinas e equipamentos que possam executar seus movimentos de forma diferente, com melhor precisão, poucas engrenagens mecânicas, e que sejam de construção simples e robusta.

Normalmente, movimentos com múltiplos graus de liberdade são implementados por um motor a cada grau. Isto resulta num complicado sistema de transmissão da força para a carga, podendo provocar erros de posicionamento devido às deformações e desgastes nas engrenagens. A máquina com este tipo de acionador torna-se complexa, pesada, grande, e com número elevado de motores.

Assim, espera-se que um motor que possa reunir, numa única peça, mais de um grau de liberdade, que seja leve e robusto, que tenha poucas peças móveis e que seja de fácil acionamento, encontre uma boa quantidade de aplicações na indústria de automação de máquinas e equipamentos.] Os objetivos deste trabalho foram definidos seguindo esta linha de raciocínio.

1.1 - Objetivos pretendidos

Pretende-se, neste trabalho, desenvolver *Pois isso, como sabemos, é um sistema de movimento* [um tipo de motor elétrico, onde à princípio, um determinado ponto de seu rotor possa descrever uma superfície esférica de centro coincidente como o centro do próprio rotor. Este motor, devido ao tipo de movimento de seu rotor, denomina-se "motor esférico".]

Características como leveza, robustez, poucas peças móveis, facilidades de operação e controle, devem ser satisfeitas. Entende-se como desenvolvimento do motor, um estudo completo das diversas fases desde a sua concepção até os testes experimentais de posicionamento de equilíbrio de um protótipo.

1.2 - Histórico

Outros motores esféricos já foram estudados. Tesla⁽¹⁾, em 1893 na World's Columbian Exposition, apresenta a primeira idéia do que seria o motor esférico. Ele coloca pequenas esferas metálicas de diversos materiais sobre uma caixa coberta por veludo. Dentro da caixa são dispostas três bobinas em faces perpendiculares. Ao se passar corrente alternada nas bobinas, um campo magnético oscilante é criado e as esferas de metal tentam acompanhar o movimento de oscilação deste campo. Como praticamente não há atrito entre o veludo e as esferas, estas rolam para todas as direções acompanhando o campo magnético.

Outro modelo apresentado em 1989 por K. Kaneko⁽⁰²⁾, consiste basicamente de um motor de corrente contínua sem escovas no qual o seu eixo, além de girar, pode se deslocar de 15° em relação a posição normal.

Em 1990, Martins Neto⁽³⁾, apresenta a modelagem matemática de um motor esférico com base em uma concepção ideal.

1.3 - Aplicações práticas

Algumas aplicações práticas para o motor esférico são apresentadas:

1. Emulação do olho humano, onde o rotor é composto por uma esfera ôca onde se aloja uma câmara de vídeo ou um outro dispositivo receptor de luz;
2. Posicionador para luz, onde o rotor é composto por uma esfera ôca onde se aloja um sistema emissor de 'laser' ou um outro dispositivo emissor de luz;
3. Junta de articulação, onde um dos braços articulados está fixo no estator e o outro no rotor;
4. Posicionador de ferramentas giratórias, onde no rotor se aloja um motor rotativo convencional destinado a acionar a ferramenta.

1.4 - Estratégias utilizadas

Este trabalho foi desenvolvido seguindo os passos:

1. apresentação de uma concepção teórica para o motor esférico, com descrição construtiva, princípio de funcionamento e modelagem matemática, com equações de posicionamento e equações elétricas para regimes permanente e transitório;
2. análise de opções para a montagem de protótipos, com estudos de disposições físicas dos diversos componentes e implementação de protótipos;
3. preparativos para ensaios no protótipo final, com a inclusão de um sensor de posição esférico no protótipo, descrição das alterações necessárias, montagem de um circuito eletrônico de acionamento do motor esférico e descrição dos programas de computador para ensaios;
4. análise dos ensaios realizados, com levantamento de curvas características de movimento do motor esférico, segundo trajetórias pré-definidas;
5. elaboração de uma conclusão sobre o trabalho realizado, com sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Uma Concepção Teórica para o Motor Esférico

Fisicamente [o motor esférico] proposto neste trabalho [consiste basicamente de um estator formado por uma casca esférica, construído de material ferromagnético, onde são alojadas três bobinas "a", "b" e "c", concêntricas em relação ao centro da casca esférica, pertencentes a planos perpendiculares entre si, conforme pode ser visto na figura 2.1.]

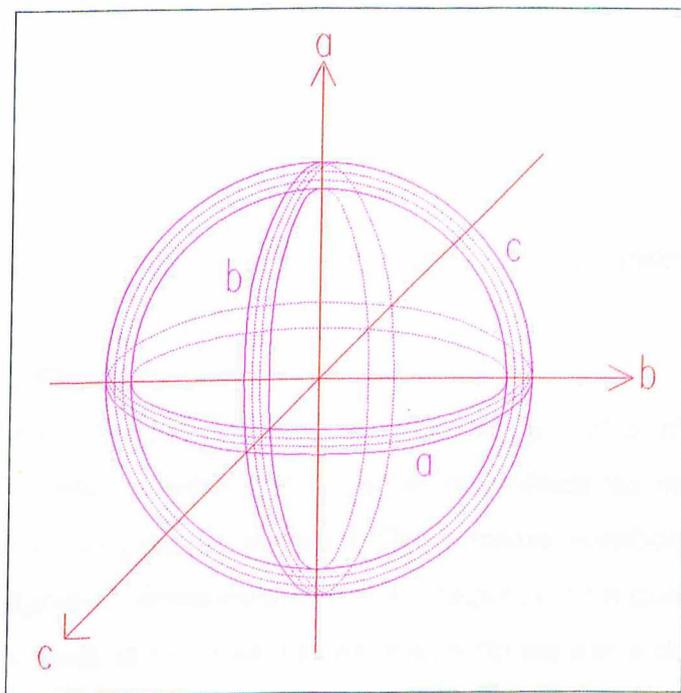


Figura 2.1 - Motor esférico - estator.

[O rotor é esférico, de material ferromagnético, centrado com a casca esférica estatórica, e neste é produzido um campo magnético radial através de um magneto permanente ou uma bobina, conforme pode ser visto no corte longitudinal mostrado na figura 2.2.]

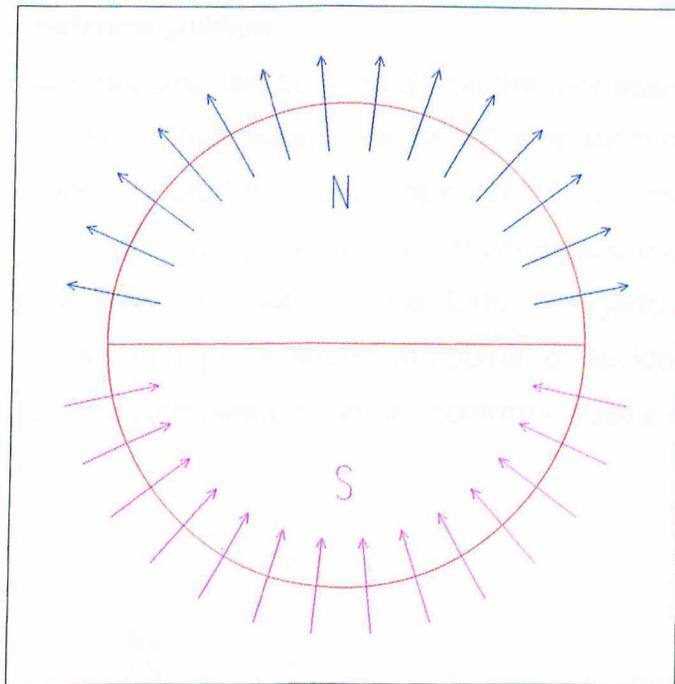


Figura 2.2 - Campo magnético radial produzido pelo rotor.

2.1 - Princípio de funcionamento

[Injetando-se corrente em cada uma das bobinas "a", "b" e "c" da figura 2.1, em função dos valores relativos entre elas, o campo magnético resultante produzido assume uma determinada posição espacial. Desta forma, estabelece-se um conjugado eletromagnético entre estator e rotor, fazendo com que haja a tendência de alinhamento dos campos magnéticos resultante do estator e do rotor.]

2.2 - Modelagem matemática

2.2.1 - Considerações gerais

[Pelo fato da estrutura magnética do motor esférico ser constituída da casca esférica e da esfera móvel, ambas concêntricas, têm-se um entreferro de comprimento radial constante em qualquer direção. Desprezando-se a relutância do circuito magnético do ferro em relação a relutância do circuito magnético do entreferro e considerando que cada bobina está concentrada, a distribuição de densidade de campo magnético ao longo do entreferro, produzida por cada bobina, permanece constante.]

2.2.2 - Conjugado eletromagnético

Considerando apenas uma das bobinas do estator, por exemplo a bobina "a", energizada por uma corrente invariante no tempo " i_a ", e também considerando que o fluxo magnético do rotor seja produzido por uma bobina "d" percorrida por uma corrente também invariante no tempo " i_d ", então um conjugado eletromagnético " C_a " vai existir no sentido de alinhar as duas bobinas. Este conjugado pode ser obtido através das forças que surgem, por exemplo na bobina "d" devido à presença de " i_a " no campo magnético produzido pela bobina "a", conforme ilustra a figura 2.3.

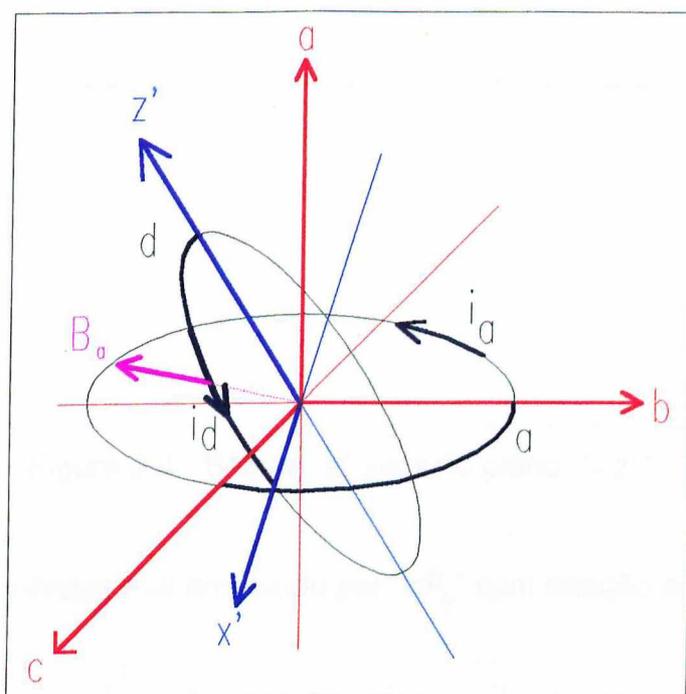


Figura 2.3 - Interação entre as bobinas "a" e "d".

Tomando-se um elemento infinitesimal " $d\vec{l}$ " localizado na bobina "d", como indicado na figura 2.4, entre $\gamma=0^\circ$ e $\gamma=180^\circ$, a força que atua sobre ele vale:

$$d\vec{F}_a = -N_d \cdot B_a \cdot i_d \cdot dl \cdot \vec{y}, \quad (2.1)$$

onde:

N_d = número de espiras da bobina "d"

B_a = densidade de campo magnético produzido por " i_a "

Motor esférico - Um tipo de posicionador

i_d = corrente que percorre a bobina "d"

\vec{y} = versor perpendicular ao plano "x'z'", obtido pelo produto vetorial do versor do eixo x' com o versor do eixo z', conforme indicado na figura 2.4.

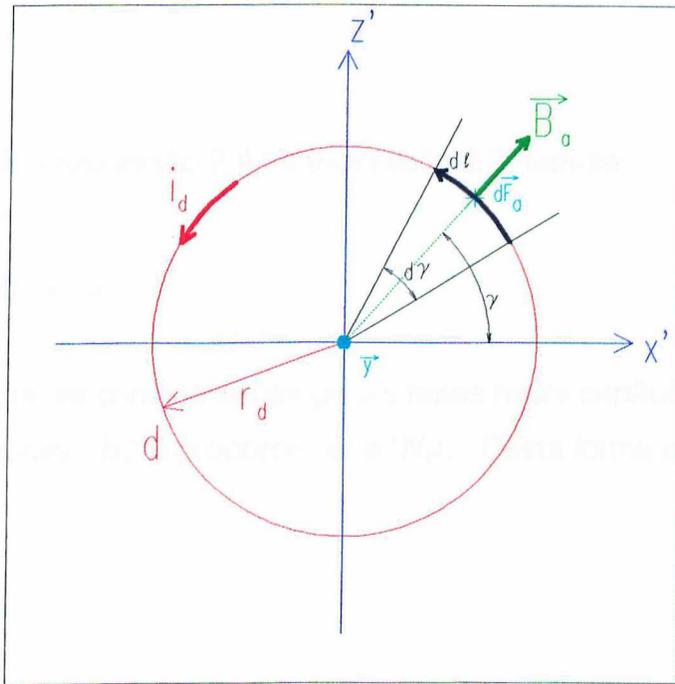


Figura 2.4 - Bobina "d" vista no plano "x'z'".

O conjugado infinitesimal produzido por " $d\vec{F}_a$ " com relação ao eixo "x'" é dado por:

$$dC_a = r_d \cdot \text{sen } \gamma \cdot dF_a, \quad (2.2)$$

onde:

r_d = raio da bobina d.

Substituindo o módulo da força dado na expressão 2.1 na expressão 2.2 e, de acordo com as considerações gerais citadas neste capítulo, onde " B_a " não é função de " γ ", integra-se a expressão 2.2 ao longo de toda a bobina "d".

$$C_a = 2 \cdot N_d \cdot B_a \cdot i_d \cdot r_d \cdot \int_0^\pi \text{sen} \gamma \cdot dl. \quad (2.3)$$

Como:

$$dl = r_d \cdot d\gamma, \quad (2.4)$$

então, substituindo a expressão 2.4 na expressão 2.3, tem-se:

$$C_a = 4 \cdot N_d \cdot B_a \cdot i_d \cdot r_d^2. \quad (2.5)$$

De acordo com as considerações gerais feitas neste capítulo em relação às relutâncias magnéticas, " B_a " é proporcional a " $N_a i_a$ ". Desta forma a expressão 2.5 torna-se:

$$C_a = k_1 \cdot i_a \cdot i_d, \quad (2.6)$$

onde:

$k_1 = k \cdot N_a \cdot N_d$, sendo que " k " depende das dimensões do motor.

Vale ressaltar que a expressão 2.6 é válida para o cálculo do referido conjugado desde que as bobinas " a " e " d " não estejam em um mesmo plano (alinhamento e anti-alinhamento).

De forma análoga pode-se encontrar os conjugados devido às bobinas b e c , em relação a " d ", e considerando que $N_a = N_b = N_c$, tem-se:

$$C_b = k_1 \cdot i_b \cdot i_d, \quad (2.7)$$

e:

$$C_c = k_1 \cdot i_c \cdot i_d. \quad (2.8)$$

Motor esférico - Um tipo de posicionador

A restrição anteriormente feita à expressão 2.6 é também válida para as expressões 2.7 e 2.8, com as respectivas correspondências de corrente.

Para a obtenção do conjugado resultante na bobina "d" devido as bobinas "a", "b" e "c", pode-se adotar um modelo onde, por exemplo, o conjugado " C_a " na bobina "d" é produzido por uma força fictícia " \vec{F}_a ", aplicada a um ponto "P" pertencente a normal a bobina "d", conforme figura 2.5.

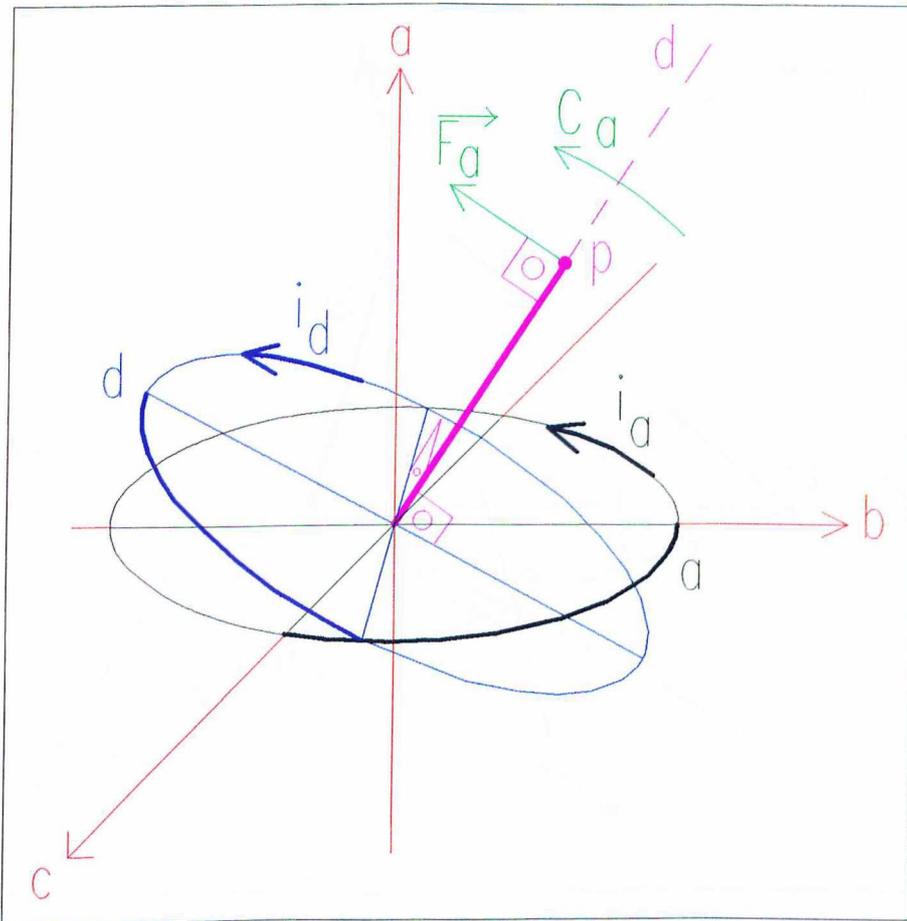


Figura 2.5 - Detalhes sobre a força fictícia " F_a ".

Considerando a reta "d" perpendicular ao plano da bobina "d", mostrado na figura 2.5, a força \vec{F}_a tem as seguintes propriedades :

- é perpendicular à reta "d",
- pertence ao plano formado pela reta "d" e eixo "a",
- sentido coerente com o conjugado " C_a ".

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Colocando-se agora as 4 bobinas energizadas, e aplicando o modelo anterior para as bobinas "a", "b" e "c" simultaneamente, tem-se as forças " F_a ", " F_b " e " F_c ", indicadas na figura 2.6.

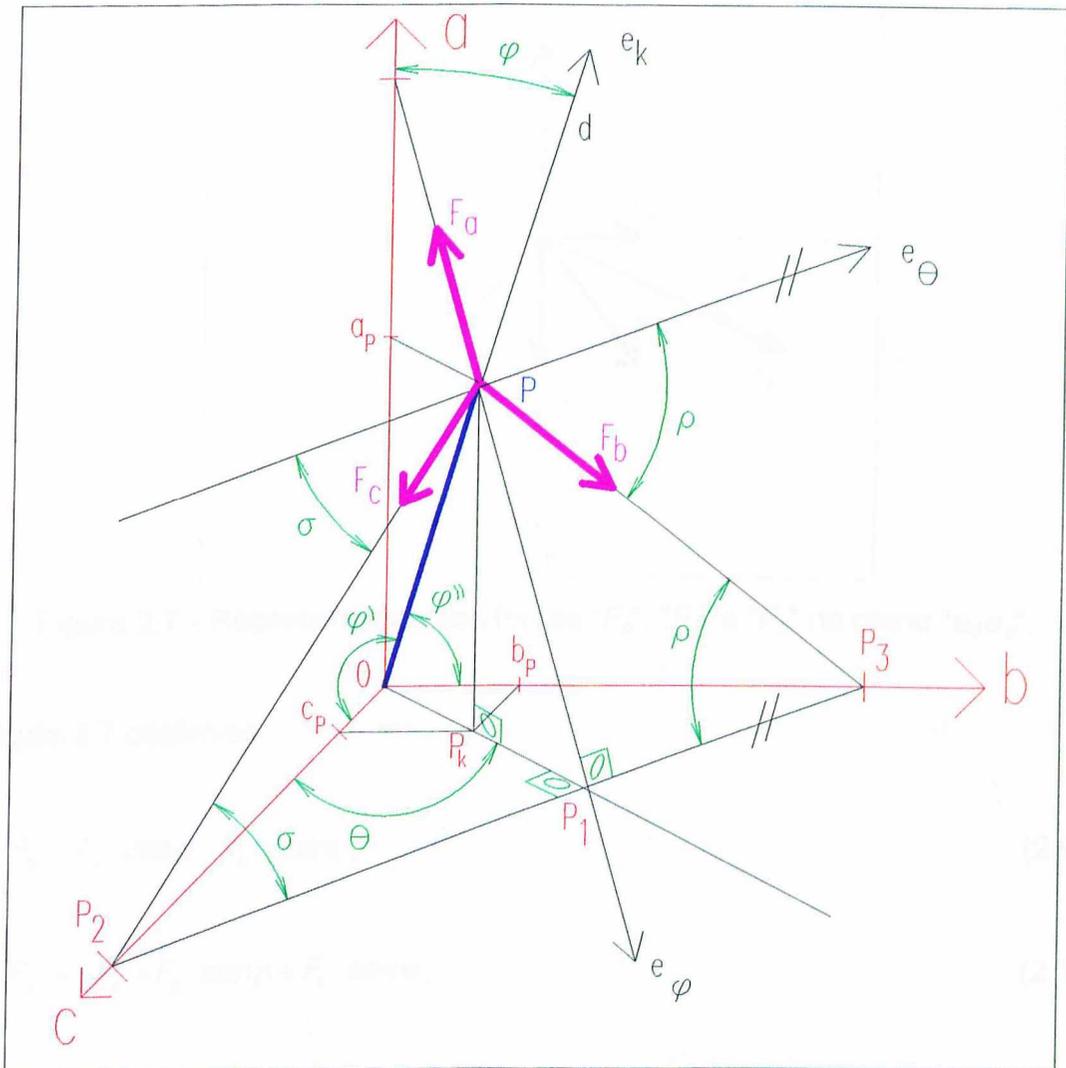


Figura 2.6 - Visualização das forças " F_a ", " F_b " e " F_c ".

Geometricamente tem-se as seguintes propriedades:

- " e_k ", " e_θ " e " e_φ " são versores perpendiculares entre si,
- " e_k " é paralela e sobreposta à reta " d ",
- as forças " F_a ", " F_b " e " F_c ", são perpendiculares a reta " d ", e portanto pertencem a um mesmo plano (plano " $e_\theta e_\varphi$ "),
- " a_p ", " b_p " e " c_p " são as coordenadas retangulares do ponto " P ".

Visualizando as forças " F_a ", " F_b " e " F_c " no plano " $e_\theta e_\varphi$ ", tem-se a figura 2.7.

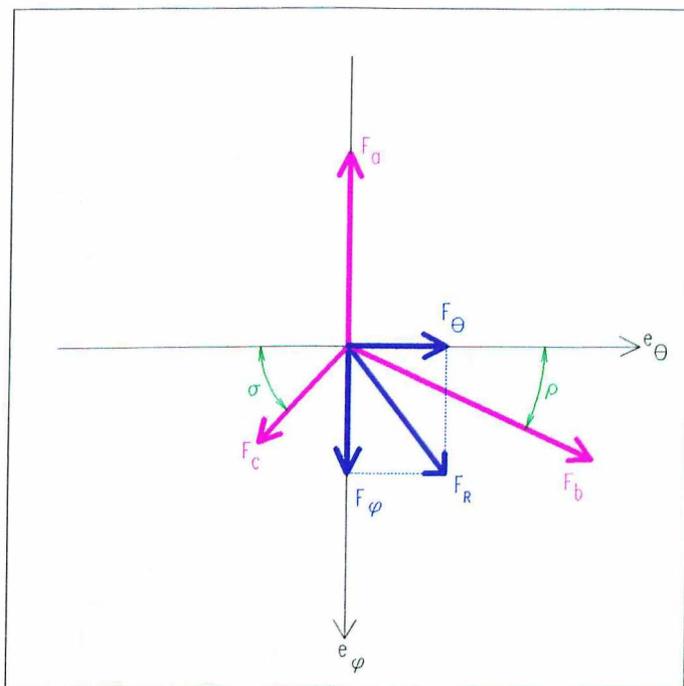


Figura 2.7 - Representação das forças " F_a ", " F_b " e " F_c " no plano " $e_\theta e_\varphi$ ".

Da figura 2.7 obtém-se:

$$F_\theta = F_b \cdot \cos \rho - F_c \cdot \cos \sigma, \quad (2.9)$$

$$F_\varphi = -F_a + F_b \cdot \sin \rho + F_c \cdot \sin \sigma, \quad (2.10)$$

$$F_R = \sqrt{F_\theta^2 + F_\varphi^2}. \quad (2.11)$$

Como a posição do rotor é dada pelos ângulos " φ " e " θ ", para a obtenção das forças dadas nas expressões 2.9 e 2.10 há necessidade de se obter as relações entre " φ ", " θ " e " ρ ", " σ ".

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Para a obtenção da relação entre “ φ ”, “ θ ” e “ ρ ”, da figura 2.6 obtém-se os triângulos representados na figura 2.8.

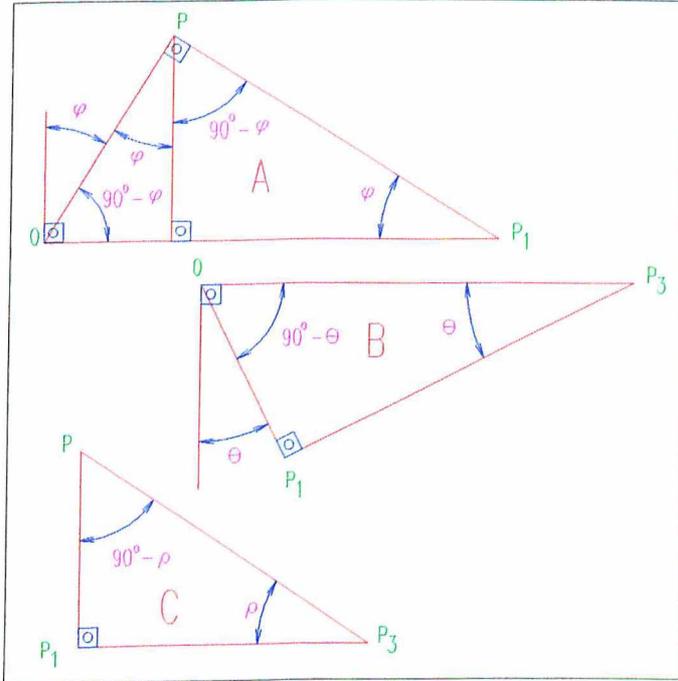


Figura 2.8 - Triângulos “A”, “B” e “C” do poliedro “ OPP_1P_3 ”.

No triângulo “A” da figura 2.8, tem-se:

$$90^\circ - \varphi = \arctan\left(\frac{\overline{PP_1}}{\overline{OP}}\right),$$

$$\overline{PP_1} = \overline{OP} \cdot \tan(90^\circ - \varphi),$$

e portanto:

$$\overline{PP_1} = \frac{\overline{OP}}{\tan \varphi}. \tag{2.12}$$

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Do mesmo triângulo tem-se:

$$\overline{PP_1} = \overline{OP_1} \cdot \cos \varphi. \quad (2.13)$$

Comparando as expressões 2.12 e 2.13, tem-se:

$$\overline{OP_1} = \frac{\overline{OP}}{\operatorname{sen} \varphi}. \quad (2.14)$$

No triângulo "B" da figura 2.8, tem-se:

$$\theta = \arctan \left(\frac{\overline{OP_1}}{\overline{P_1P_3}} \right),$$

e portanto :

$$\overline{P_1P_3} = \frac{\overline{OP_1}}{\tan \theta}. \quad (2.15)$$

Substituindo a expressão 2.14 na expressão 2.15, tem-se:

$$\overline{P_1P_3} = \frac{\overline{OP}}{\operatorname{sen} \varphi \cdot \tan \theta}. \quad (2.16)$$

No triângulo "C" da figura 2.8, tem-se:

$$\rho = \arctan \left(\frac{\overline{PP_1}}{\overline{P_1P_3}} \right). \quad (2.17)$$

Substituindo as expressões 2.12 e 2.16 na expressão 2.17, tem-se:

$$\tan \rho = \frac{\frac{\overline{OP}}{\tan \varphi}}{\overline{OP} \cdot \tan \theta},$$

e portanto:

$$\tan \rho = \tan \theta \cdot \cos \varphi \quad (2.18)$$

Para a obtenção da relação entre “ φ ”, “ θ ” e “ σ ”, da figura 2.6 obtém-se os triângulos representados na figura 2.9.

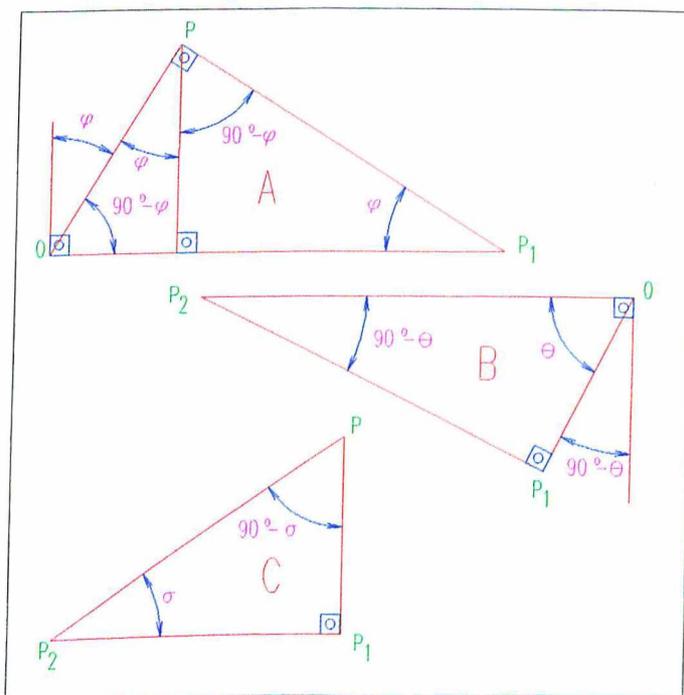


Figura 2.9 - Triângulos “A”, “B” e “C” do poliedro “ OPP_1P_2 ”.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

No triângulo "A" da figura 2.9, tem-se:

$$90^\circ - \varphi = \arctan\left(\frac{\overline{PP_1}}{\overline{OP}}\right),$$

$$\overline{PP_1} = \overline{OP} \cdot \tan(90^\circ - \varphi),$$

e portanto:

$$\overline{PP_1} = \frac{\overline{OP}}{\tan \varphi}. \quad (2.19)$$

Do mesmo triângulo, tem-se:

$$\overline{PP_1} = \overline{OP_1} \cdot \cos \varphi. \quad (2.20)$$

Comparando as expressões 2.19 e 2.20, tem-se:

$$\overline{OP_1} = \frac{\overline{OP}}{\sen \varphi}. \quad (2.21)$$

No triângulo "B" da figura 2.9, tem-se:

$$90^\circ - \theta = \arctan\left(\frac{\overline{OP_1}}{\overline{P_1P_2}}\right),$$

$$\overline{P_1P_2} = \frac{\overline{OP_1}}{\tan(90^\circ - \theta)},$$

e portanto:

$$\overline{P_1P_2} = \overline{OP_1} \cdot \tan \theta. \quad (2.22)$$

Substituindo a expressão 2.21 na expressão 2.22, tem-se:

$$\overline{P_1P_2} = \frac{\overline{OP} \cdot \tan \theta}{\text{sen } \varphi}. \quad (2.23)$$

No triângulo "C" da figura 2.9, tem-se:

$$\sigma = \arctan \left(\frac{\overline{PP_1}}{\overline{P_1P_2}} \right). \quad (2.24)$$

Substituindo as expressões 2.19 e 2.23 na expressão 2.24, tem-se:

$$\tan \sigma = \frac{\frac{\overline{OP}}{\tan \varphi}}{\frac{\overline{OP} \cdot \tan \theta}{\text{sen } \varphi}},$$

e portanto:

$$\tan \sigma = \cot \theta \cdot \cos \varphi. \quad (2.25)$$

Como as forças " F_a ", " F_b " e " F_c " produzem os respectivos conjugados " C_a ", " C_b " e " C_c ", no mesmo ponto de aplicação " P " através das expressões 2.9, 2.10 e 2.11, obtém-se:

$$C_\theta = C_b \cdot \cos \rho - C_c \cdot \cos \sigma, \quad (2.26)$$

$$C_\varphi = -C_a + C_b \cdot \text{sen } \rho + C_c \cdot \text{sen } \sigma, \quad (2.27)$$

$$C_R = \sqrt{C_\theta^2 + C_\varphi^2}. \quad (2.28)$$

2.2.3 - Indutâncias mútuas

As indutâncias mútuas entre as bobinas do estator são iguais a zero, uma vez que elas estão dispostas perpendicularmente entre si.

A indutância mútua entre as bobinas "d" e "a" pode ser obtida a partir da distribuição de campo magnético, produzido pela corrente na bobina "a", que enlaça a bobina "d".

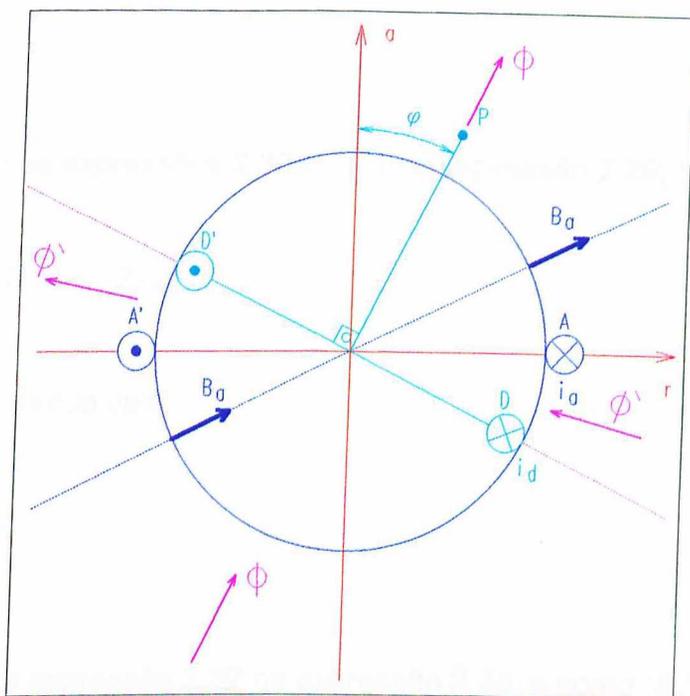


Figura 2.10 - Fluxo produzido pela bobina "a" e a interação com a bobina "d".

Como a distribuição da densidade de campo magnético é radial e uniforme, pela análise da figura 2.10, o fluxo magnético mútuo entre as bobinas "d" e "a", pode ser escrito:

$$\Phi_{da} = 2 \cdot B_a \cdot (S - S'), \quad (2.29)$$

onde:

S - menor setor esférico entre A e D'

S' - menor setor esférico entre A e D

A área de um setor esférico é proporcional ao seu ângulo de abertura e portanto:

$$S' = k_2 \cdot \varphi, \quad (2.30)$$

e:

$$S = k_2 \cdot (\pi - \varphi). \quad (2.31)$$

Substituindo as expressões 2.30 e 2.31 na expressão 2.29, tem-se:

$$\Phi_{da} = 2 \cdot k_2 \cdot B_a \cdot (\pi - 2 \cdot \varphi). \quad (2.32)$$

A indutância mútua vale:

$$M_{da} = \frac{N_d \cdot \Phi_{da}}{i_a}. \quad (2.33)$$

Substituindo a expressão 2.32 na expressão 2.33, e como " B_a " é proporcional a " $N_a i_a$ ", têm-se:

$$M_{da} = k_3 \cdot (\pi - 2 \cdot \varphi), \quad (2.34)$$

onde :

$$k_3 = 2 \cdot k_2 \cdot N_a \cdot N_d.$$

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Analogamente, pode-se determinar as indutâncias mútuas entre as bobinas “b” e “d” e entre as bobinas “c” e “d”. Considerando que $N_a=N_b=N_c$, tem-se:

$$M_{db} = k_3 \cdot (\pi - 2 \cdot \varphi''), \tag{2.35}$$

$$M_{dc} = k_3 \cdot (\pi - 2 \cdot \varphi'), \tag{2.36}$$

onde o ângulo “ φ' ” é formado entre as retas “d” e “c” e o ângulo “ φ'' ” é formado entre as retas “d” e “b”, conforme pode ser visto na figura 2.11.

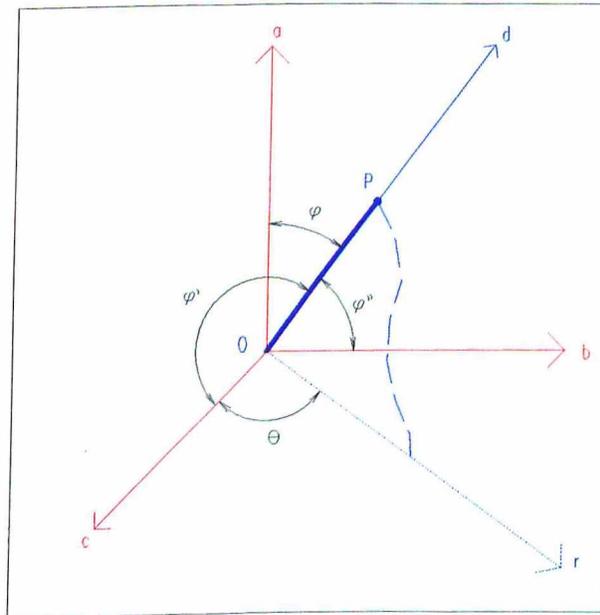


Figura 2.11 - Ângulos “ φ' ”, “ φ'' ” e “ φ''' ” com a reta “d”.

Para se obter “ φ' ” e “ φ'' ” a partir dos ângulos que determinam a posição do rotor, “ φ ” e “ θ ”, da figura 2.6, tem-se:

$$\overline{Oa_P} = \overline{OP} \cdot \cos \varphi, \tag{2.37}$$

$$\overline{OP_k} = \overline{OP} \cdot \sen \varphi, \tag{2.38}$$

$$\overline{Ob_P} = \overline{OP_k} \cdot \sen \theta = \overline{OP} \cdot \sen \varphi \cdot \sen \theta, \tag{2.39}$$

$$\overline{Oc_P} = \overline{OP_k} \cdot \cos \theta = \overline{OP} \cdot \sen \varphi \cdot \cos \theta. \tag{2.40}$$

Da figura 2.6 destaca-se os triângulos apresentados na figura 2.12.

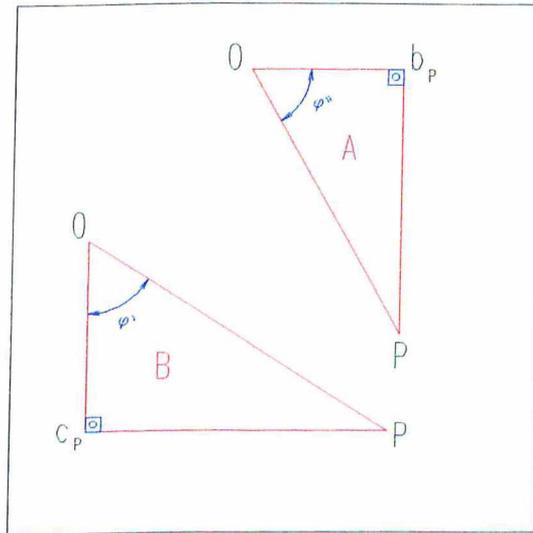


Figura 2.12- Identificação dos ângulos “ φ' ” e “ φ'' ”.

Considerando o triângulo “A” da figura 3.11, o ângulo “ φ'' ” pode ser determinado por:

$$\overline{Pb_p} = \overline{OP} \cdot \text{sen } \varphi'' , \quad (2.41)$$

e na relação de lados do triângulo “A”, tem-se:

$$\overline{OP}^2 = \overline{Pb_p}^2 + \overline{Ob_p}^2 ,$$

ou seja:

$$\overline{Pb_p} = \sqrt{\overline{OP}^2 - \overline{Ob_p}^2} . \quad (2.42)$$

Substituindo a expressão 2.39 na expressão 2.42, tem-se:

$$\overline{Pb_p} = \overline{OP} \cdot \sqrt{1 - \text{sen}^2 \varphi \cdot \text{sen}^2 \theta} . \quad (2.43)$$

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Comparando a expressão 2.39 com a expressão 2.41, tem-se:

$$\text{sen } \varphi'' = \sqrt{1 - \text{sen}^2 \varphi \cdot \text{sen}^2 \theta}, \quad (2.44)$$

ou seja:

$$(\text{sen } \varphi'')^2 + (\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta)^2 = 1. \quad (2.45)$$

Como:

$$(\text{sen } \varphi'')^2 + (\text{cos } \varphi'')^2 = 1, \quad (2.46)$$

da comparação das expressões 2.46 e 2.45, tem-se:

$$\text{cos } \varphi'' = \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta, \quad (2.47)$$

ou seja:

$$\varphi'' = \arccos(\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \theta) \quad (2.48)$$

Para a determinação do ângulo " φ' ", o mesmo procedimento é aplicado, porém considerando o triângulo "B" da figura 2.11. Assim é encontrada a relação:

$$\overline{Pc_p} = \overline{OP} \cdot \text{sen } \varphi', \quad (2.49)$$

e na relação de lados do triângulo "B", tem-se:

$$\overline{OP}^2 = \overline{Pc_p}^2 + \overline{Oc_p}^2,$$

Motor esférico - Um tipo de posicionador

ou seja:

$$\overline{PC_P} = \sqrt{\overline{OP}^2 - \overline{OC_P}^2}. \quad (2.50)$$

Substituindo a expressão 2.40 na expressão 2.50, tem-se:

$$\overline{PC_P} = \overline{OP} \cdot \sqrt{1 - \text{sen}^2 \varphi \cdot \text{cos}^2 \theta}. \quad (2.51)$$

Comparando a expressão 2.49 com a expressão 2.51, tem-se:

$$\text{sen } \varphi' = \sqrt{1 - \text{sen}^2 \varphi \cdot \text{cos}^2 \theta}, \quad (2.52)$$

ou seja:

$$(\text{sen } \varphi')^2 + (\text{sen } \varphi \cdot \text{cos } \theta)^2 = 1. \quad (2.53)$$

Como:

$$(\text{sen } \varphi')^2 + (\text{cos } \varphi')^2 = 1, \quad (2.54)$$

da comparação entre as expressões 2.54 e 2.53, tem-se:

$$\text{cos } \varphi' = \text{sen } \varphi \cdot \text{cos } \theta, \quad (2.55)$$

ou seja:

$$\varphi' = \arccos(\text{sen } \varphi \cdot \text{cos } \theta). \quad (2.56)$$

2.2.4 - Equações básicas

2.2.4.1 - Condição de equilíbrio

Para a condição de equilíbrio, tem-se:

$$C_{\theta} = C_{\varphi} = 0, \quad (2.57)$$

e portanto das equações 2.26 e 2.27, tem-se:

$$C_b \cdot \cos \rho = C_c \cdot \cos \sigma, \quad (2.58)$$

$$C_a = C_b \cdot \operatorname{sen} \rho + C_c \cdot \operatorname{sen} \sigma. \quad (2.59)$$

Substituindo as expressões de conjugado 2.6, 2.7 e 2.8 nas expressões de equilíbrio 2.58 e 2.59, tem-se:

$$i_b \cdot \cos \rho = i_c \cdot \cos \sigma, \quad (2.60)$$

$$i_a = i_b \cdot \operatorname{sen} \rho + i_c \cdot \operatorname{sen} \sigma. \quad (2.61)$$

Substituindo " i_b " da expressão 2.61 pela expressão 2.60, tem-se:

$$i_a = \frac{i_c \cdot \cos \sigma}{\cos \rho} \cdot \operatorname{sen} \rho + i_c \cdot \operatorname{sen} \sigma,$$

ou seja:

$$i_a = i_c \cdot \cos \sigma \cdot (\tan \rho + \tan \sigma) \quad (2.62)$$

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Substituindo “ $\tan \rho$ ” e “ $\tan \sigma$ ”, dado nas expressões 2.18 e 2.25, respectivamente, na expressão 2.62, tem-se:

$$i_a = i_c \cdot \cos \sigma \cdot (\tan \theta \cdot \cos \varphi + \cot \theta \cdot \cos \varphi),$$

ou seja:

$$i_a = i_c \cdot \frac{\cos \sigma \cdot \cos \varphi}{\tan \theta} \cdot (1 + \tan^2 \theta). \quad (2.63)$$

Da conhecida identidade: $\cos \sigma = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \beta}}$, e da expressão 2.25, tem-se:

$$\cos \sigma = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \varphi}{\tan^2 \theta}}}. \quad (2.64)$$

De maneira semelhante: $\cos \rho = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \alpha}}$, e da expressão 2.18, tem-se:

$$\cos \rho = \frac{1}{\sqrt{(1 + \tan^2 \theta \cdot \cos^2 \varphi)}}. \quad (2.65)$$

Substituindo a expressão 2.64 na expressão 2.63, tem-se:

$$i_a = i_c \cdot \frac{\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \varphi}{\tan^2 \theta}}} \cdot \cos \varphi}{\tan \theta} \cdot (1 + \tan^2 \theta),$$

ou seja:

$$r_{ca} = \frac{i_c}{i_a} = \frac{\sqrt{\tan^2 \theta + \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi \cdot (1 + \tan^2 \theta)} \quad (2.66)$$

Da expressão 2.60, tem-se:

$$i_c = i_b \cdot \frac{\cos \rho}{\cos \sigma} \quad (2.67)$$

Como: $r_{ca} = \frac{i_c}{i_a}$, tem-se:

$$r_{ca} = \frac{i_b \cdot \frac{\cos \rho}{\cos \sigma}}{i_a},$$

ou seja:

$$r_{ba} = \frac{i_b}{i_a} = r_{ca} \cdot \frac{\cos \sigma}{\cos \rho} \quad (2.68)$$

Substituindo as expressões 2.66, 2.64 e 2.65 na expressão 2.68, tem-se:

$$r_{ba} = \frac{i_b}{i_a} = \frac{\sqrt{\tan^2 \theta + \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi \cdot (1 + \tan^2 \theta)} \cdot \frac{\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\cos^2 \varphi}{\tan^2 \theta}}}}{\frac{1}{\sqrt{(1 + \tan^2 \theta) \cdot \cos^2 \varphi}}},$$

ou seja:

$$r_{ba} = \frac{i_b}{i_a} = \frac{\tan \theta \cdot \sqrt{(1 + \tan^2 \theta \cdot \cos^2 \varphi)}}{\cos \varphi \cdot (1 + \tan^2 \theta)} \quad (2.69)$$

Desta forma, para uma dada posição " φ " e " θ "; o equilíbrio se dá satisfazendo as relações das correntes indicadas nas equações 2.66 e 2.69.

2.2.4.2 - Condição transitória

As equações que relacionam as grandezas elétricas durante um transitório qualquer, podem ser agrupadas na equação matricial:

$$[v] = [r] \cdot [i] + \frac{d}{dt} [\lambda] \quad (2.70)$$

onde "[v]", "[i]" e "[λ]" são respectivamente as matrizes coluna de tensão, corrente e fluxo concatenado das bobinas "a", "b", "c" e "d"; e "[r]" é a matriz diagonal das resistências das referidas bobinas.

Os termos do fluxo concatenado para as bobinas "a", "b" e "c" podem ser dados por:

$$\lambda_j = L_j i_j + M_{jd} i_d \quad (j = a, b, c) \quad (2.71)$$

onde " L_j " e " M_{jd} " são, respectivamente, a sua indutância própria e a indutância mútua da bobina "j" em relação à bobina "d".

Para a bobina "d", o fluxo concatenado vale:

$$\lambda_d = L_d i_d + M_{ad} i_a + M_{bd} i_b + M_{cd} i_c \quad (2.72)$$

Escrevendo a expressão 2.70 com todos os seus componentes, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 & M_{da} \\ 0 & L_b & 0 & M_{db} \\ 0 & 0 & L_c & M_{dc} \\ M_{da} & M_{db} & M_{dc} & L_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix}$$

As equações mecânicas para o movimento do motor, dadas em coordenadas esféricas, são:

$$C_\theta - C_{L\theta} = J \cdot \frac{d}{dt} \omega_\theta + D \cdot \omega_\theta \quad (2.73)$$

$$C_\varphi - C_{L\varphi} = J \cdot \frac{d}{dt} \omega_\varphi + D \cdot \omega_\varphi \quad (2.74)$$

onde:

C_θ, C_φ = componentes esféricas do conjugado eletromagnético,

$C_{L\theta}, C_{L\varphi}$ = componentes esféricas do conjugado de carga,

$\omega_\theta, \omega_\varphi$ = componentes esféricas da velocidade angular,

J = momento de inércia,

D = coeficiente de atrito viscoso do sistema.

Capítulo 3 - Protótipos

3.1 - Análise de opções para a montagem de protótipos

Para se chegar ao último protótipo deste trabalho foram realizados diversos estudos teóricos e experimentais no tocante às disposições físicas dos diversos componentes do motor. Estes estudos foram necessários, dadas as dificuldades de construção mecânica do motor idealmente concebido.

3.1.1 - Disposição física das bobinas do estator

Na concepção teórica, as 3 bobinas do estator estão dispostas perpendicularmente entre si. Esta montagem tem as vantagens de que o campo magnético resultante envolve totalmente o rotor esférico e suas indutâncias mútuas são nulas. Mas existem desvantagens. Uma delas é a dificuldade construtiva na região de interseção das bobinas. A outra, mais importante, refere-se à grande dificuldade do acoplamento carga-motor, uma vez que a casca esférica estatórica envolve totalmente o rotor. Para viabilizar o motor esférico do ponto de vista prático, duas alternativas são apresentadas.

A primeira corresponde a abertura de uma janela de um quadrante na casca esférica entre as bobinas do estator. A desvantagem é a pequena área de acoplamento entre carga-motor.

A outra alternativa corresponde ao deslocamento das bobinas do estator da posição perpendicular para uma posição ortogonal, como mostra a figura 3.1. Esta alternativa tem a vantagem de liberar todos os quadrantes positivos para a atuação da carga, e de ter construção mais simples. Existem algumas desvantagens desta alternativa em relação à concepção teórica. Uma delas, refere-se ao fato do campo magnético que atravessa o rotor ter menor intensidade e maiores distorções. Outra desvantagem é apresentar indutância mútua entre as bobinas do estator. E talvez a mais importante desvantagem, seja a substituição da casca esférica por uma semi-esférica.

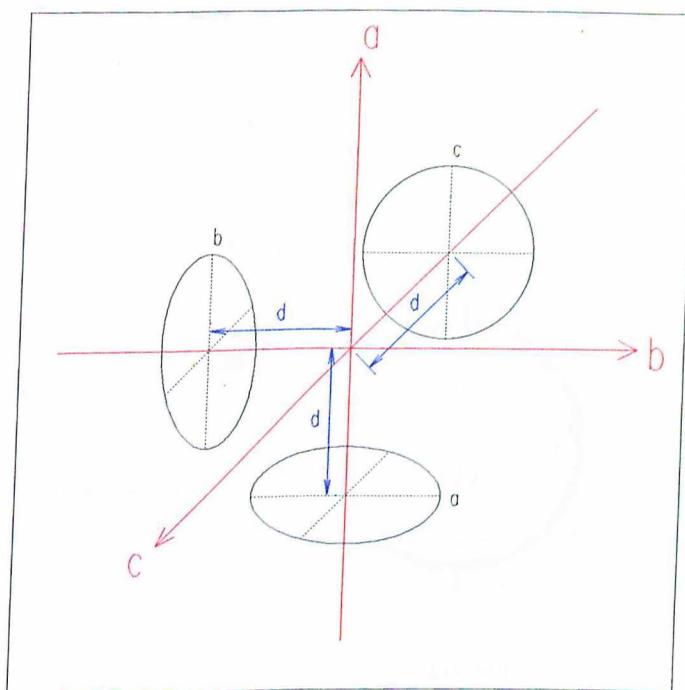


Figura 3.1 - Bobinas do estator em posição ortogonal.

3.1.2 - Suporte mecânico para o rotor

O suporte de sustentação mecânica do rotor em relação ao estator pode ser identificado em 3 grupos: aquele sem contato mecânico (ex.: levitação magnética), outro utilizando algum tipo de material intermediário no entreferro (ex.: ar comprimido, óleo, "teflon"), e finalmente o giroscópio. Quanto a este último grupo, existem duas maneiras de fazê-lo: o tradicional e o rotacional.

No tipo de giroscópio tradicional, ilustrado na figura 3.2, um anel com mancais é colocado no entreferro. Este anel contém dois mancais que o mantêm em contato com o estator (mancal "a"), permitindo-o realizar uma torção sobre o eixo "y". Outros dois mancais colocam o anel em contato com o rotor (mancal "b"), permitindo que este faça uma torção sobre o eixo "x".

No tipo de giroscópio rotacional, ilustrado na figura 3.3, um conjunto rolamento-mancal coloca em contato o rotor diretamente com o estator. O rolamento permite que o rotor realize uma torção sobre o eixo "z", e os mancais permitem que este faça uma torção sobre o eixo "y".

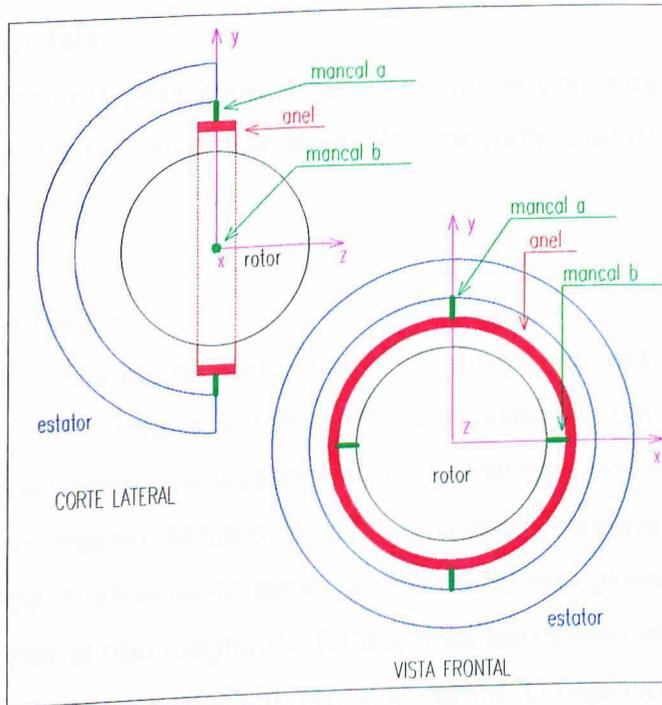


Figura 3.2 - Motor esférico com giroscópio tradicional.

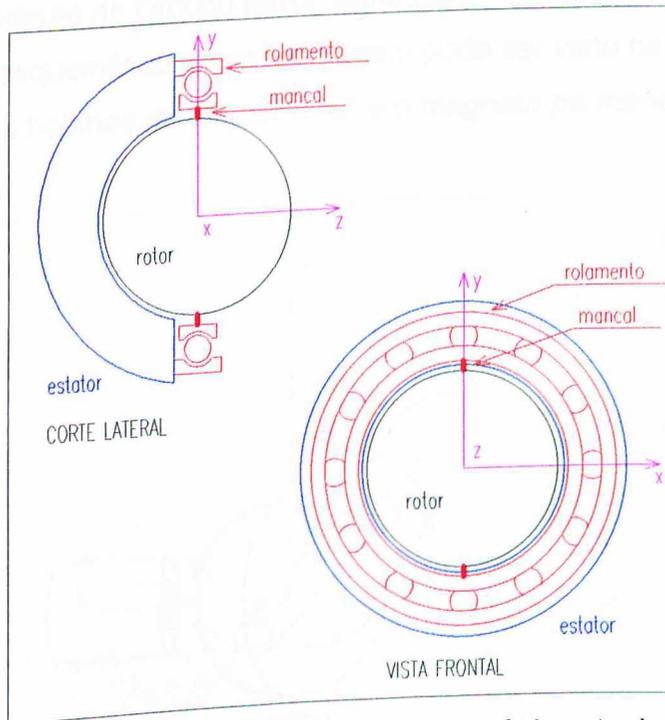


Figura 3.3 - Motor esférico com giroscópio rotacional.

3.2 - Montagens iniciais

Foram montados vários protótipos para determinar como as formas construtivas para suportes, do rotor e do estator, se comportariam com as variações de fluxo magnético.

3.2.1 - Primeiro protótipo

Na primeira tentativa foi montado um protótipo onde as três bobinas do estator são dispostas ortogonalmente, e no rotor esférico é colocado um magneto permanente. A forma construtiva apresenta as bobinas com núcleo ferromagnético e face polar plana com mesmo diâmetro do núcleo. Todo o conjunto foi montado numa carcaça não metálica. O sistema de apoio do rotor é do tipo giroscópio convencional com mancais de material não magnético (latão) e de baixa inércia. O rotor é feito de isopor com o magneto permanente em forma cilíndrica. O objetivo desta montagem, é verificar o comportamento do rotor e das bobinas do estator com uma construção mecânica independente do circuito ferromagnético.

O diagrama esquemático desta montagem pode ser vista na figura 3.4, onde "a", "b" e "c" são as bobinas do estator e "d" é o magneto permanente.

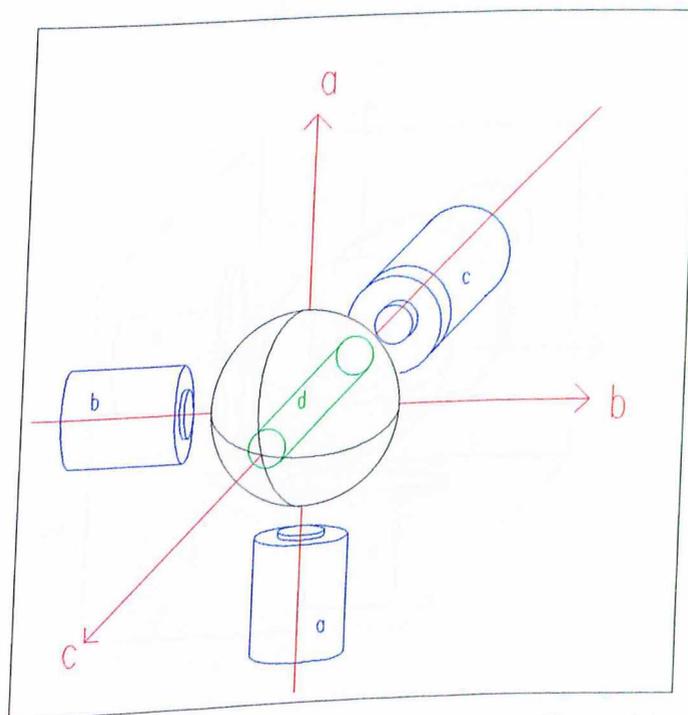


Figura 3.4 - Diagrama esquemático do 1º protótipo

Motor esférico - Um tipo de posicionador

O resultado obtido é inaceitável, pois o magneto permanente sempre se orienta com a face polar de uma bobina, tornando-se difícil a sua orientação numa posição intermediária entre duas bobinas. Assim conclui-se, que o entreferro entre uma face polar e outra deve ser mínimo, e o magneto permanente deve ser de formato esférico.

3.2.2 - Segundo protótipo

Este protótipo é construído de forma semelhante ao protótipo anterior, porém com as modificações sugeridas anteriormente. A forma construtiva apresenta as faces polares das bobinas, grandes e planas, e com pequeno entreferro entre elas. A carcaça é constituída de material ferromagnético e um pequeno magneto permanente esférico. O sistema de suporte do rotor é do tipo giroscópio convencional com mancais de latão. O objetivo desta montagem é verificar o comportamento do rotor e das bobinas do estator com um circuito magnético fechado, englobando as conclusões do protótipo anterior.

O diagrama esquemático desta montagem pode ser vista na figura 3.5, onde "a", "b" e "c" são as bobinas do estator e "d" é o magneto permanente.

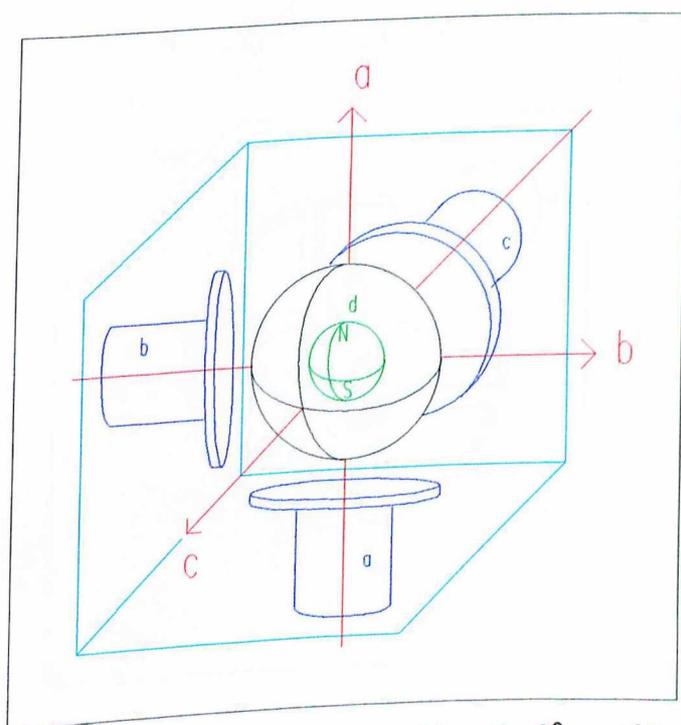


Figura 3.5 - Diagrama esquemático do 2º protótipo

O resultado obtido é aceitável, com posicionamento do rotor em qualquer posição do espaço, porém apresentando instabilidade de posição na região entre duas faces polares. Concluiu-se que as faces polares das bobinas devem ser esféricas, com pequeno entreferro entre elas e entre o magneto permanente do rotor.

3.2.3 - Terceiro protótipo

O terceiro protótipo foi construído atendendo as conclusões do protótipo anterior. A forma construtiva se constitui em uma carcaça feita de material ferromagnético, as bobinas são montadas de forma cilíndrica e com face polar esférica. O magneto permanente do rotor é em formato de barra com uma face polar moldada em material ferromagnético e semi-esférico. O sistema de apoio do rotor é do tipo giroscópio convencional com rolamentos nos mancais. O objetivo desta montagem é verificar o comportamento do rotor e das bobinas do estator com um circuito magnético de pequeno entreferro.

Na figura 3.6, pode-se ver o diagrama esquemático desta montagem, onde "a", "b" e "c" são as bobinas do estator e "d" é o magneto permanente.

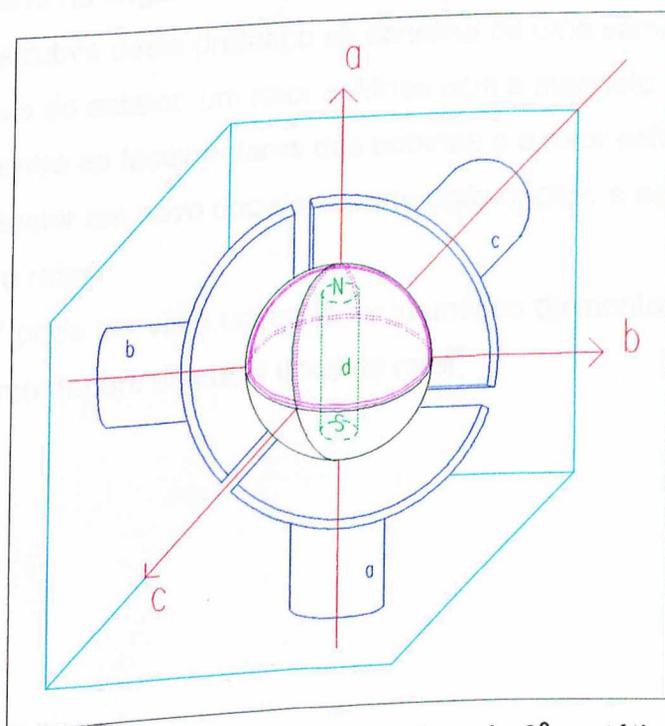


Figura 3.6 - Diagrama esquemático do 3º protótipo.

O resultado obtido é bom, com o posicionamento preciso do rotor em torno do eixo de simetria do sistema cartesiano "abc". Porém o deslocamento do rotor fica restrito a uma pequena região em torno do eixo de simetria. Fora desta região o rotor apresenta instabilidade de posicionamento. Outra desvantagem é a grande inércia do rotor devido ao acréscimo da face semi-esférica ao magneto permanente.

3.2.4 - Quarto protótipo

Para a montagem deste quarto protótipo foi feita uma análise de cada conclusão dos protótipos anteriores. A melhor disposição física para o estator são 3 bobinas de núcleo ferromagnético, faces polares esféricas, e carcaça de material ferromagnético numa disposição tal que o fluxo magnético resultante se feche pelo rotor. Duas alternativas para se construir o rotor esférico são apresentadas. A primeira alternativa consiste em se fazer duas semi-esferas com um magneto permanente em forma de barra no seu interior, e a segunda alternativa é confeccionar uma esfera de material não ferromagnético (ex.: alumínio, plástico) e colocar um magneto permanente de forma esférica no seu interior. Na primeira alternativa a vantagem é o pequeno entreferro e a desvantagem é a grande inércia, porém isto se inverte na segunda alternativa.

A forma construtiva deste protótipo se constitui de uma semi-esfera onde são alojadas as bobinas do estator, um rotor esférico com o magneto permanente e um separador sólido entre as faces polares das bobinas e o rotor esférico. O objetivo deste protótipo é testar um novo tipo de suporte para o rotor, e as duas alternativas construtivas para o rotor.

Na figura 3.7 pode ser visto um corte esquemático da montagem deste motor, e na figura 3.8, a montagem dos dois tipos de rotor.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

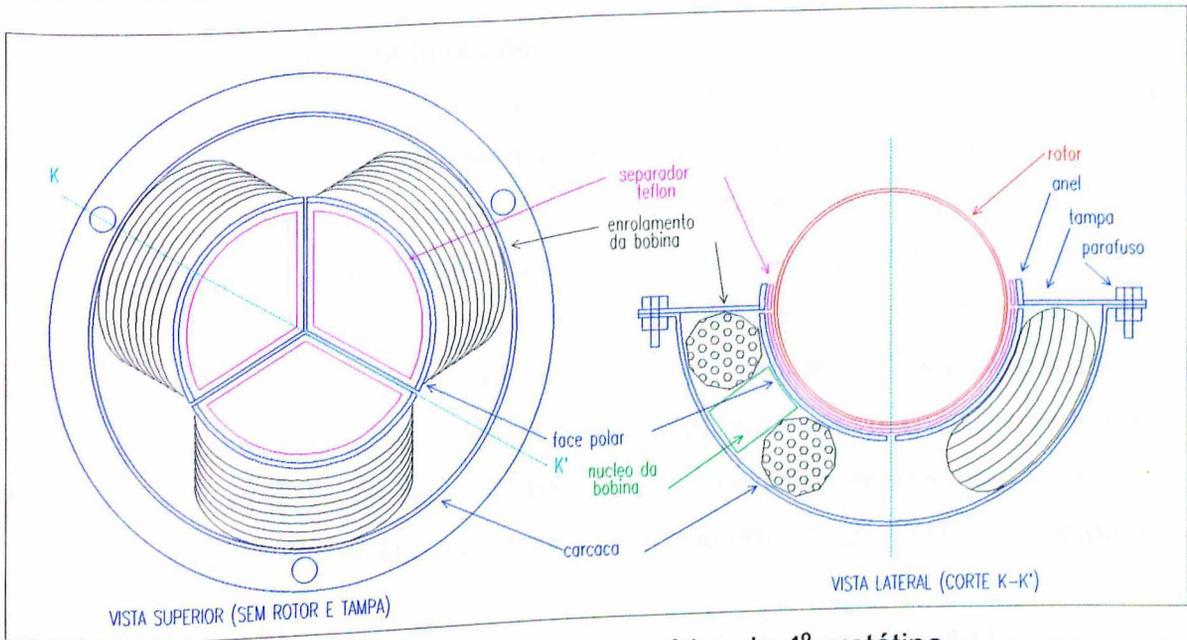


Figura 3.7 - Diagrama esquemático do 4º protótipo.

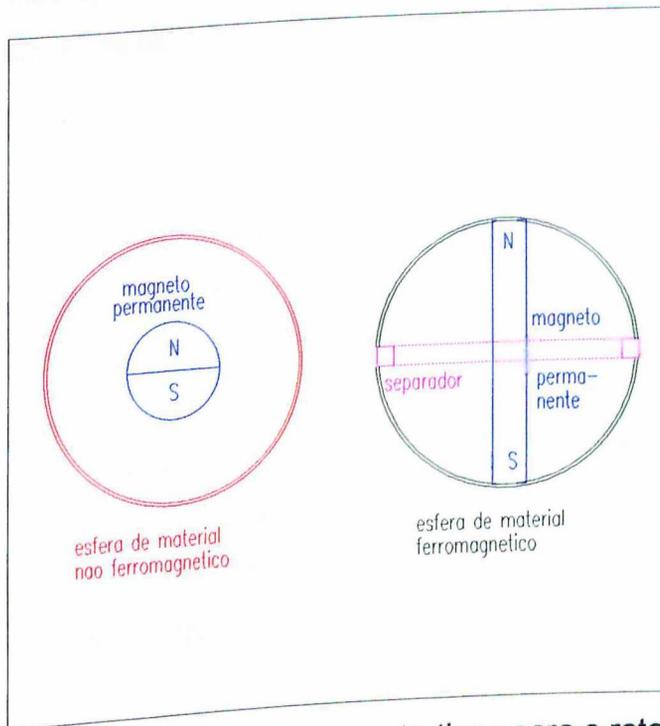


Figura 3.8 - Alternativas construtivas para o rotor.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

O desempenho do quarto protótipo é razoável. O posicionamento é conseguido em todo o espaço de atuação sem restrições. Com o rotor da segunda alternativa (esfera de alumínio com magneto permanente pequeno e esférico), o desempenho no posicionamento é melhor, quando comparado com o rotor da primeira alternativa (esfera de ferro com magneto permanente em barra e de comprimento igual ao diâmetro interno da esfera). Isto deve-se ao fato deste último apresentar um peso maior, resultando em maior atrito estático. Para compensar o atrito, deve-se construir tanto o rotor quanto o separador com grande precisão de esfericidade, para que o encaixe das peças seja perfeito. É necessário, também, que ambas as superfícies sejam polidas e colocado um líquido de boa viscosidade entre elas.

Este protótipo é o de melhor posicionamento dentre todos montados, e devido às suas características operacionais, é o protótipo final deste trabalho, e portanto aquele submetido aos ensaios.

Capítulo 4 - Preparativos para os ensaios do protótipo

4.1 - Introdução

Para a realização dos ensaios, uma série de preparativos iniciais foram necessários. Este capítulo é reservado para descrever o sistema de sensoriamento de posição utilizado, as implementações realizadas no protótipo final para a instalação do sensor, as filosofias de posicionamento do rotor, e o circuito eletrônico que serve de interface entre o computador e o motor.

4.2 - Sensor de posição

Para a implementação do sensor de posição, algumas alternativas são analisadas. Uma delas é utilizar uma câmara de vídeo que filma um ponto de referência no rotor, enviando a imagem para um computador, que analisa-a e retorna ângulos de posição. É a melhor alternativa, pois não existe contato entre ela e o rotor, não atrapalhando o acoplamento carga-rotor. Outra vantagem é da câmara fornecer a posição absoluta, podendo retornar valores com precisão. A grande desvantagem é o seu custo. Outra alternativa é utilizar roletes, que em contato com o rotor, transformam o movimento esférico em dois movimentos rotativos, que podem ser associados a "encoders" conhecidos. As desvantagens desta alternativa são a possibilidade de escorregamento entre o rotor e o rolete e a interferência mecânica. Na tentativa de se obter uma solução mais simples e pouco dispendiosa vem a terceira alternativa. A utilização do circuito eletrônico e sistema mecânico de um dispositivo apontador para computador ("mouse"). Este tem as vantagens de ser simples, não necessitar de contatos mecânicos e ser facilmente disponível. Porém sua utilização implica em modificações estruturais no motor esférico.

Um "mouse" é constituído de uma esfera metálica revestida de borracha, dois eixos ortogonais com roletes e rodas ranhuradas, dois emissores-receptores de luz infravermelha e um circuito eletrônico. Quando se movimenta o "mouse", a esfera transmite um movimento rotacional aos roletes, que através das rodas ranhuradas interrompem a luz infravermelha do emissor, enviando para o receptor uma

Motor esférico - Um tipo de posicionador

quantidade de pulsos de luz. O circuito eletrônico converte estes pulsos de luz em um código digital e os envia ao computador através de uma porta serial.

A modificação no protótipo consiste em substituir a esfera que constitui o rotor, por uma variação do giroscópio rotacional para o suporte do magneto permanente.

Conforme pode ser visto na figura 4.1, a esfera de material não magnético é substituída pelo "anel de apoio". O magneto permanente é ligado ao "anel de apoio" pelo "mancal a", permitindo que o magneto permanente realize uma torção em relação ao eixo "y". O rolamento de esferas é substituído pelo "mancal b", permitindo que o magneto permanente possa realizar uma torção sobre o eixo "z".

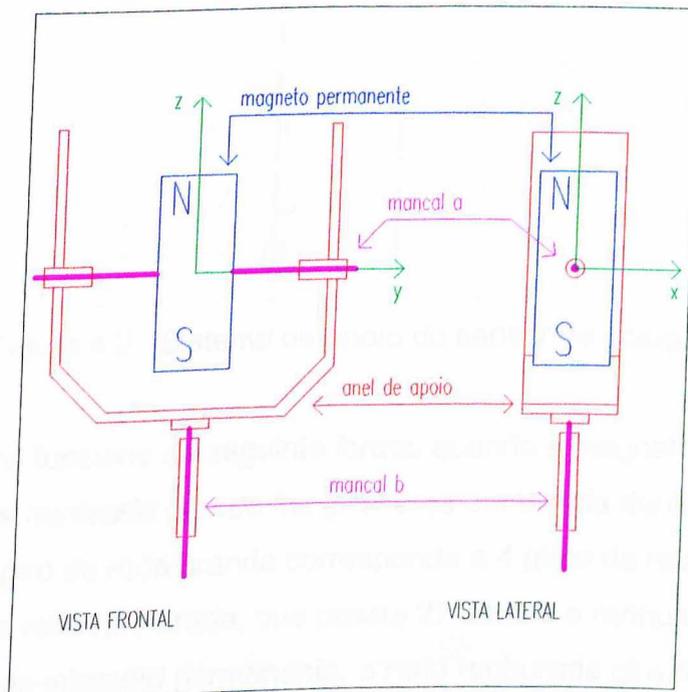


Figura 4.1 - Suporte do magneto permanente.

Um dos sensores ópticos do "mouse" é desmontado da placa principal, e colocado no anel móvel do mecanismo de suporte físico do magneto permanente, de tal maneira que quando gira o eixo horizontal que suporta o magneto permanente, este aciona a roda ranhurada, informando ao computador a posição angular vertical do rotor. A placa principal do "mouse" é montada na base do motor, juntamente com o sensor de posição, de tal maneira que quando gira o eixo vertical do mecanismo de suporte do magneto permanente, este aciona a roda ranhurada,

Motor esférico - Um tipo de posicionador

assim também informando ao computador a posição angular horizontal do rotor. Esta montagem pode ser vista na figura 4.2.

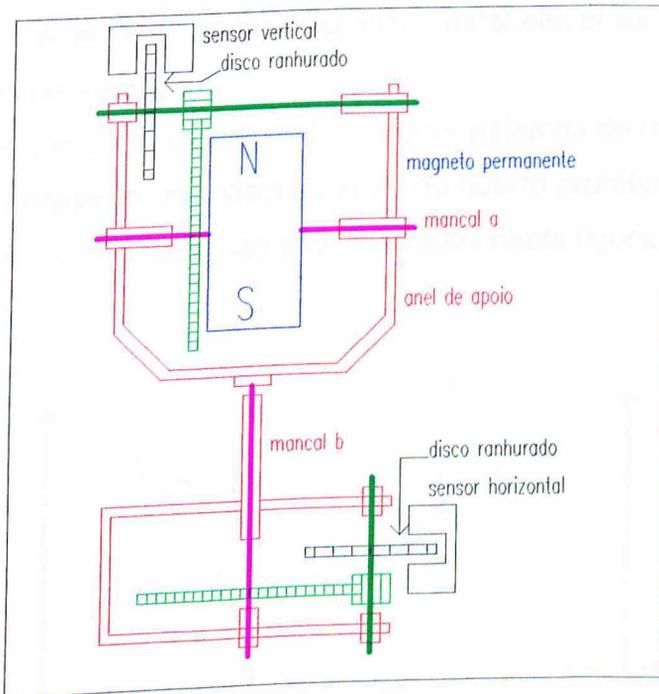


Figura 4.2 - Sistema de apoio do sensor de posição.

O mecanismo funciona da seguinte forma: quando o magneto permanente se movimenta, a roda denteada grande faz girar uma outra roda denteada pequena na razão de 1:4 (um giro da roda grande corresponde a 4 giros da roda pequena), esta por sua vez, gira a roda ranhurada, que possui 27 dentes e ranhuras. Assim para um giro completo do magneto permanente, a roda ranhurada gira 4 vezes, totalizando 108 interrupções. A variação angular mínima é de $360^\circ/108 = 3,33^\circ$. O sensor óptico é dividido em duas partes, um emissor e um receptor de luz infravermelha. A cada interrupção no fecho de luz, o circuito eletrônico envia para o computador, através da porta serial, uma informação codificada que é processada por um programa "driver", antes de passar para o programa de ensaio do motor esférico.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

O sensor de posição utilizado é implementado de tal forma que os ângulos medidos estão no sistema de referência "xyz", mostrado na figura 4.1, diferente do sistema "abc" do capítulo 2. Como originalmente a posição do rotor é dada por coordenadas do sistema "abc", se faz necessário estabelecer as relações entre ambos os sistemas referenciais.

Para se obter a posição relativa entre os dois sistemas de referência, "abc" e "xyz", a figura 4.3 apresenta uma vista superior do quarto protótipo e um corte transversal AA'. Por simplicidade não são mostrados nesta figura, o rotor, a tampa e as bobinas "b" e "c".

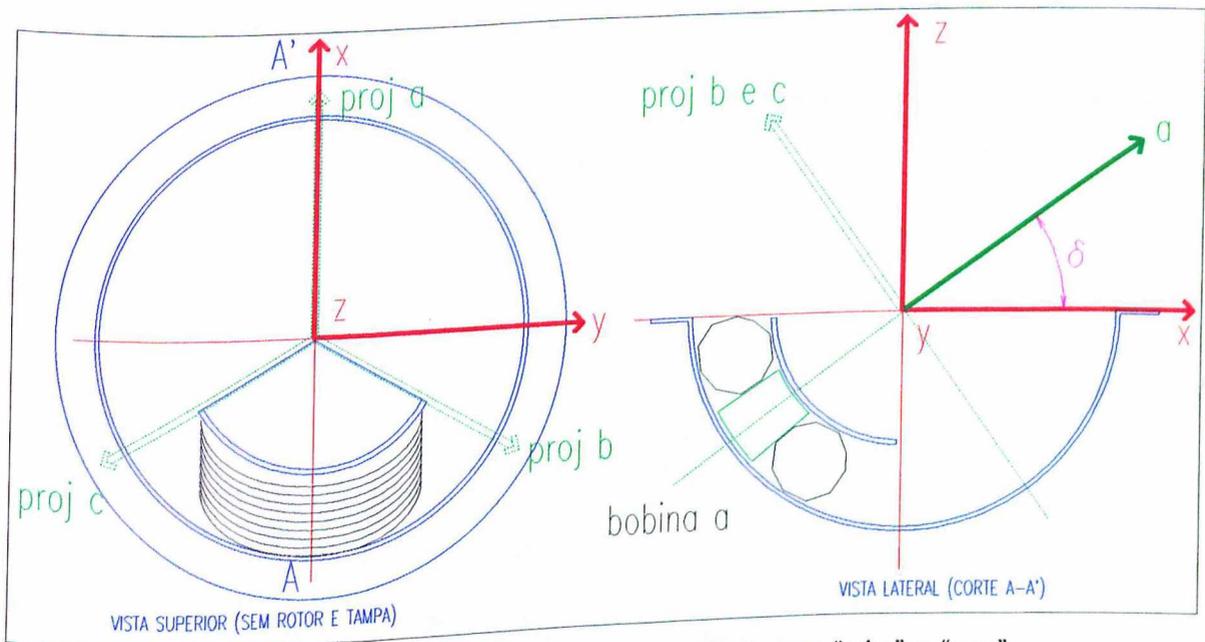


Figura 4.3 - Disposição dos eixos cartesianos "abc" e "xyz".

Da figura 4.3, geometricamente obtém-se as seguintes propriedades:

- os eixos "x", "y" e "a" estão no mesmo plano,
- os eixos "b", "c" e "y" estão no mesmo plano
- o ângulo entre as retas formadas pelos eixos "b" e "y" é igual ao ângulo entre as retas formadas pelos eixos "c" e "y"
- o eixo "z" é o eixo de simetria do sistema "abc"

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Chamando-se de δ o menor ângulo entre as retas formadas pelos eixos "x" e "a" e de δ_1 o menor ângulo entre as retas formadas pelos eixos "b" e "y", pelas propriedades geométricas citadas anteriormente, obtém-se os valores:

$$\delta = \arctan \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 35.2644^\circ ,$$

$$\delta_1 = 45^\circ .$$

Considerando um determinado ponto "P" fixo no rotor, a seguir são desenvolvidos cálculos que permitem relacionar suas coordenadas do sistema "xyz" para o sistema "abc".

Seja "P" disposto no sistema de eixos "xyz", conforme mostrado na figura 4.4, onde " β " e " α " são seus ângulos de posição.

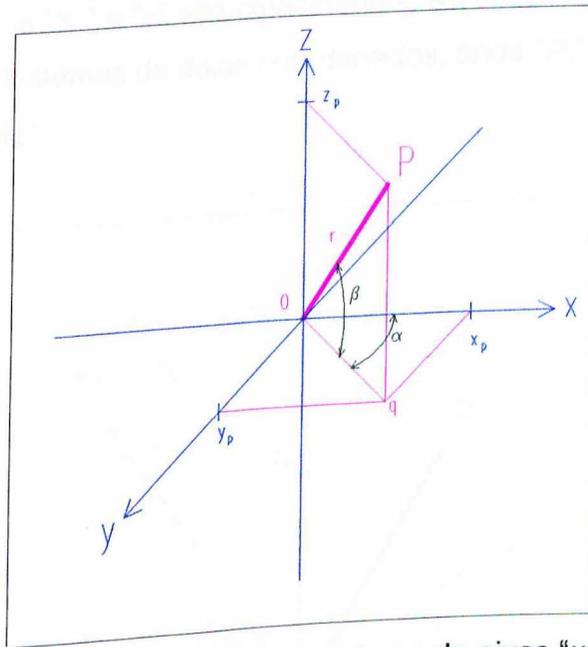


Figura 4.4 - Vetor "P" no sistema de eixos "xyz".

As coordenadas retangulares " x_p ", " y_p " e " z_p " de " P " são:

$$q = r \cdot \cos\beta \tag{4.1}$$

$$x_p = q \cdot \cos\alpha \tag{4.2}$$

$$y_p = q \cdot \sen\alpha \tag{4.3}$$

$$z_p = r \cdot \sen\beta \tag{4.4}$$

onde " r " é módulo do vetor \overline{OP} .

Para passar de um sistema de coordenadas para outro, se faz necessário realizar duas rotações de eixos.

Em uma primeira rotação, o sistema de coordenadas " xyz " é girado segundo o ângulo " δ " para formar o sistema de coordenadas " $a'b'c'$ ". Neste sistema intermediário, os eixos " b' " e " y " são coincidentes. Na figura 4.5 pode-se ver a disposição dos dois sistemas de eixos coordenados, onde " P_1 " é a projeção do ponto " P " no plano " xz ".

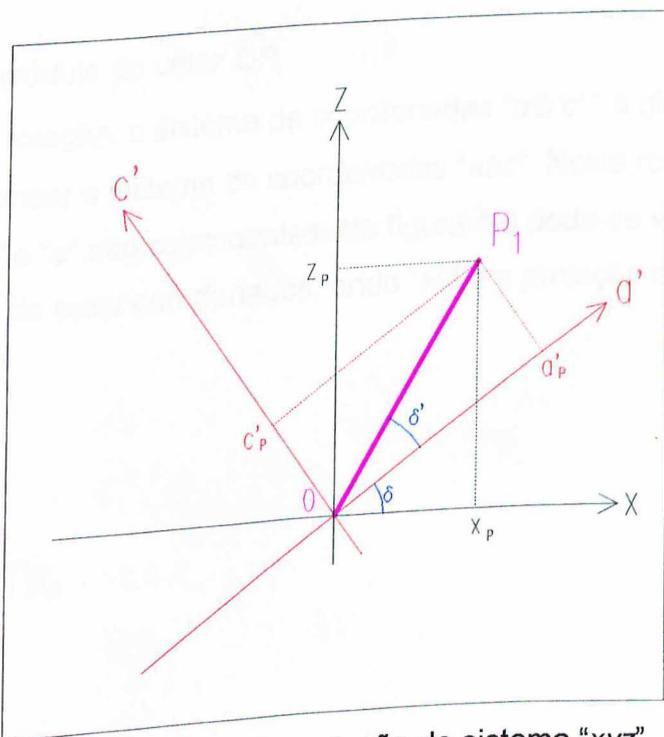


Figura 4.5 - Primeira rotação do sistema " xyz ".

Motor esférico - Um tipo de posicionador

O ângulo δ' entre o vetor " $\overline{OP_1}$ " e o eixo " a' ", é identificado através do teste:

$$\text{Se } x_P = 0, \text{ então } \delta' = \frac{\pi}{2} - \delta, \text{ ou,}$$

$$\text{se } x_P > 0, \text{ então } \delta' = \left| \arctan\left(\frac{z_P}{x_P}\right) \right| - \delta, \text{ ou,}$$

$$\text{se } x_P < 0, \text{ então } \delta' = \pi - \left| \arctan\left(\frac{z}{x}\right) \right| - \delta. \quad (4.5)$$

Assim, as novas coordenadas " a_P' ", " b_P' " e " c_P' " são :

$$a_P' = P_1 \cdot \cos \delta' \quad (4.6)$$

$$b_P' = y_P \quad (4.7)$$

$$c_P' = P_1 \cdot \sin \delta' \quad (4.8)$$

onde P_1 é o módulo do vetor $\overline{OP_1}$.

Na segunda rotação, o sistema de coordenadas " $a'b'c'$ " é girado segundo o ângulo " δ_1 " para formar o sistema de coordenadas " abc ". Nesta rotação o eixo intermediário " a'' " e " a " são coincidentes. Na figura 4.6 pode-se ver a disposição dos dois sistemas de eixos coordenados, onde " P_2 " é a projeção do ponto " P " no plano " $b'c'$ ".

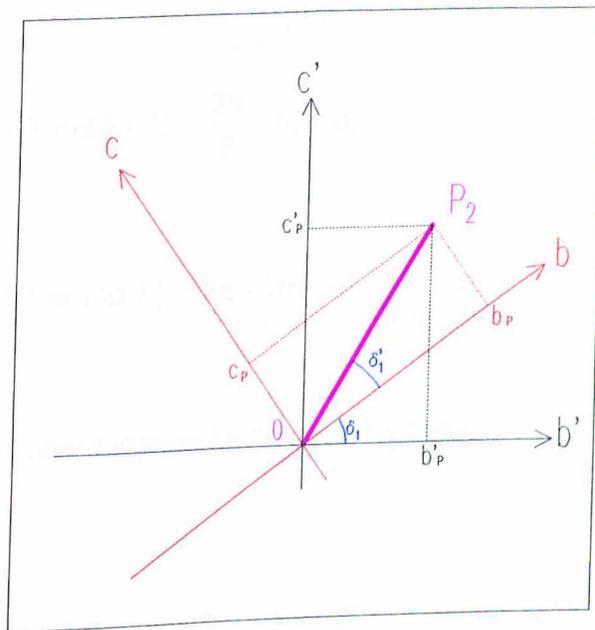


Figura 4.6 - Segunda rotação do sistema "xyz".

O ângulo δ'_1 entre o vetor " $\overline{OP_2}$ " e o eixo " b ", é identificado através do teste:

Se $b_p' = 0$ e $c_p' = 0$, então $\delta'_1 = -\delta_1$, ou,

se $b_p' > 0$ e $c_p' > 0$, então $\delta'_1 = \left| \arctan\left(\frac{c_p'}{b_p'}\right) \right| - \delta_1$, ou,

se $b_p' = 0$ e $c_p' > 0$, então $\delta'_1 = \frac{\pi}{2} - \delta_1$, ou,

se $b_p' < 0$ e $c_p' > 0$, então $\delta'_1 = \pi - \left| \arctan\left(\frac{c_p'}{b_p'}\right) \right| - \delta_1$, ou,

se $b_p' < 0$ e $c_p' = 0$, então $\delta'_1 = \pi - \delta_1$, ou,

se $b_p' < 0$ e $c_p' < 0$, então $\delta'_1 = \pi + \left| \arctan\left(\frac{c_p'}{b_p'}\right) \right| - \delta_1$, ou,

se $b_P' = 0$ e $c_P' < 0$, então $\delta_1' = \frac{3\pi}{2} - \delta_1$, ou,

$$\text{se } b_P' > 0 \text{ e } c_P' < 0, \text{ então } \delta_1' = 2\pi - \left| \arctan\left(\frac{c_P'}{b_P'}\right) \right| - \delta_1. \quad (4.09)$$

Assim, as novas coordenadas " a_P ", " b_P " e " c_P " são :

$$a_P = a_P' \quad (4.10)$$

$$b_P = P_2 \cdot \cos \delta_1' \quad (4.11)$$

$$c_P = P_2 \cdot \sin \delta_1' \quad (4.12)$$

onde P_2 é o módulo do vetor $\overline{OP_2}$.

4.3 - Filosofia do posicionamento

A primeira filosofia de posicionamento adotada, baseia-se na modelagem matemática apresentada no capítulo 2. Conhecidos os ângulos φ e θ do ponto "P" (figura 2.6), numa situação de equilíbrio do rotor, obtém-se das equações 2.66 e 2.69 as relações entre as correntes " i_a ", " i_b " e " i_c ", das bobinas do estator. Atribuindo-se um determinado valor para uma das correntes, obtém-se as outras. Um programa computacional implementa esta filosofia, e faz com que o computador acione o motor.

Esta filosofia, ao ser implantada experimentalmente, mostrou-se eficaz apenas em uma parte do espaço. Tal fato pode ser deduzido, analisando-se os resultados experimentais obtidos, e que se encontram no próximo capítulo.

As justificativas encontradas para o não posicionamento do rotor nas outras partes do espaço, se baseiam nas diferenças existentes entre os detalhes construtivos da concepção teórica e do quarto protótipo. Entre estas diferenças, o fato de se utilizar um magneto permanente de forma retangular, com dimensões longitudinais predominantes, faz com que o campo magnético apresente um alto

Motor esférico - Um tipo de posicionador

grau de concentração, contrariando bastante a concepção teórica que adota a forma distribuída. Desta forma, o magneto permanente procura se alinhar com o campo magnético resultante, produzido pelas bobinas do estator, na região central do motor. Através desta maneira de analisar o funcionamento do protótipo, pode-se chegar a um modelo matemático simplificado, do ponto de vista de campos magnéticos. Este modelo consiste em adotar um vetor densidade de campo magnético \vec{B} , no centro do rotor, resultante dos vetores densidade de campo magnético $\vec{B}_a, \vec{B}_b, \vec{B}_c$, produzido pelas correntes "i_a", "i_b" e "i_c", respectivamente. Para colocar o vetor \vec{B} numa certa direção espacial, seus componentes $\vec{B}_a, \vec{B}_b, \vec{B}_c$ são proporcionais às coordenadas de um ponto "Q" qualquer da reta definida pelo vetor \vec{B} , figura 4.7.

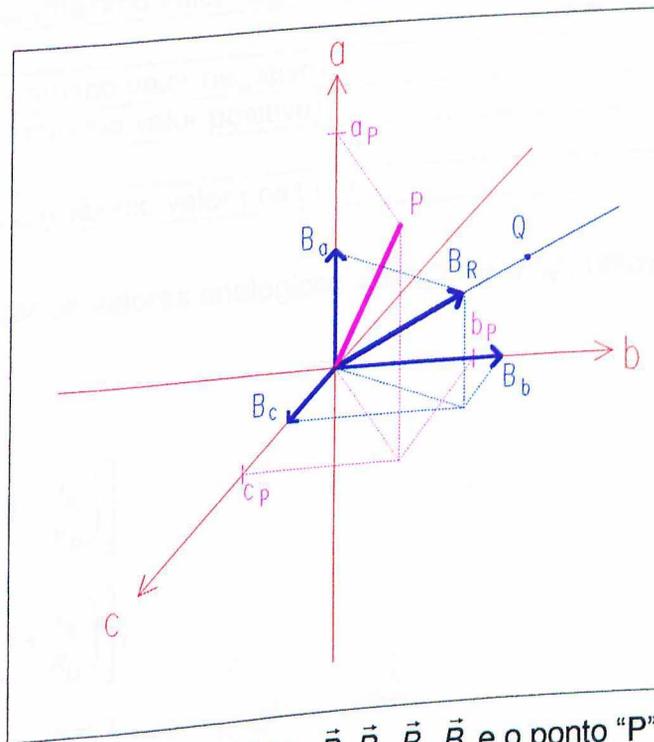


Figura 4.7 - Vetor $\vec{B}, \vec{B}_a, \vec{B}_b, \vec{B}_c$ e o ponto "P".

Como o modelo não considera a saturação magnética, conclui-se que as correntes "i_a", "i_b" e "i_c" se tornam proporcionais às coordenadas do ponto "Q".

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Na posição de equilíbrio o ponto "P" pertence à reta dada pelo segmento \overline{OQ} . Como o ponto "Q" pode ser qualquer um na reta, adota-se "Q" \equiv "P". Desta forma tem-se " i_a ", " i_b " e " i_c " proporcionais a " a_P ", " b_P " e " c_P ", respectivamente.

4.3.1 - Digitalização da informação

O processo de digitalização consiste em identificar os valores digitais de corrente a ser enviado a cada bobina do motor esférico. O conversor digital para analógico utilizado é do tipo simétrico de 8 bits e produz saídas de acordo com a tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Operação simétrica de um conversor digital para analógico.

Valor digital	Corrente analógica na bobina
0	$-I_{\max}$ (máximo valor negativo)
\vdots	\vdots
127	-0 (mínimo valor negativo)
128	+0 (mínimo valor positivo)
\vdots	\vdots
255	$+I_{\max}$ (máximo valor positivo)

Para digitalizar os valores analógicos de " i_a ", " i_b " e " i_c ", utilizam-se as expressões:

$$\bar{i}_a = \text{int} \left[D_0 \cdot \left(1 + \frac{i_a}{k_D} \right) \right], \quad (4.13)$$

$$\bar{i}_b = \text{int} \left[D_0 \cdot \left(1 + \frac{i_b}{k_D} \right) \right], \quad (4.14)$$

$$\bar{i}_c = \text{int} \left[D_0 \cdot \left(1 + \frac{i_c}{k_D} \right) \right]. \quad (4.15)$$

onde :

k_D constante de adequação dos valores analógicos para a faixa de -1 a +1
 D_0 é o valor decimal que representa o zero num conversor digital para analógico simétrico. De acordo com a tabela 4.1; $D_0 = 127$ ou 128 .

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Para a primeira filosofia de posicionamento, " i_a ", " i_b " e " i_c " das expressões 4.13, 4.14 e 4.15 são os valores das próprias correntes, enquanto que na segunda filosofia, são os valores " a_P ", " b_P " e " c_P ".

4.4 - Montagem eletrônica

O computador é ligado ao motor através de um circuito eletrônico. Este é formado por vários blocos que executam a função de processar os dados do computador, convertendo-os de digital para analógico, amplificando-os e enviando-os ao motor. Na figura 4.8, pode-se ver o diagrama de blocos do sistema eletrônico de acionamento, destacando, a porta paralela que é por onde chegam os dados provenientes do computador, conversor digital para analógico, memória analógica que mantém o valor de tensão a ser aplicado em cada bobina, e amplificador de potência que fornece corrente contínua estabilizada. No lado do sensor, pode-se identificar o sensor óptico que converte os pulsos de luz em sinal elétrico analógico, o circuito do mouse que converte o sinal analógico em digital e envia para o computador, e a porta serial que é por onde as informações de posição são fornecidas ao computador.

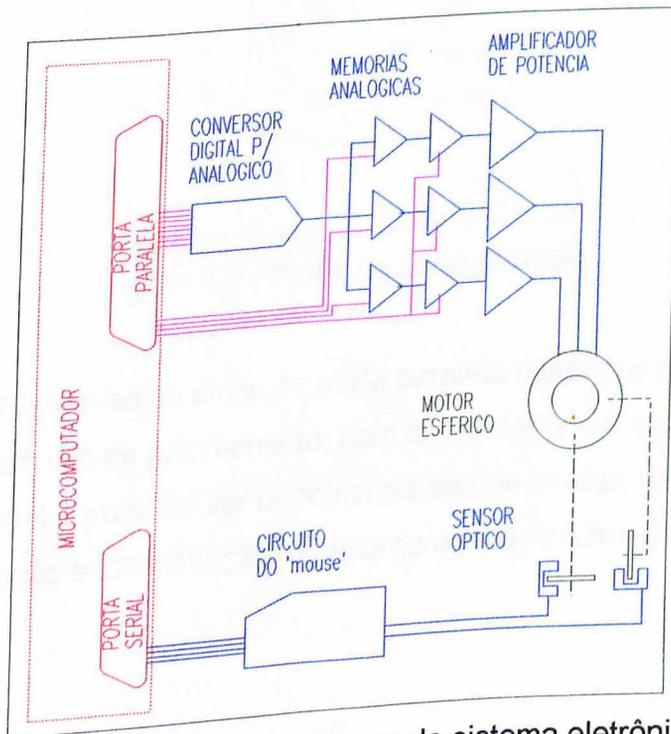


Figura 4.8 - Diagrama de blocos do sistema eletrônico.

4.4.1 - Porta paralela

A porta paralela ou de impressora do computador, é utilizada pois é de fácil conexão, fornece todos os sinais de dados e controle necessários, e permite ainda a portabilidade do circuito eletrônico de acionamento, ou seja, pode-se conectar o circuito eletrônico de acionamento em qualquer porta paralela de qualquer computador. Na figura 4.9, pode-se ver a disposição geral dos pinos de saída de uma porta paralela padrão.

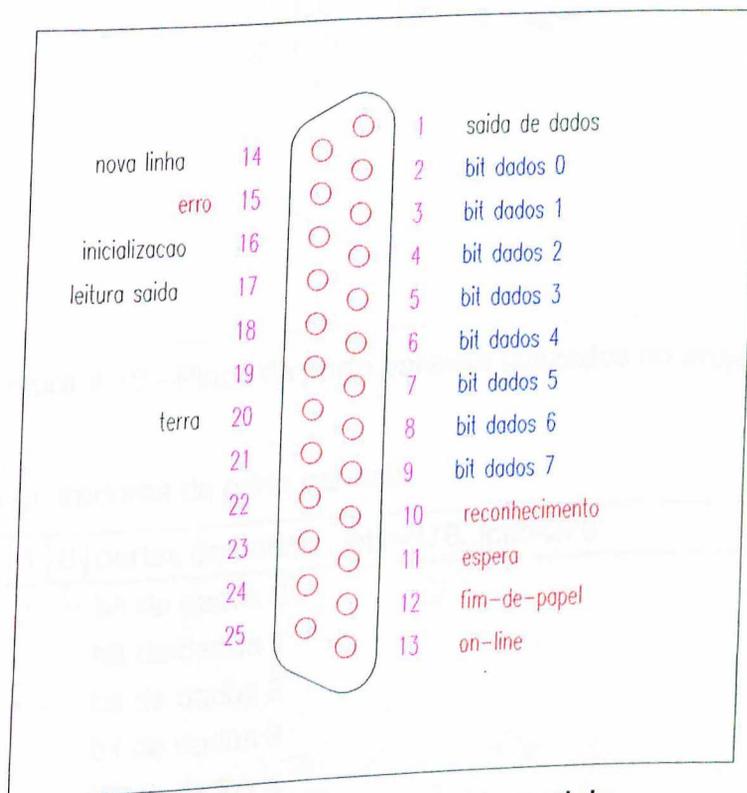


Figura 4.9 - Pinos da porta paralela

Na figura 4.10, tem-se os pinos da porta paralela utilizados para a conexão com o circuito eletrônico de acionamento, com identificação de cada terminal utilizado. Na tabela 4.2 pode-se ver os registradores de acesso das portas paralelas com sua interpretação e identificação, de acordo com o circuito eletrônico de acionamento.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

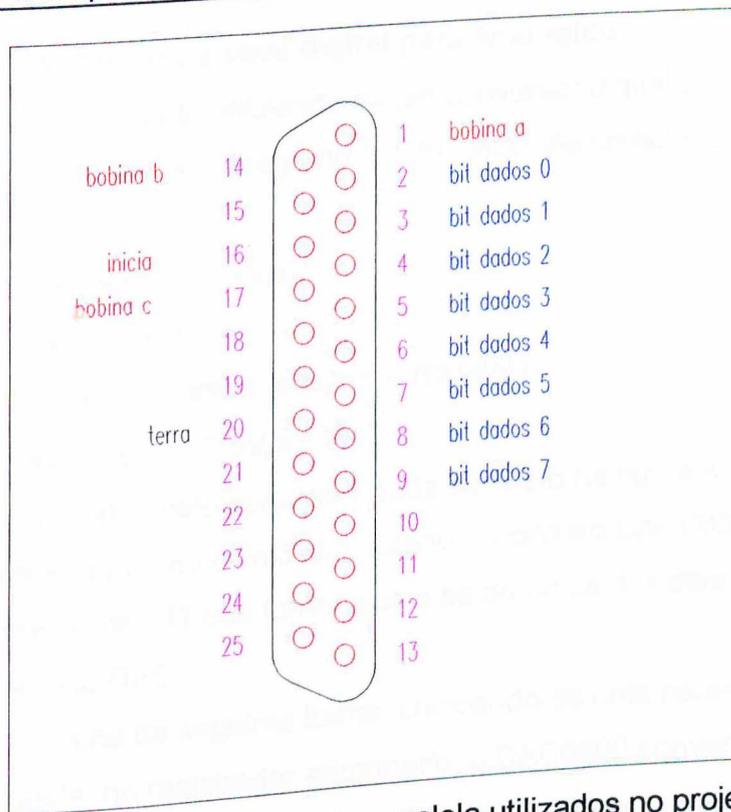
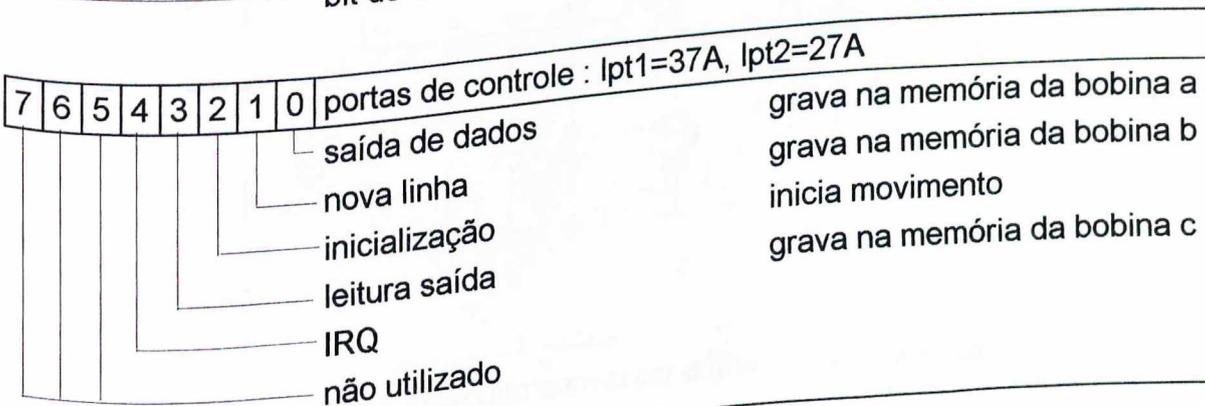
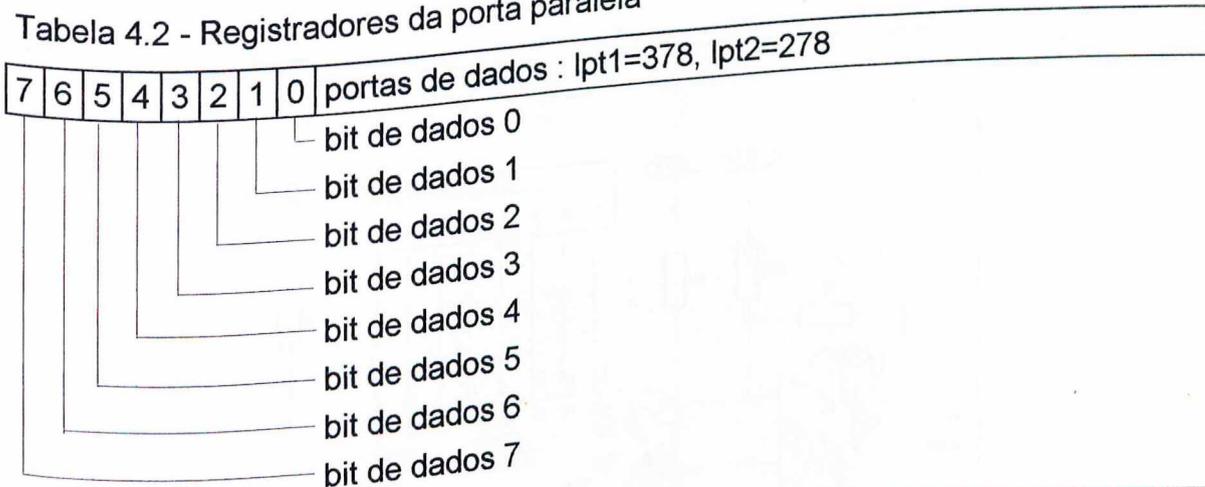


Figura 4.10 - Pinos da porta paralela utilizados no projeto.

Tabela 4.2 - Registradores da porta paralela



4.4.2 - Circuito conversor de sinal digital para analógico

Este circuito é projetado utilizando-se um conversor digital para analógico existente em um único circuito integrado, o DAC0800. As características deste componente são:

- tempo de conversão = 100ns
- interface direta com TTL
- opera nos dois quadrantes: positivo e negativo
- faixa de operação de $\pm 2,5V$ a $\pm 18V$

O circuito completo deste conversor pode ser visto na figura 4.11, onde se destaca o acoplamento direto com o computador, o circuito DAC0800, e o amplificador operacional 741 que fornece uma saída única dos dois sinais (positivo e negativo) do circuito DAC.

O circuito funciona da seguinte forma: colocando-se uma palavra digital de 8 bits na porta paralela, no registrador apropriado, o DAC0800 converterá esta palavra em duas fontes de corrente " I_{out} " e " $\overline{I_{out}}$ ". O amplificador operacional 741 converte estes dois valores de corrente em um valor de tensão com alta impedância de saída.

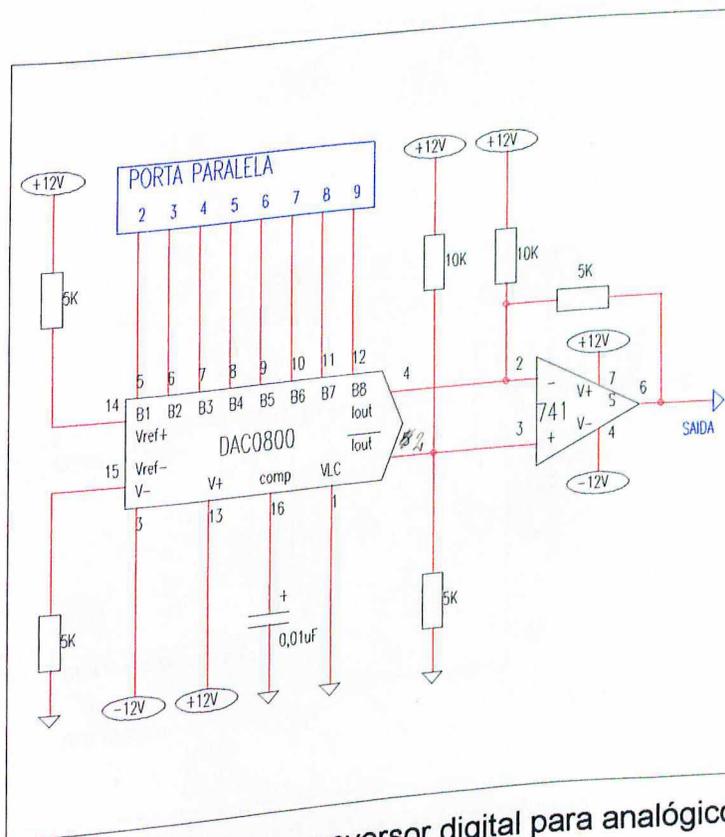


Figura 4.11 - Circuito conversor digital para analógico.

4.4.3 - Memória analógica

Um circuito de memória analógica é implementado para reter o valor de tensão de cada bobina de saída. Este circuito é montado utilizando-se o circuito integrado LF398 que é um componente para amostragem e retenção ("sample and hold"). As características deste componente são:

- opera entre $\pm 5V$ e $\pm 18V$
- tempo de aquisição menor que $15\mu s$.
- necessita de apenas um capacitor externo

O circuito completo desta memória pode ser visto na figura 4.12, onde a primeira etapa de memória é carregada individualmente pelo DAC. São montados três circuitos idênticos, sendo que todas as memórias secundárias são ativadas pelo mesmo sinal: "inicia movimento". Quando as três memórias primárias estiverem carregadas, o seu conteúdo é transferido simultaneamente para as memórias secundárias. Isto é feito para que o novo vetor de destino não sofra alterações intermediárias, como passagem por zero ou outros vetores, devido às mudanças individuais de corrente em " i_a ", " i_b " e " i_c ".

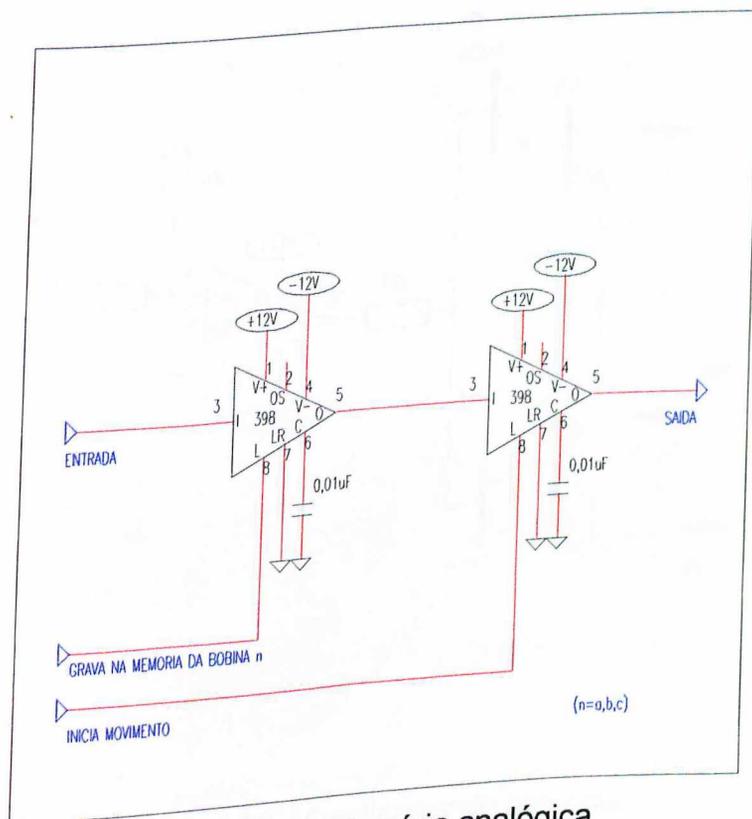


Figura 4.12 - Memória analógica.

4.4.4 - Amplificador de potência

O amplificador de potência para excitar as bobinas é montado de modo semelhante a um amplificador de áudio e com realimentação. Assim surge o circuito da figura 4.13, onde o sinal de tensão proveniente das memórias analógicas da figura 4.13, onde o sinal de tensão proveniente das memórias analógicas secundárias passa através do trimpot, que é utilizado para equalizar a corrente com os outros circuitos semelhantes a este, que alimentam as outras duas bobinas. O amplificador operacional 741 que está montado na configuração de amplificador somador, compara o sinal de entrada com o sinal de realimentação. Os transistores de saída fornecem a corrente necessária para a carga.

O circuito de potência de saída funciona da seguinte maneira: uma amostra da corrente de saída é retirada no resistor de 10Ω , comparada com o sinal de entrada, e enviada ao amplificador operacional 741 que ajusta a tensão de saída na mesma proporção da tensão de entrada. São montados três circuitos idênticos.

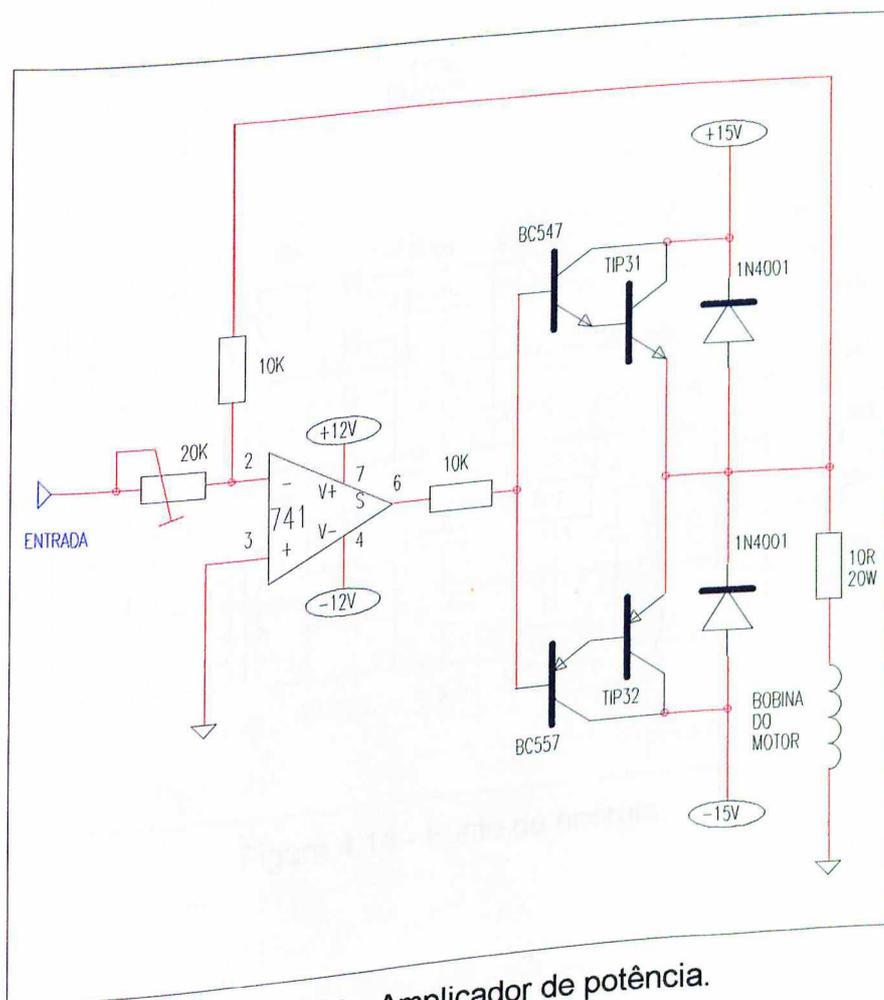


Figura 4.13 - Amplificador de potência.

4.4.5 - Fonte de energia

Para alimentar todos os circuitos anteriores tem-se uma fonte de energia de acordo com as exigências de cada um deles. Assim fica distribuído: $\pm 12V$ com 500 mA e $\pm 15V$ com 3A.

Devido a alta corrente e não necessidade de regulação, o circuito em 15 Volts possui apenas um banco de capacitores para filtragem do ruído de 60 Hertz.

Para os consumidores de 12 Volts, o circuito foi dividido em dois transformadores para evitar perdas de condução devido ao tipo de regulador utilizado.

Na figura 4.14 pode-se ver o diagrama completo da fonte de energia.

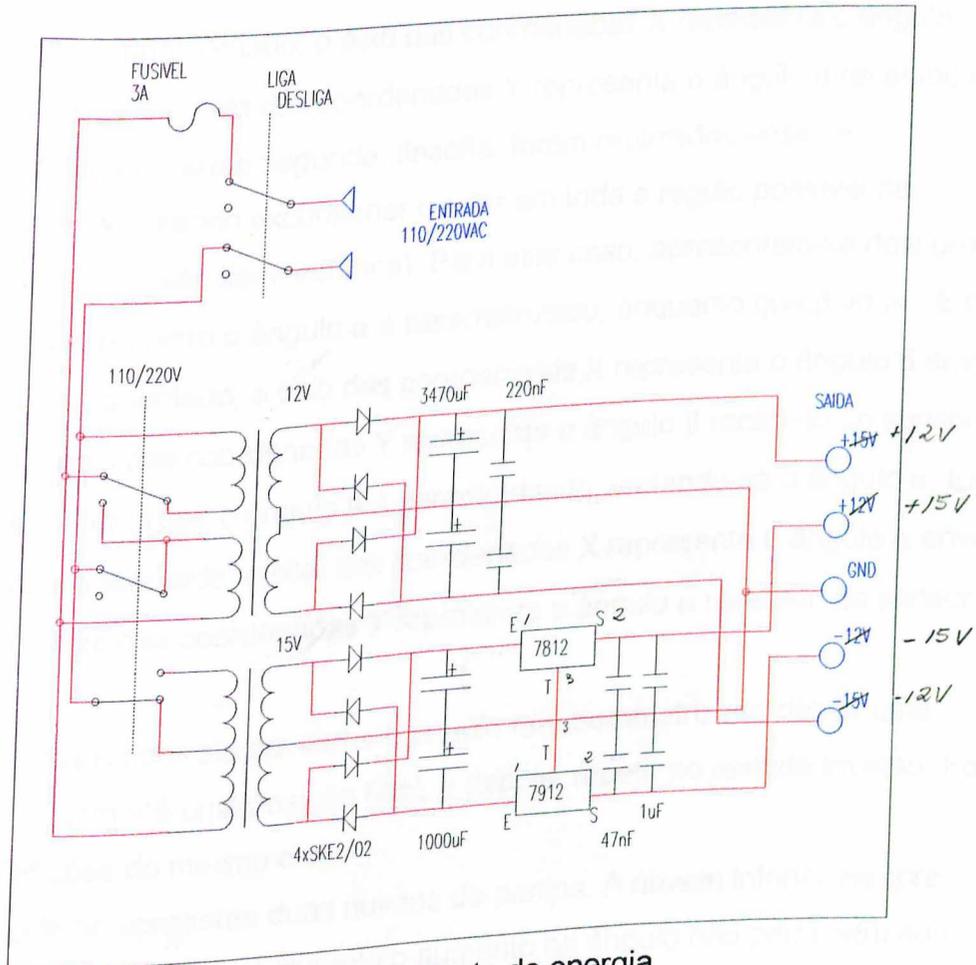


Figura 4.14 - Fonte de energia.

Capítulo 5 - Ensaios

5.1 - Objetivos e procedimentos

O objetivo desses ensaios é checar os valores dos ângulos α e β enviados ao motor através do computador e os mesmos valores angulares recebidos através do sensor de posição. Como é visto na figura 4.4, α é o ângulo entre a projeção do vetor P no plano xy e o eixo x, e β é o ângulo entre o vetor P e o plano xy.

Para ambas as filosofias de posicionamento, foram levantadas curvas parametrizadas em α , variando β , de tal forma a manter o ponto "P" do rotor na região correspondente às coordenadas " a_P ", " b_P " e " c_P " positivas. Para este caso, em cada gráfico apresentado, o eixo das coordenadas X representa o ângulo β enviado ao motor e o eixo das coordenadas Y representa o ângulo β recebido do sensor de posição. Para a segunda filosofia, foram realizados ensaios complementares, visando excursionar o rotor em toda a região possível de posicionamento (região semi-esférica). Para este caso, apresentam-se dois grupos de gráficos. No primeiro o ângulo α é parametrizado, enquanto que β varia. Em cada gráfico apresentado, o eixo das coordenadas X representa o ângulo β enviado ao motor e o eixo das coordenadas Y representa o ângulo β recebido do sensor de posição. No outro grupo o ângulo β é parametrizado, variando-se o ângulo α . Em cada gráfico apresentado, o eixo das coordenadas X representa o ângulo α enviado ao motor e o eixo das coordenadas Y representa o ângulo α recebido do sensor de posição.

Cada ensaio consiste em variar o ângulo não parametrizado desde uma posição de origem até uma posição final, e depois, repetir no sentido inverso. Foram feitas 5 repetições do mesmo ciclo.

Cada gráfico apresenta duas nuvens de pontos. A nuvem inferior sempre representa os valores obtidos durante o aumento no ângulo não parametrizado, sendo a outra o processo oposto.

Para estabelecer o intervalo de tempo entre uma posição de equilíbrio e a próxima, define-se o fator de velocidade. Este número representa o valor em milissegundos do referido intervalo de tempo.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

Para estabelecer o intervalo de tempo entre uma posição de equilíbrio e a próxima, define-se o fator de velocidade. Este número representa o valor em milissegundos do referido intervalo de tempo.

Em cada gráfico encontra-se uma reta, simétrica em relação aos eixos X e Y, que representa o funcionamento correto do motor, isto é, seus pontos representam valores do ângulo enviado ao motor iguais aos valores do respectivo ângulo medido.

Todas as medidas são realizadas com o motor em situação estática, ou seja, orientado segundo corrente contínua em cada bobina.

5.2 - Resultados obtidos

Os gráficos de 5.1 a 5.10 apresentam os resultados experimentais obtidos a partir da primeira filosofia de posicionamento.

Os gráficos de 5.11 a 5.51 apresentam os resultados experimentais obtidos a partir da segunda filosofia de posicionamento.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

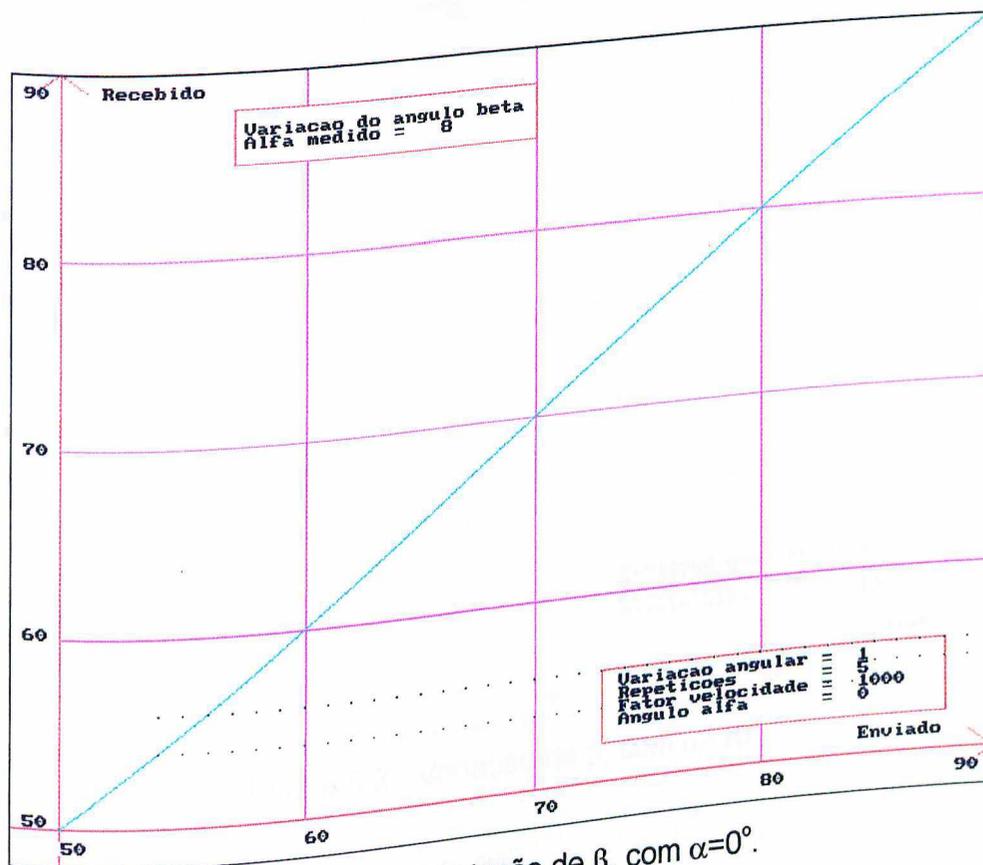


Figura 5.1 - Variação de β , com $\alpha=0^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

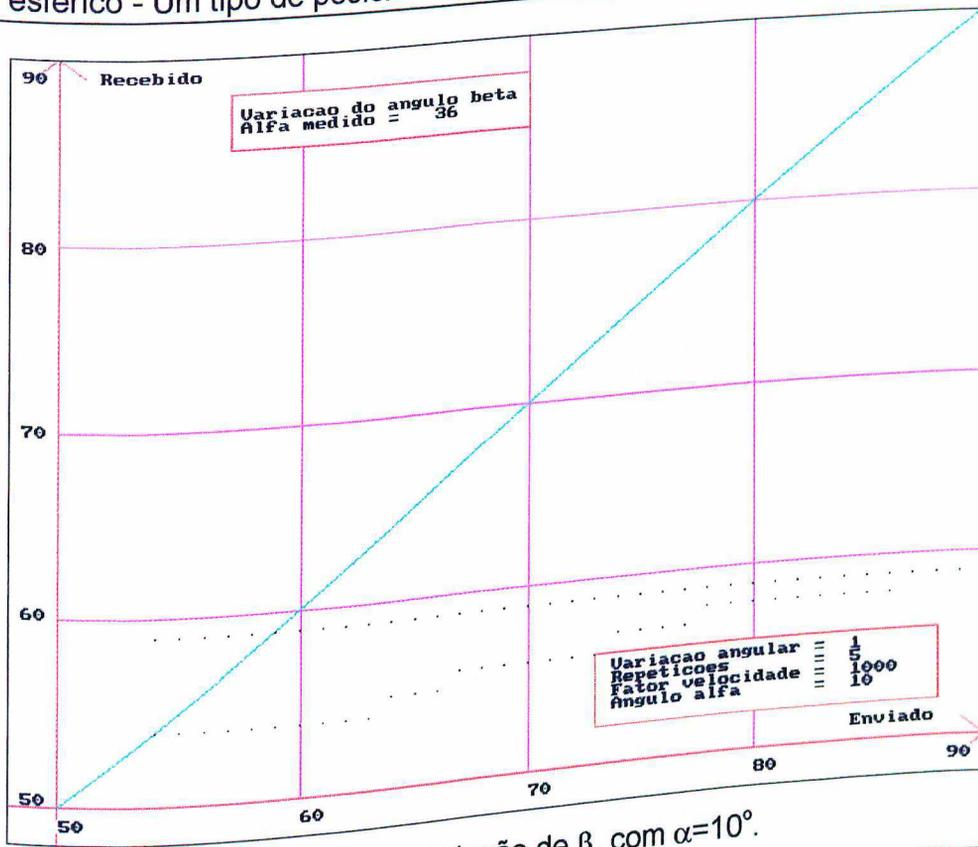


Figura 5.2 - Variação de β , com $\alpha=10^\circ$.

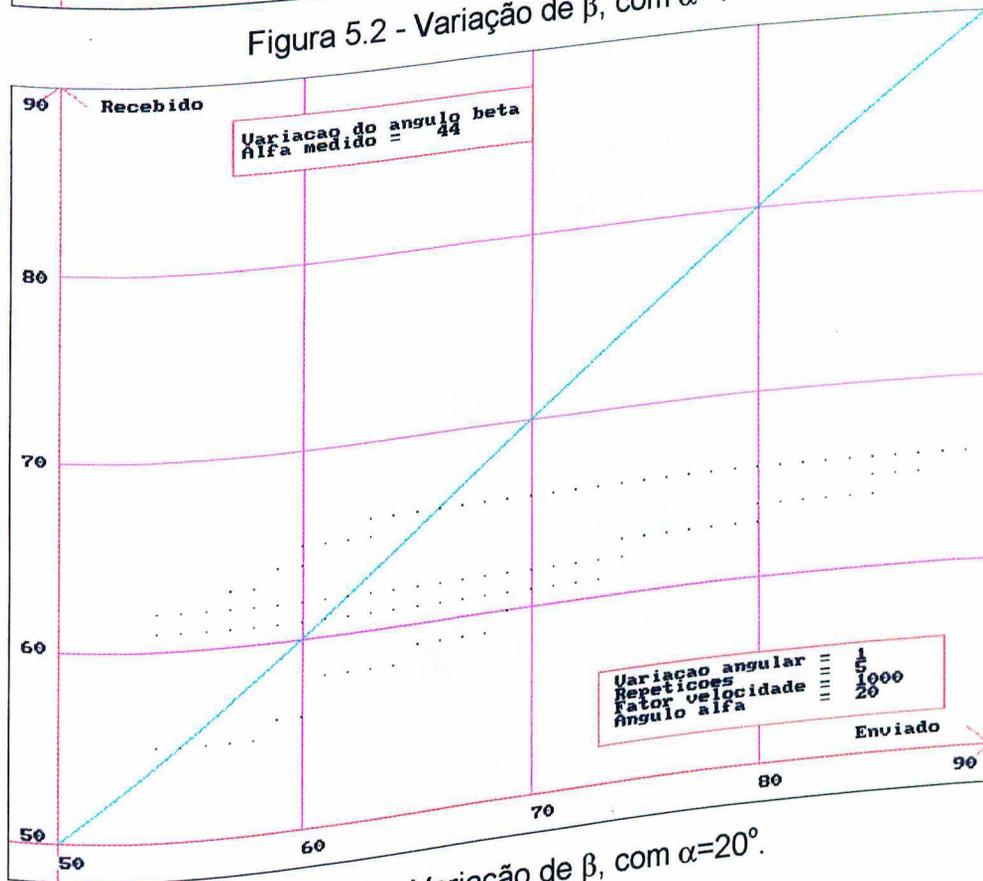


Figura 5.3 - Variação de β , com $\alpha=20^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

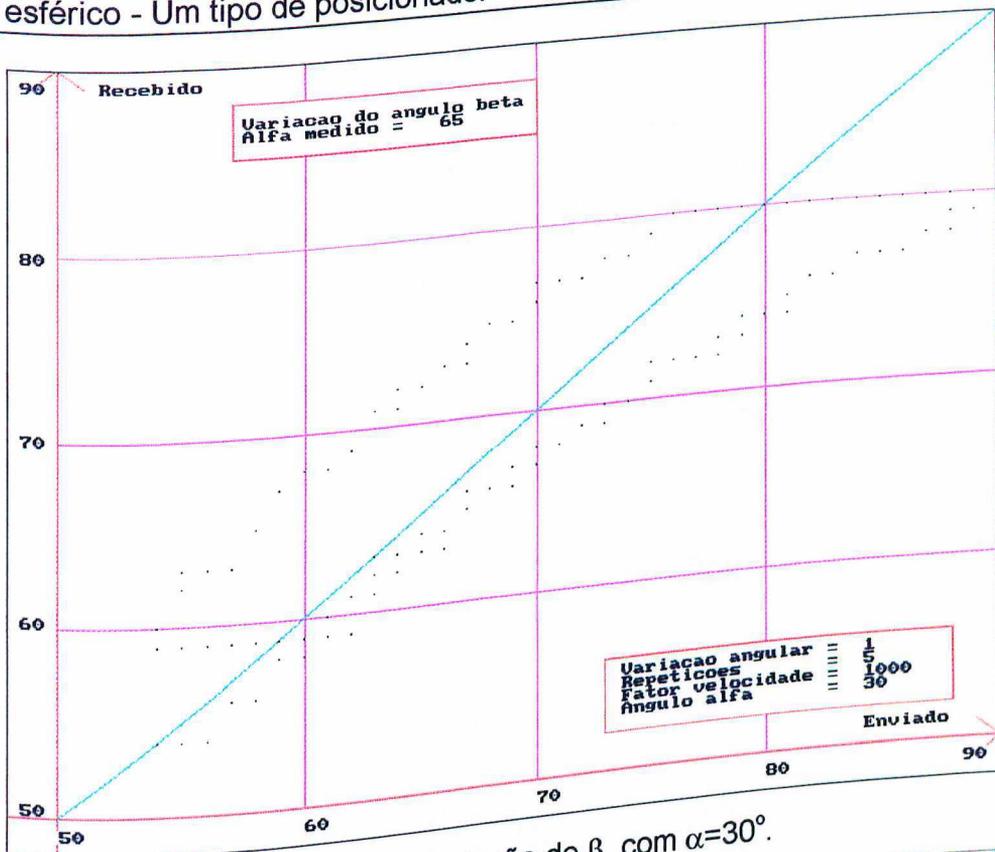


Figura 5.4 - Variação de β , com $\alpha=30^\circ$.

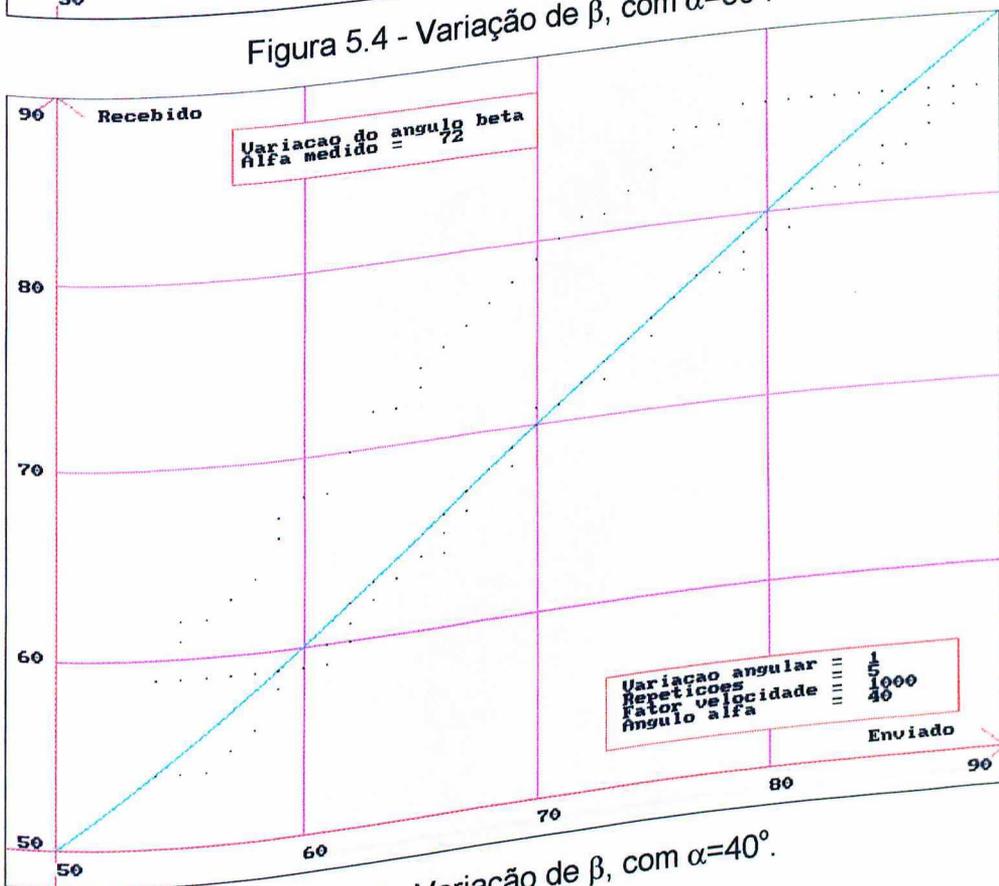
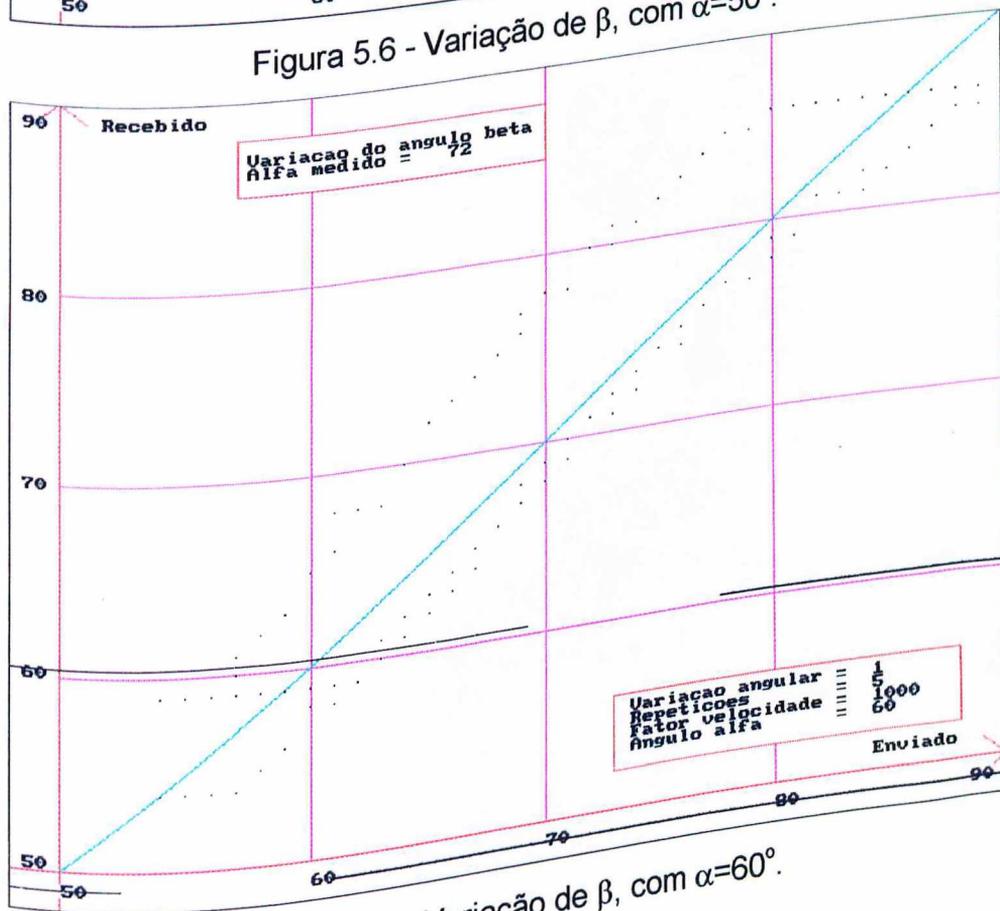
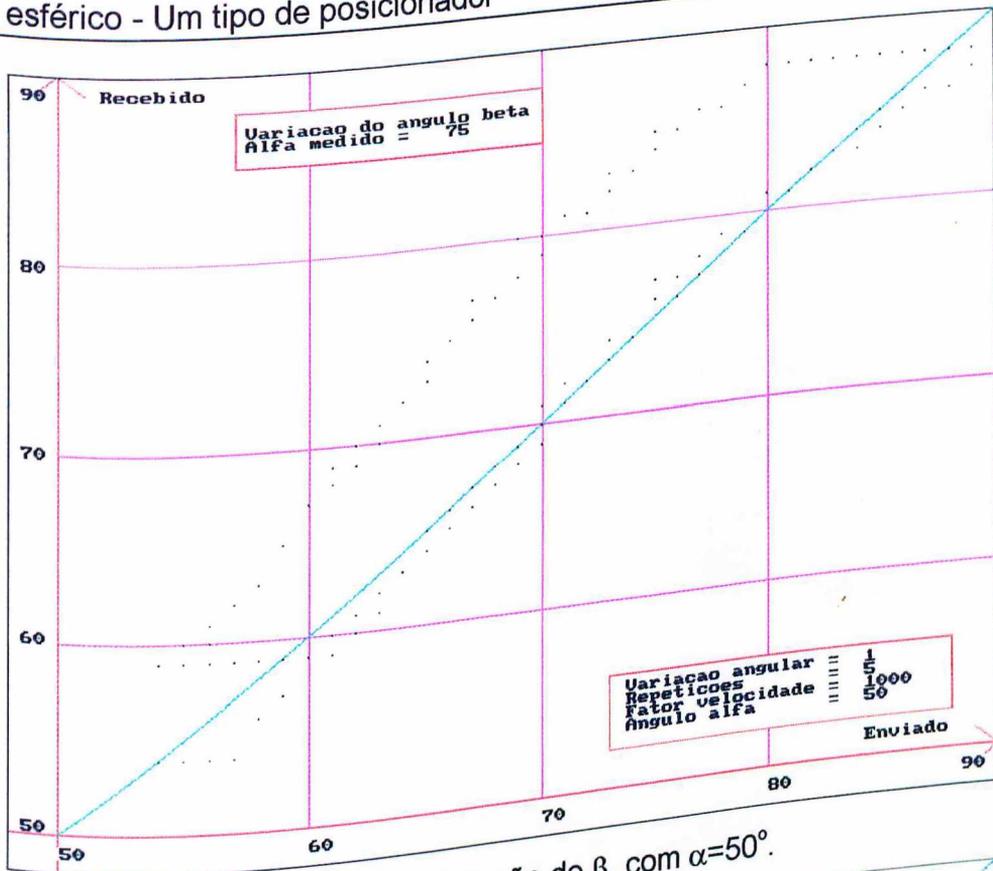


Figura 5.5 - Variação de β , com $\alpha=40^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIAS
BIBLIOTECA

Motor esférico - Um tipo de posicionador

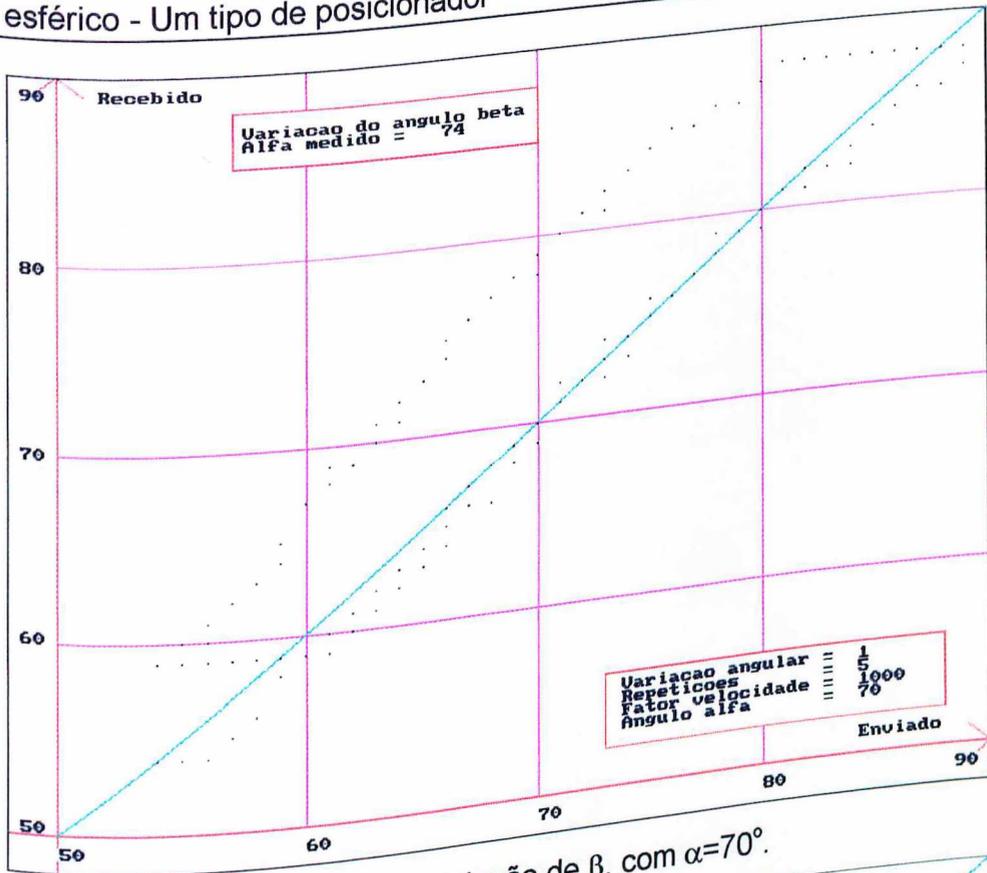


Figura 5.8 - Variação de β , com $\alpha=70^\circ$.

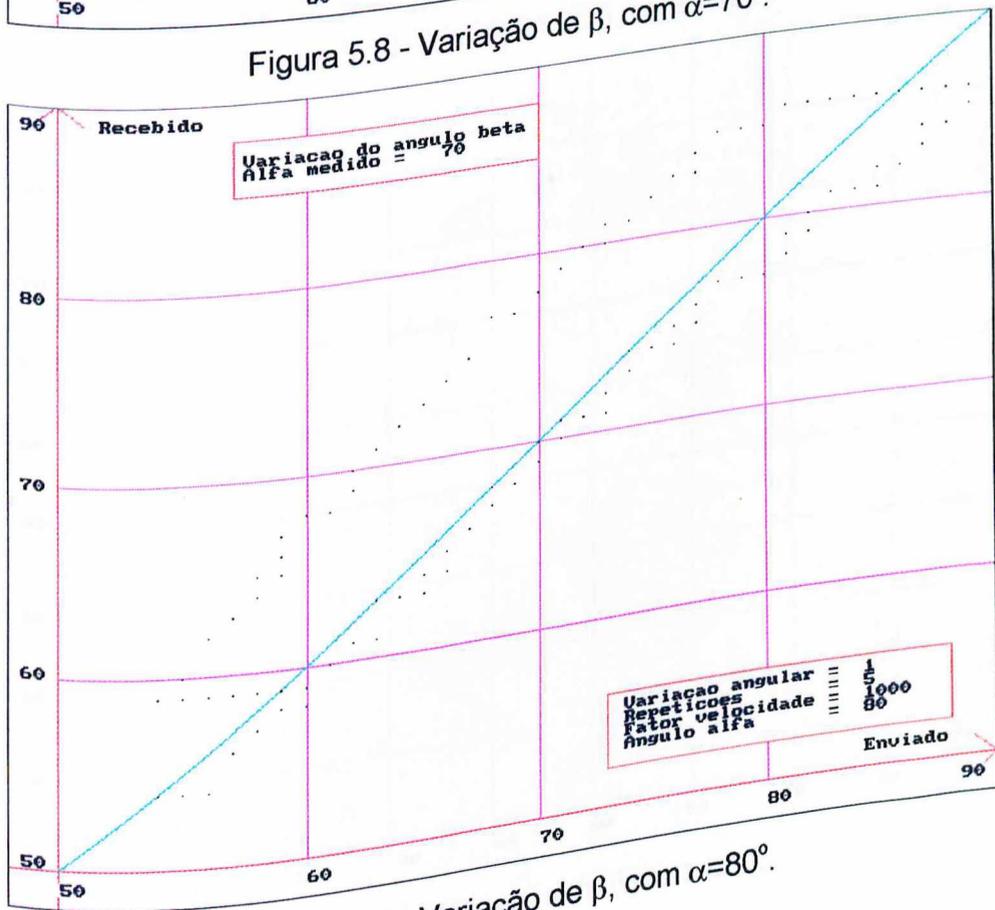


Figura 5.9 - Variação de β , com $\alpha=80^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

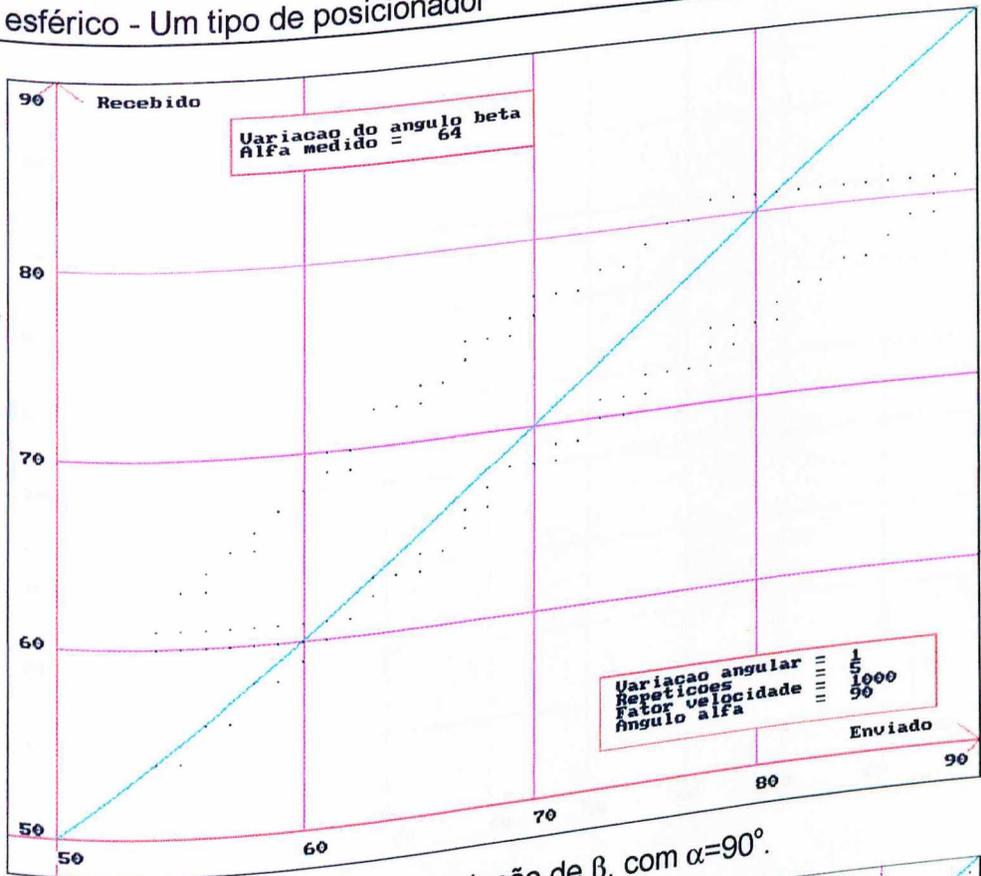


Figura 5.10 - Variação de β , com $\alpha=90^\circ$.

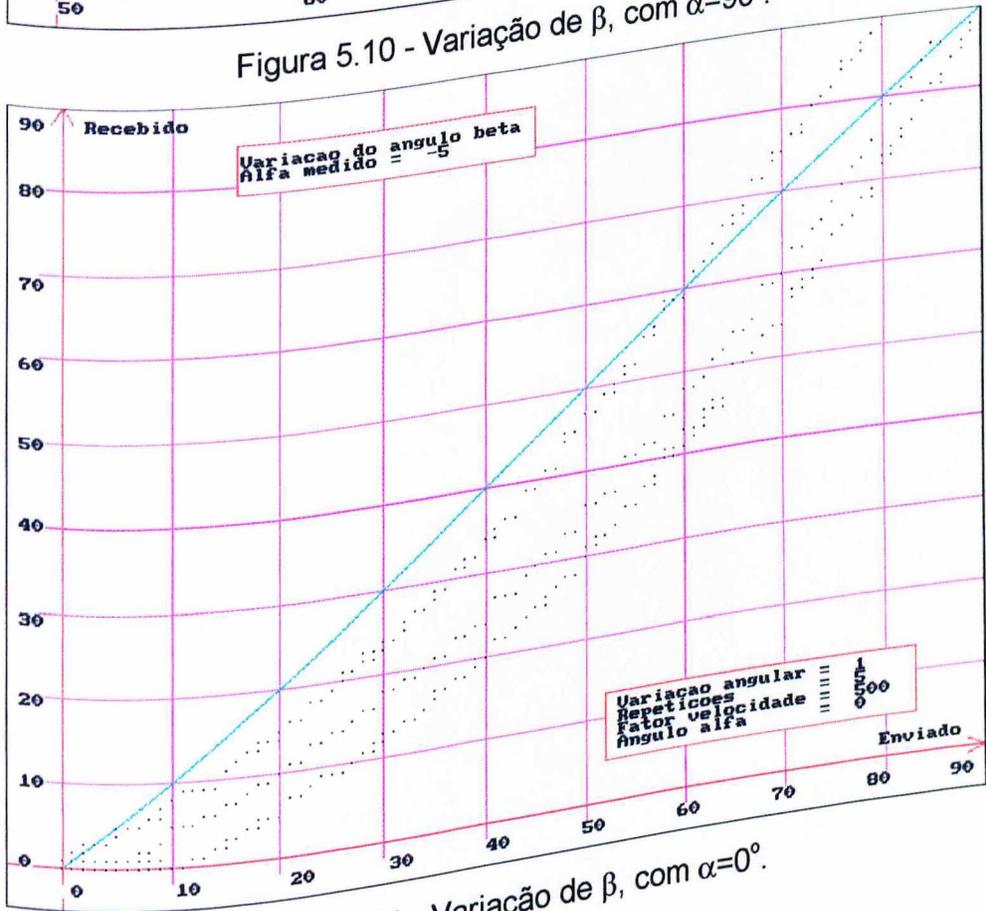


Figura 5.11 - Variação de β , com $\alpha=0^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

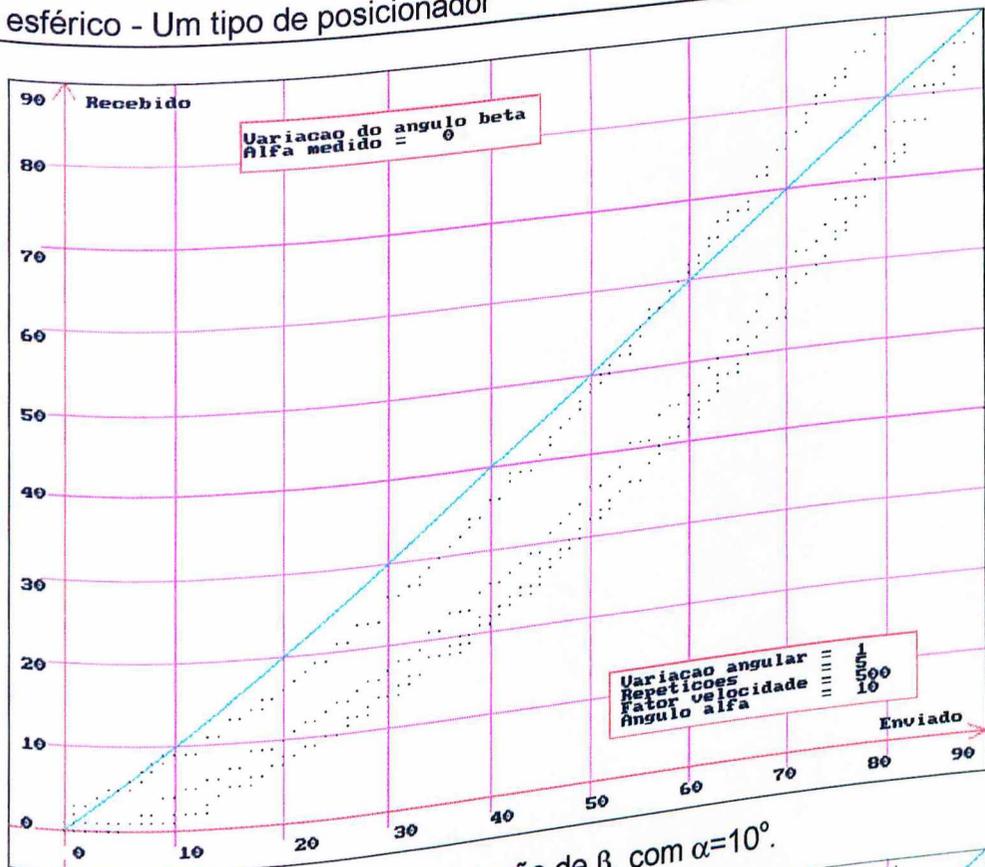


Figura 5.12 - Variação de β , com $\alpha=10^\circ$.

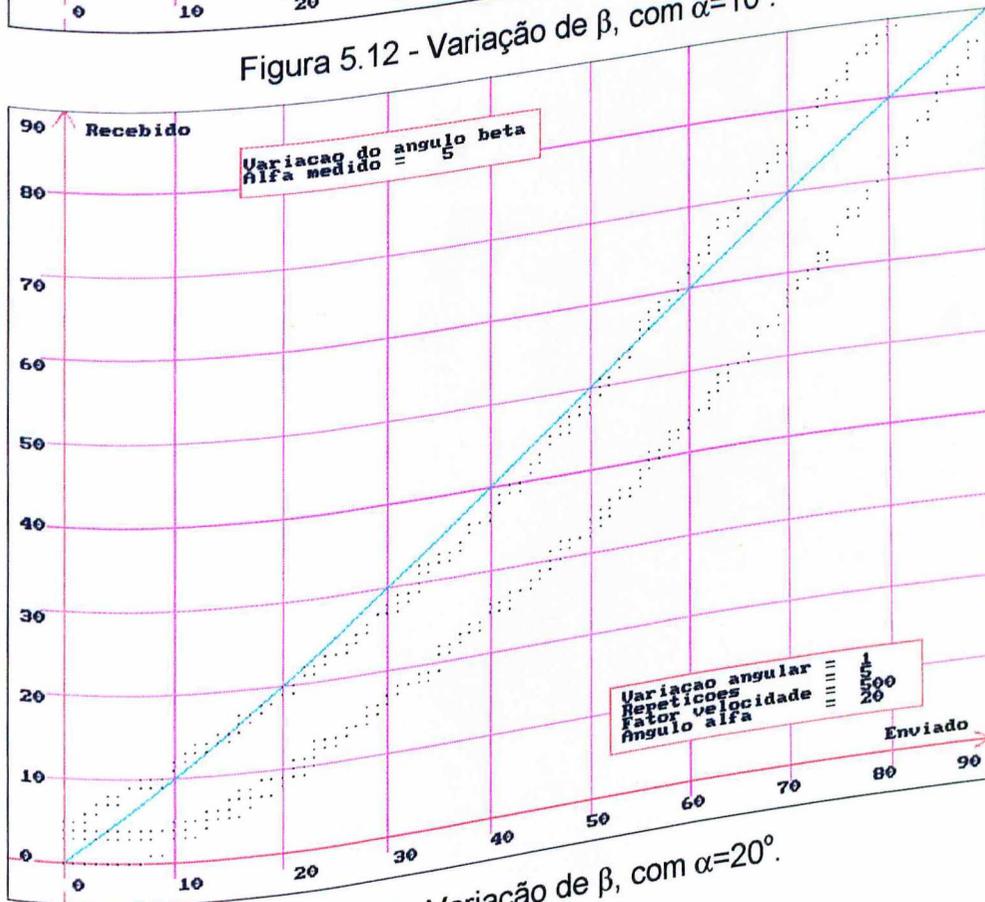


Figura 5.13 - Variação de β , com $\alpha=20^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

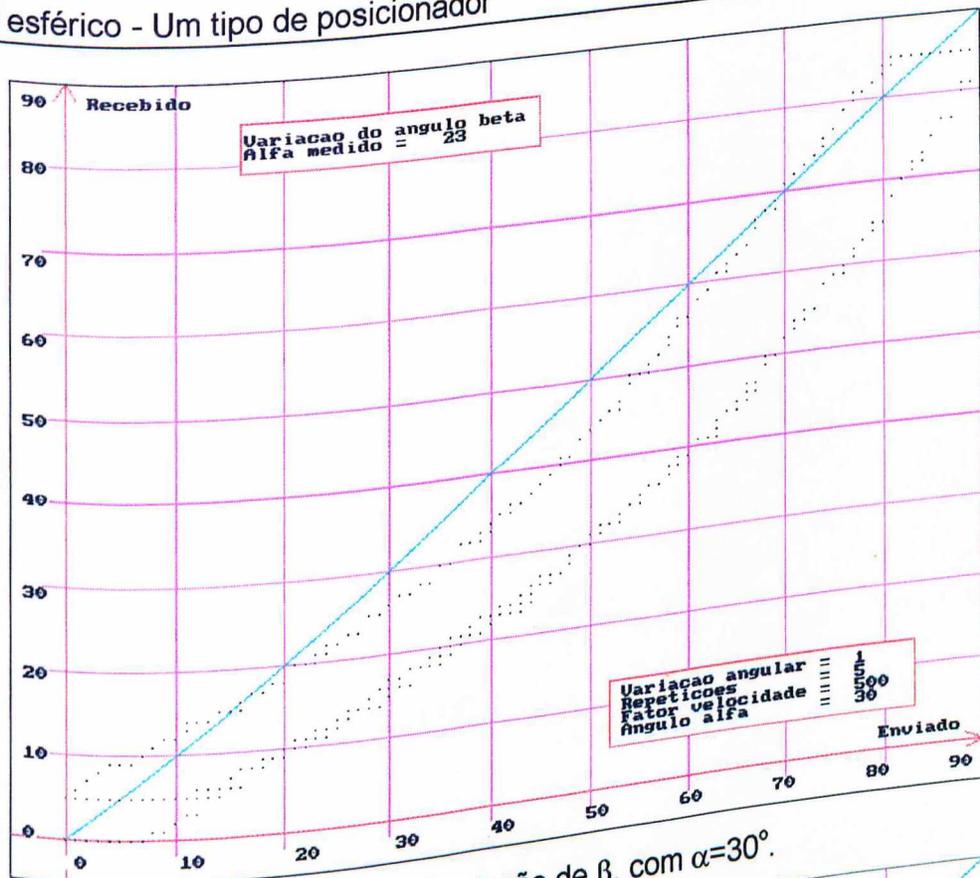


Figura 5.14 - Variação de β , com $\alpha=30^\circ$.

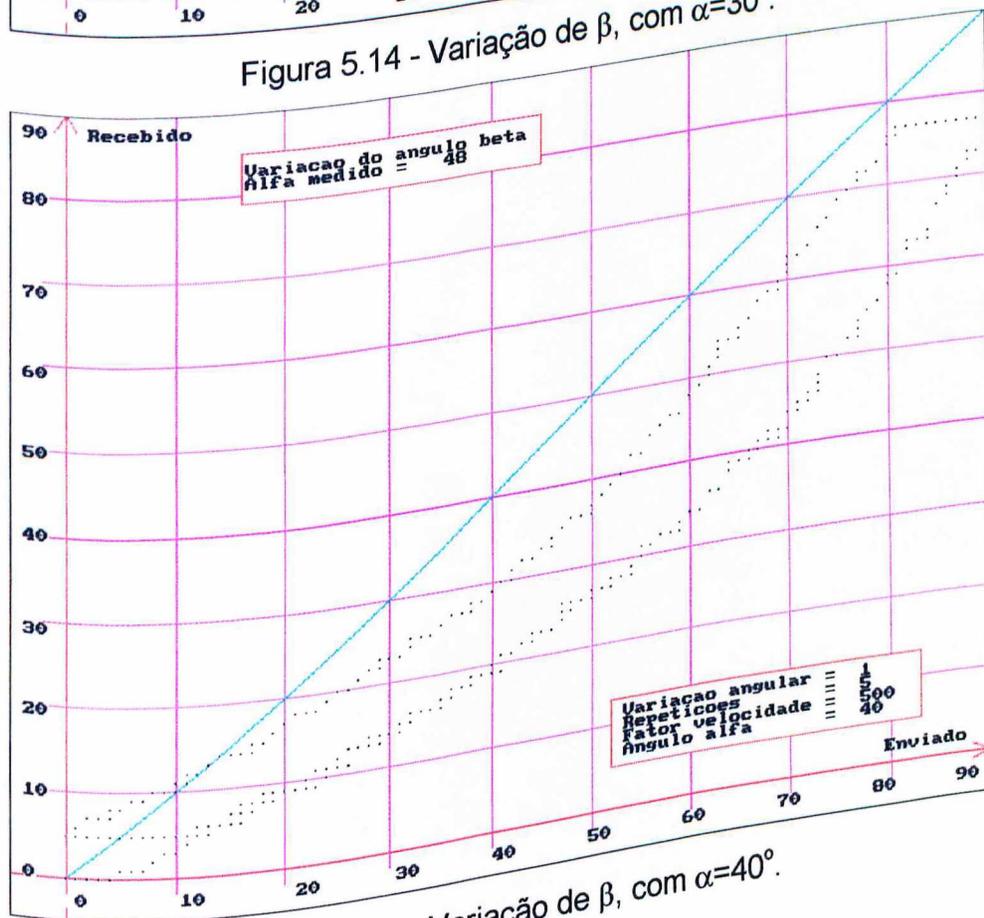


Figura 5.15 - Variação de β , com $\alpha=40^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

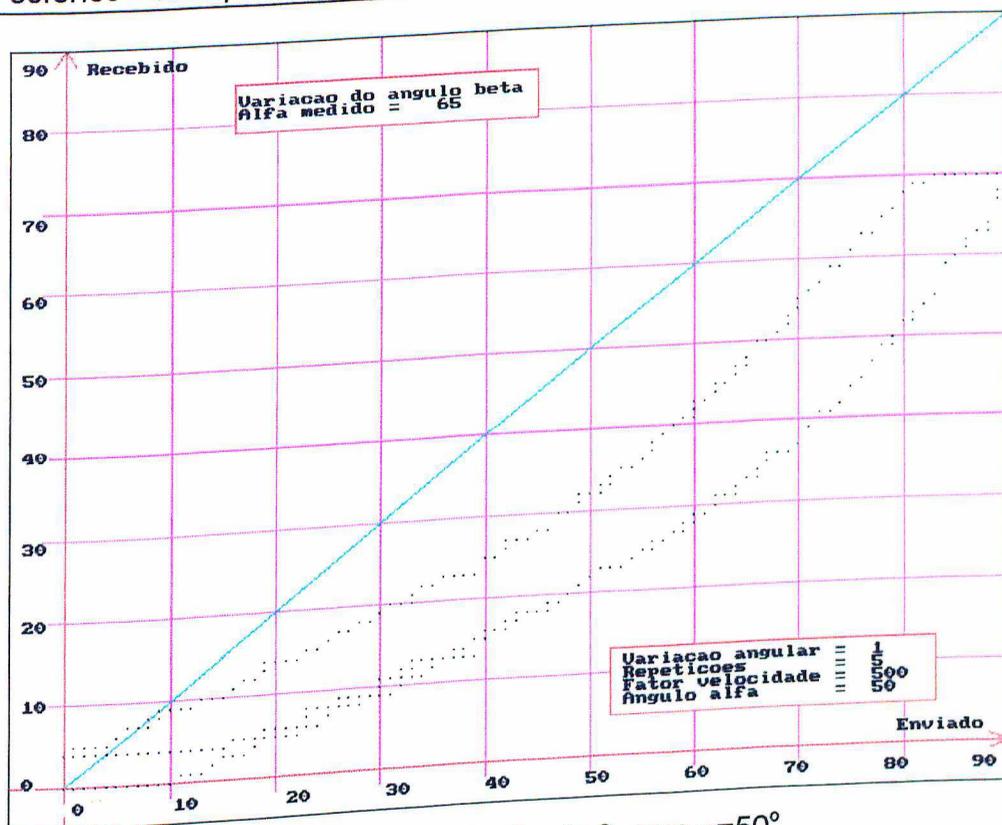


Figura 5.16 - Variação de β , com $\alpha=50^\circ$.

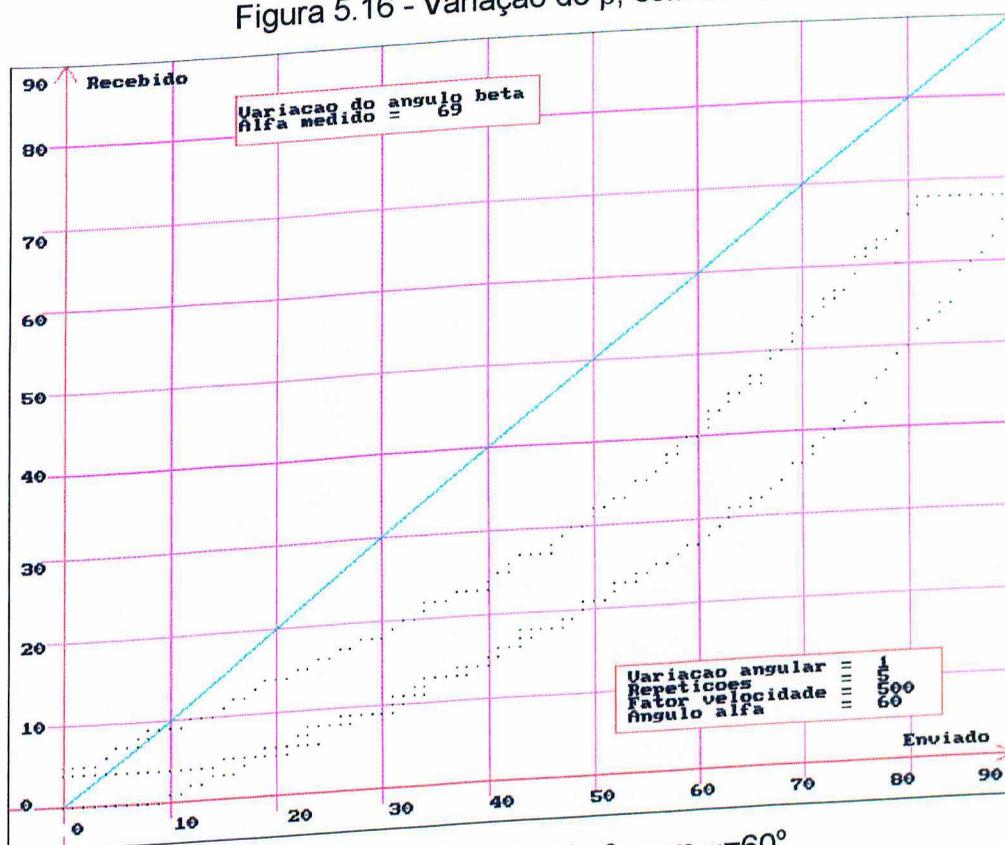


Figura 5.17 - Variação de β , com $\alpha=60^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

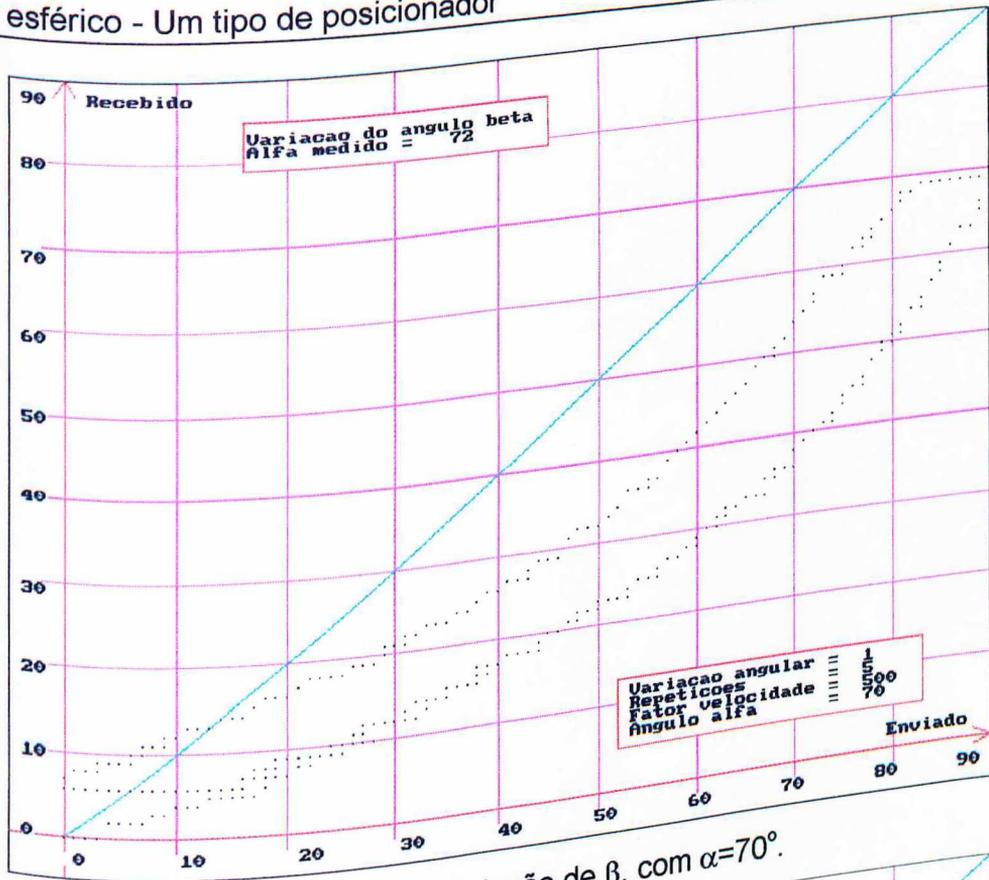


Figura 5.18 - Variação de β , com $\alpha=70^\circ$.

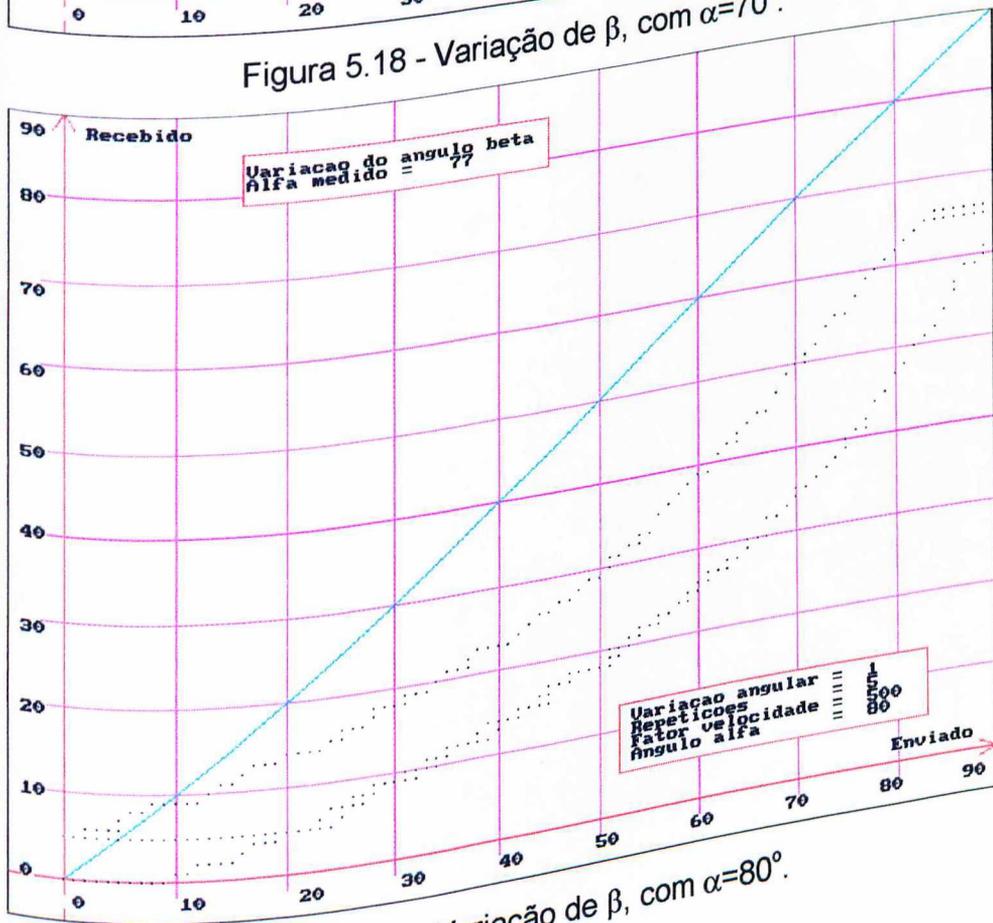


Figura 5.19 - Variação de β , com $\alpha=80^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

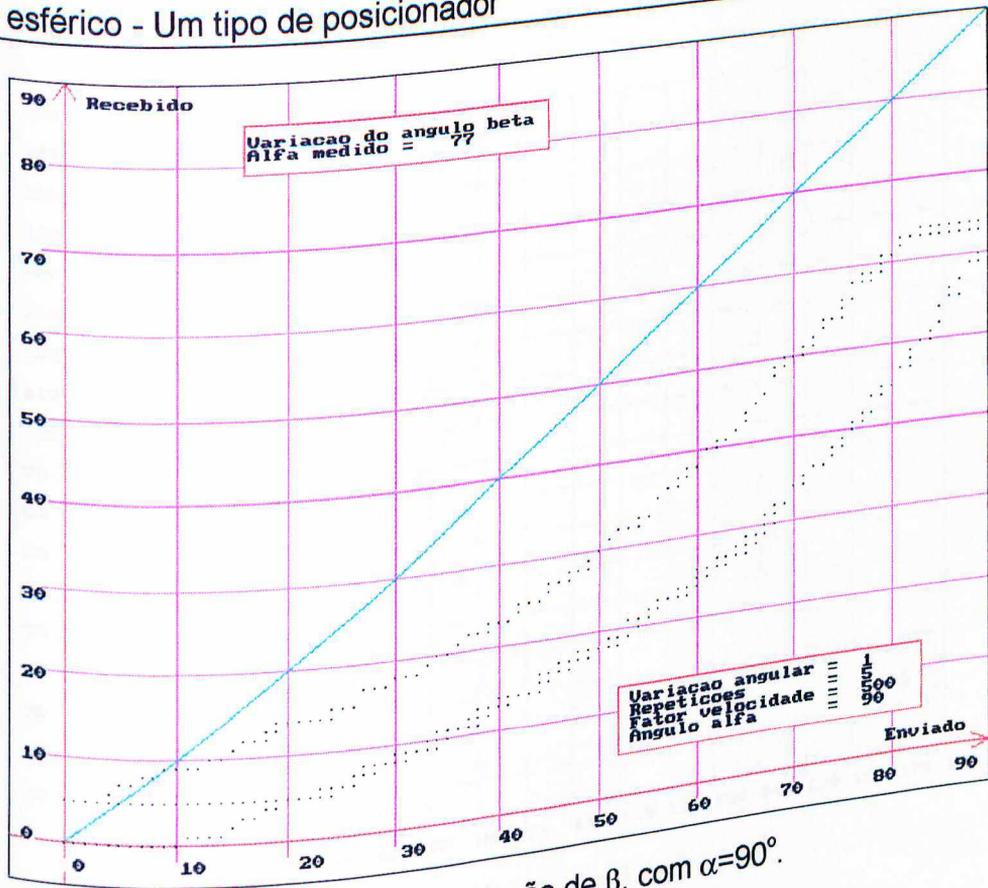


Figura 5.20 - Variação de β , com $\alpha=90^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

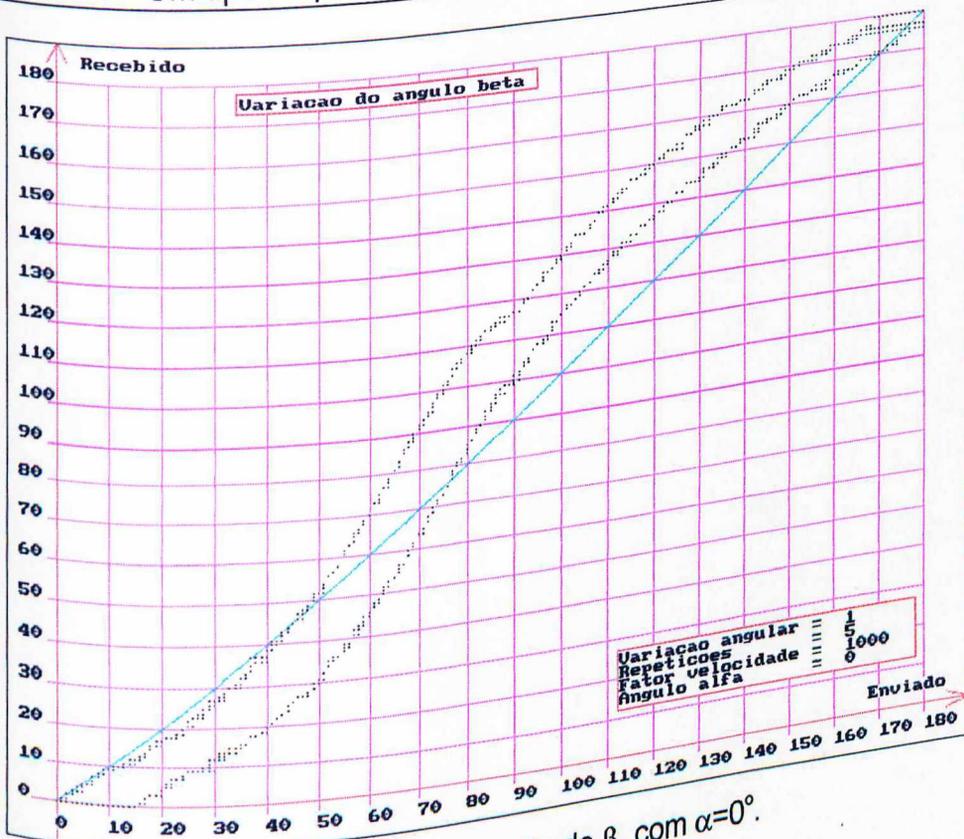


Figura 5.21 - Variação de β , com $\alpha=0^\circ$.

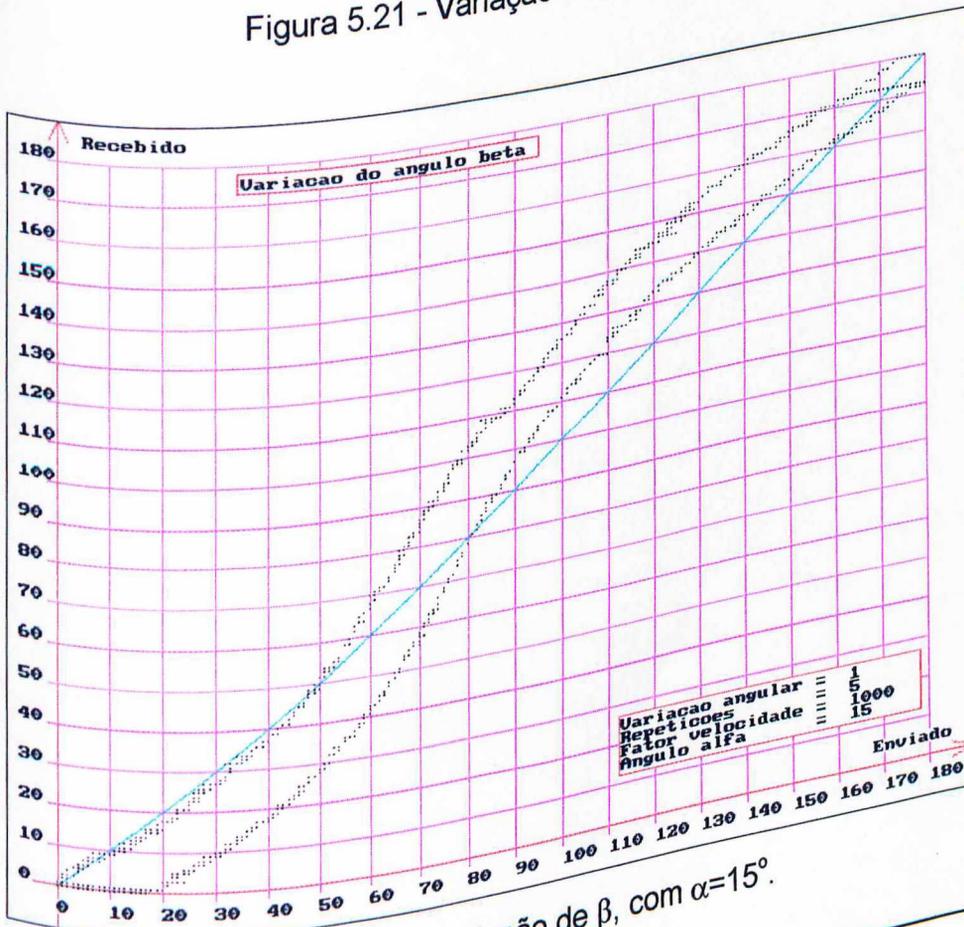


Figura 5.22 - Variação de β , com $\alpha=15^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

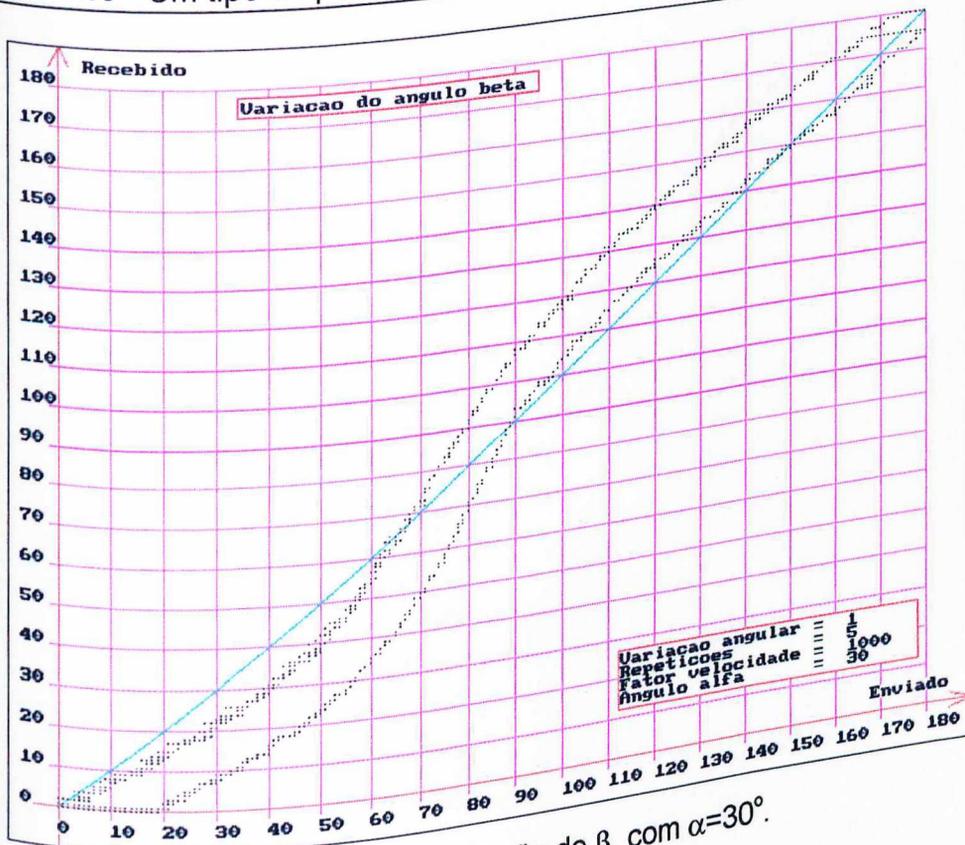


Figura 5.23 - Variação de β , com $\alpha=30^\circ$.

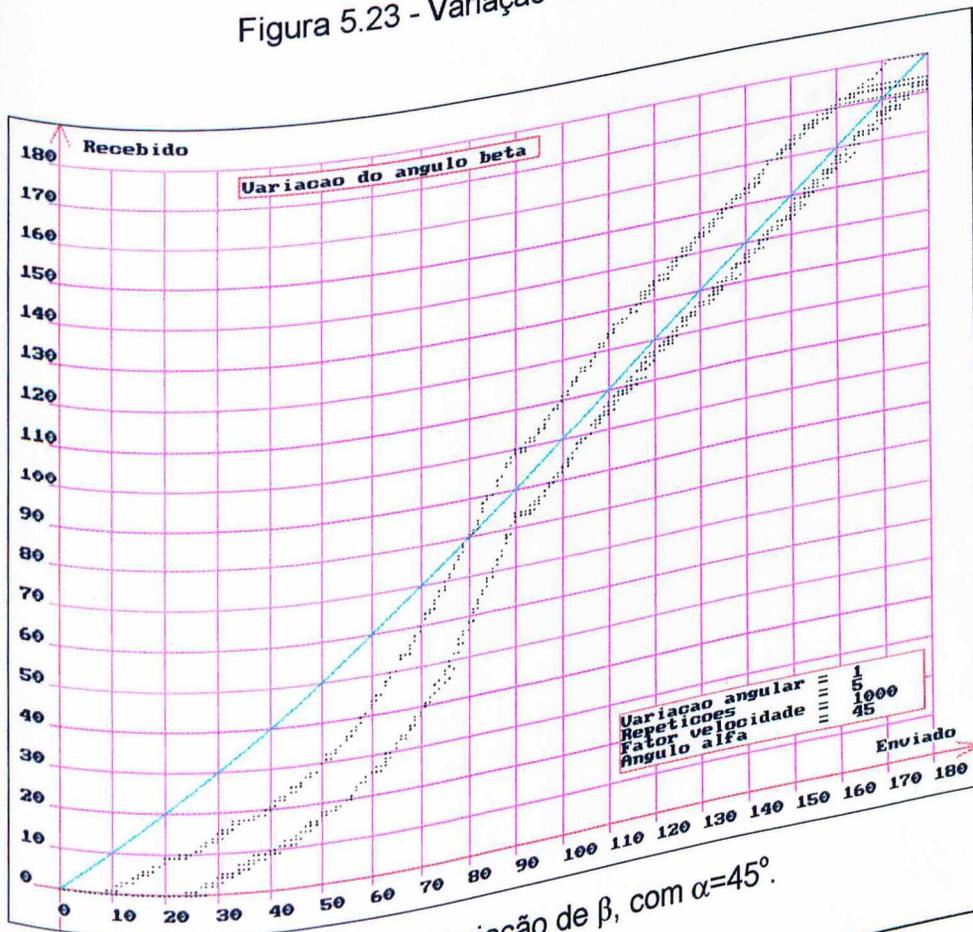


Figura 5.24 - Variação de β , com $\alpha=45^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

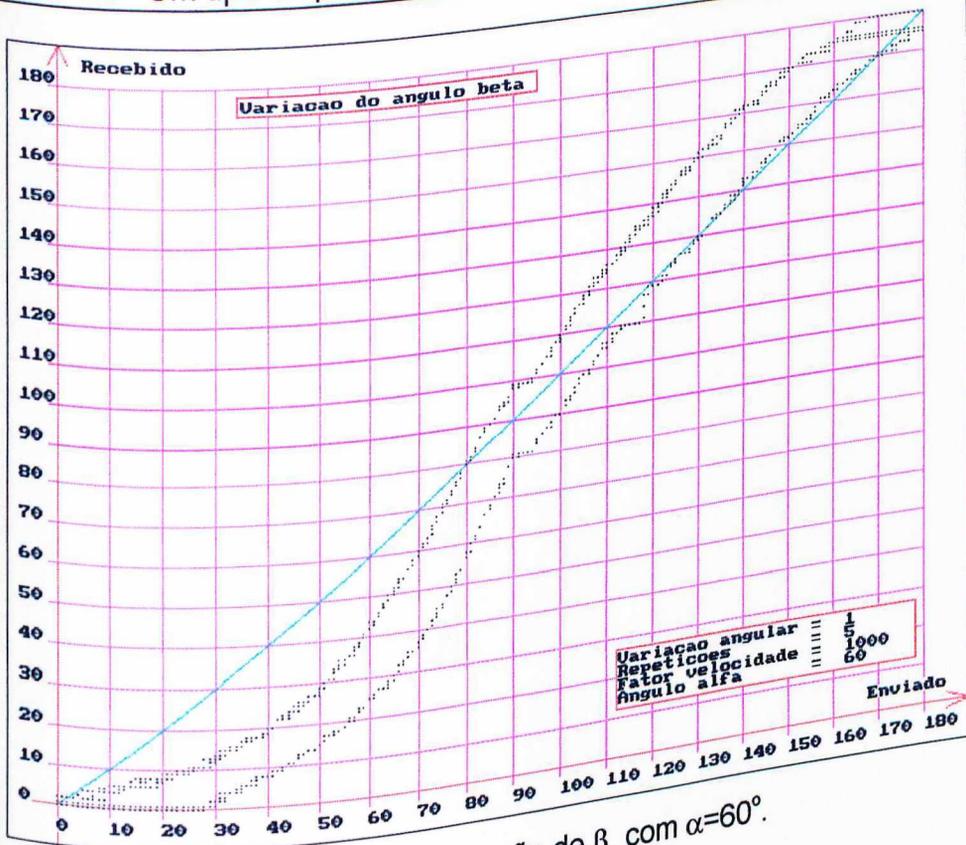


Figura 5.25 - Variação de β , com $\alpha=60^\circ$.

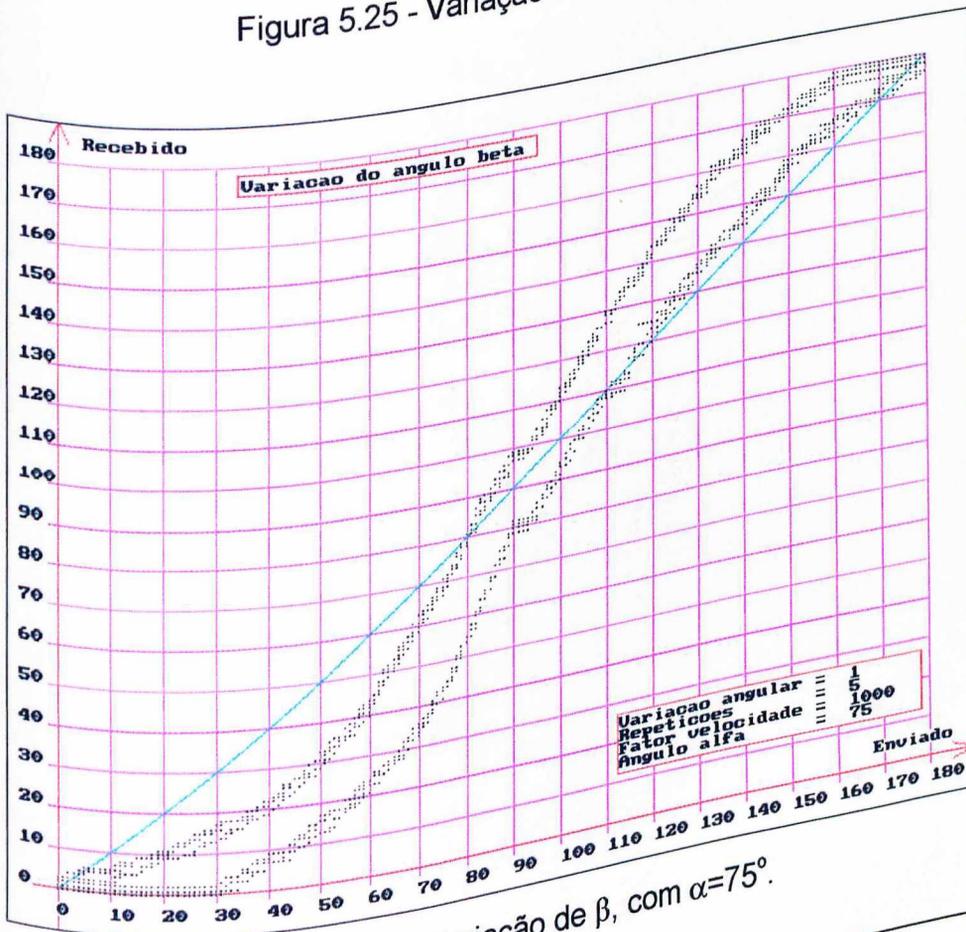


Figura 5.26 - Variação de β , com $\alpha=75^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

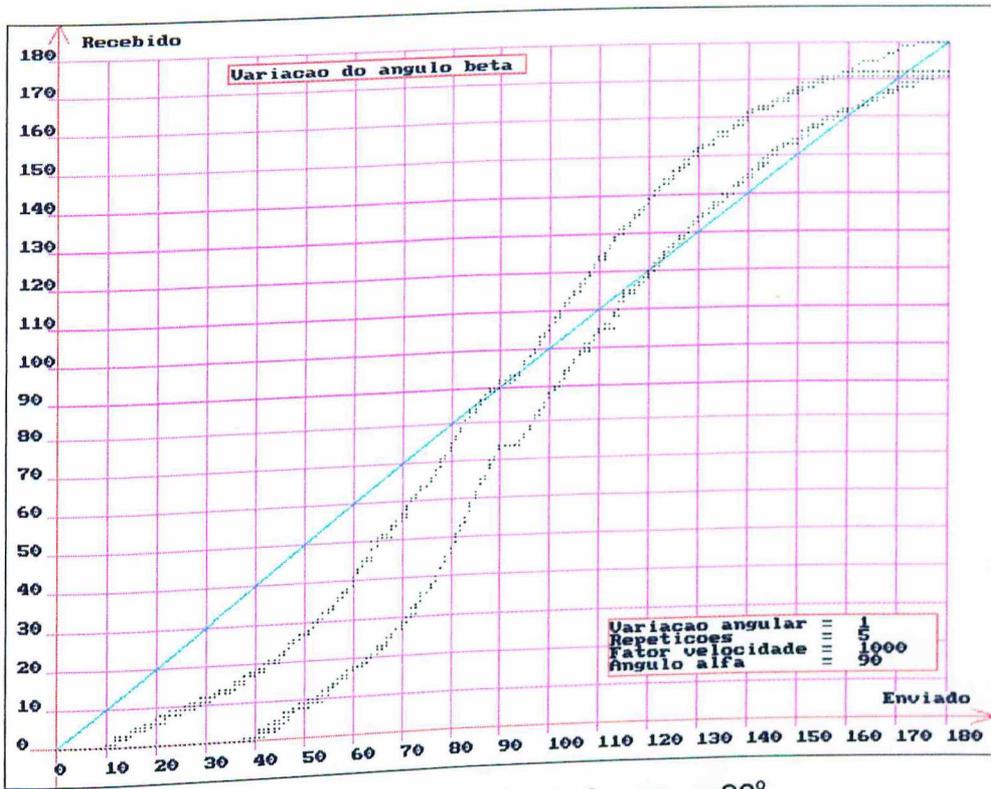


Figura 5.27 - Variação de β , com $\alpha=90^\circ$.

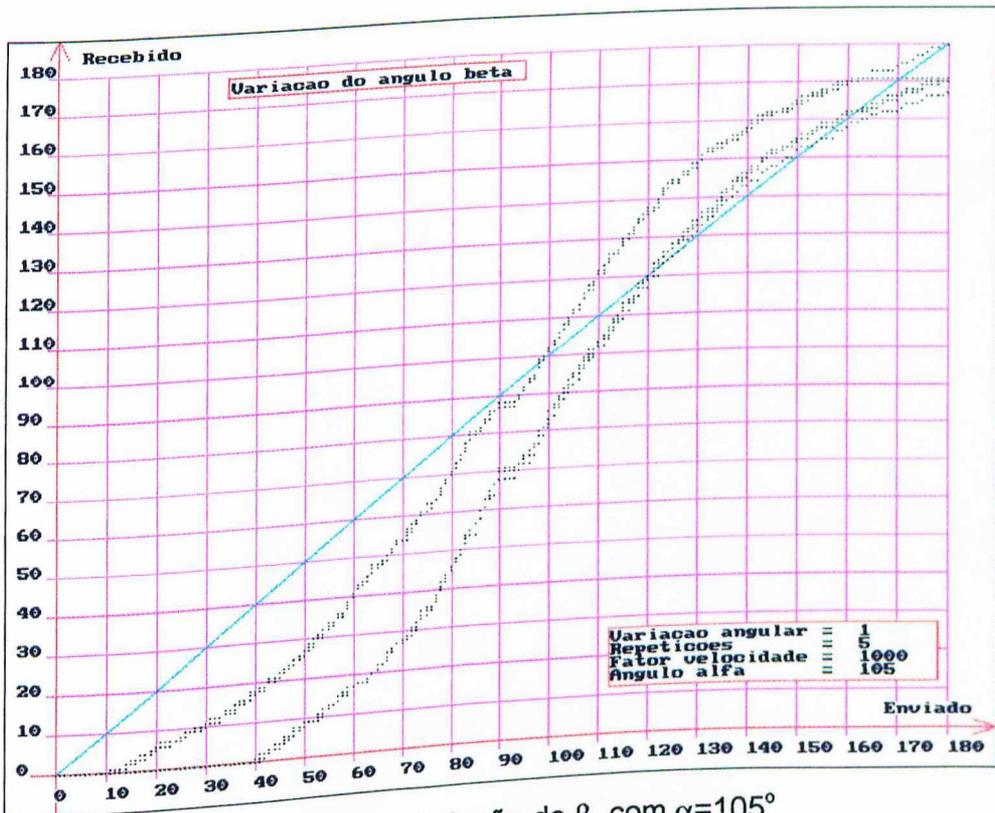


Figura 5.28 - Variação de β , com $\alpha=105^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

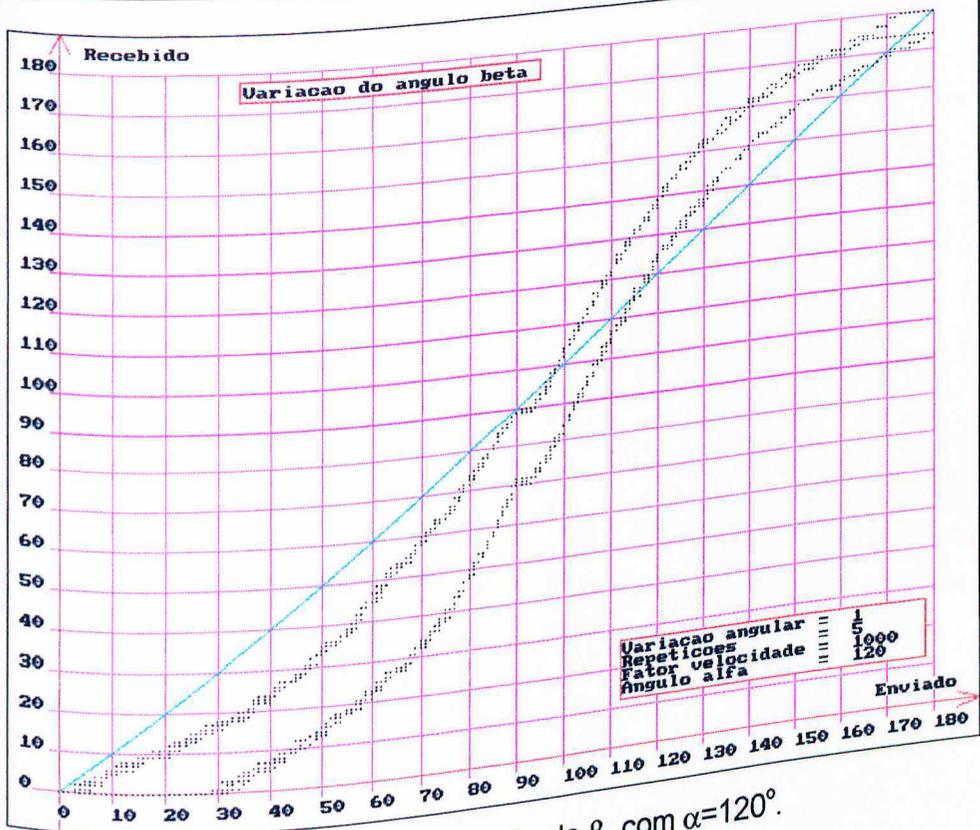


Figura 5.29 - Variação de β , com $\alpha=120^\circ$.

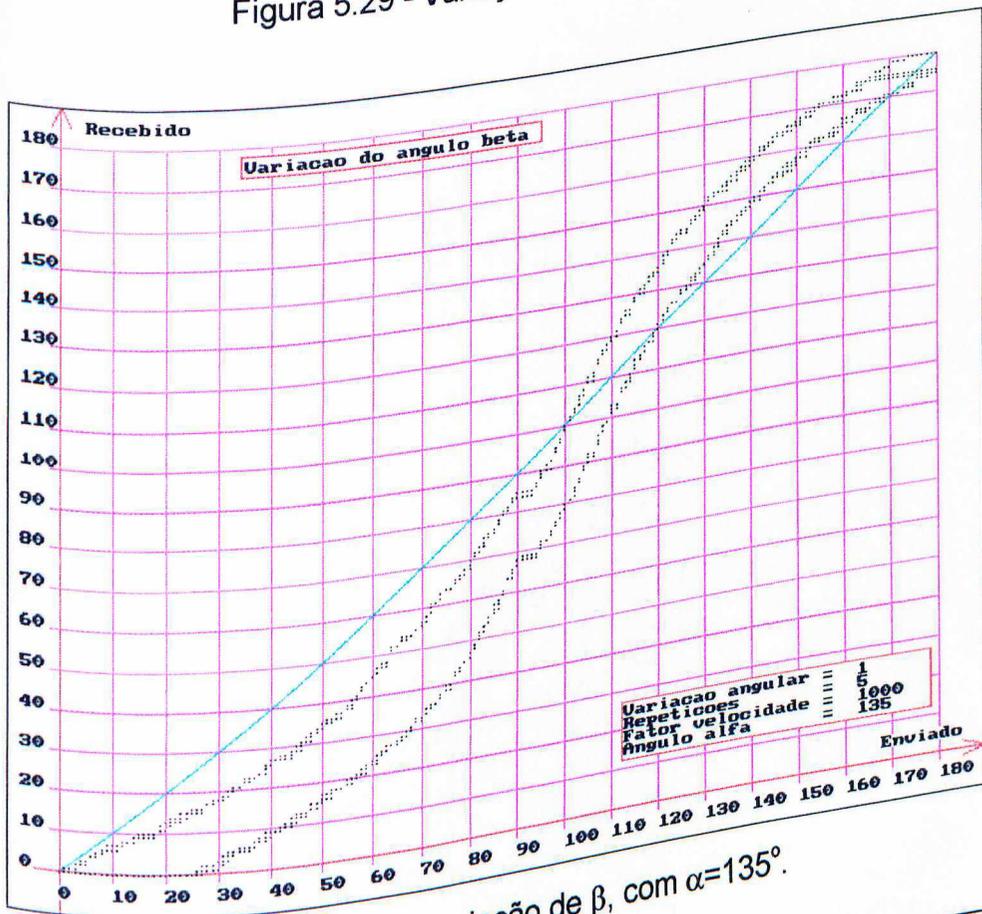


Figura 5.30 - Variação de β , com $\alpha=135^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

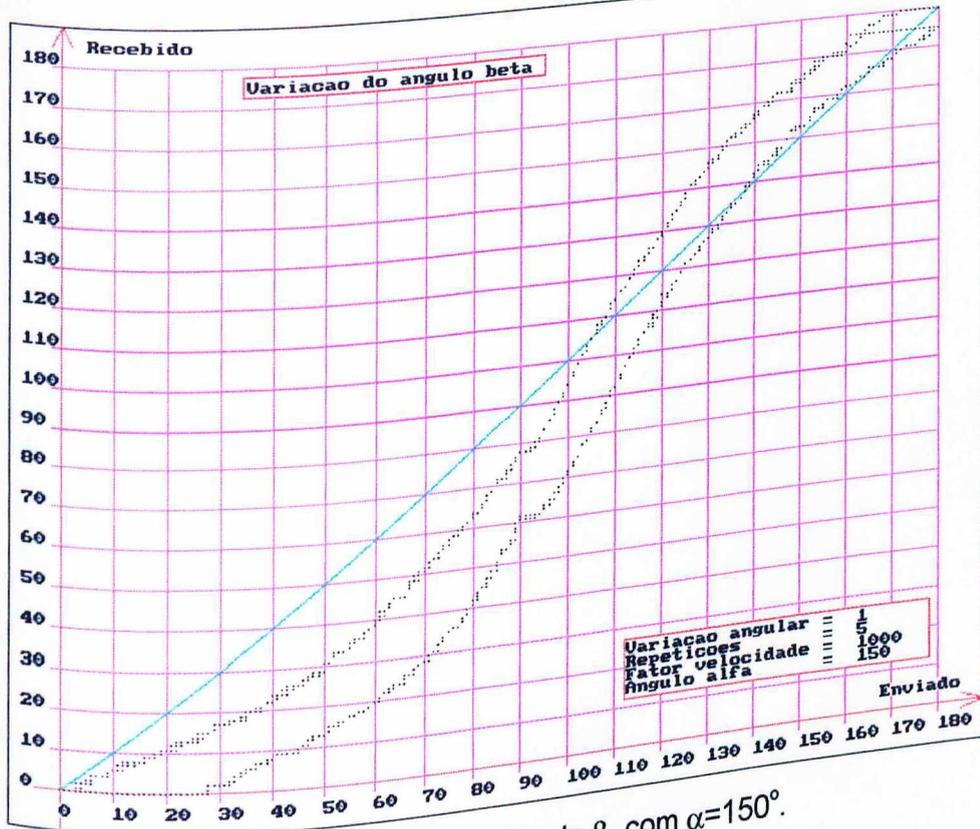


Figura 5.31 - Variação de β , com $\alpha=150^\circ$.

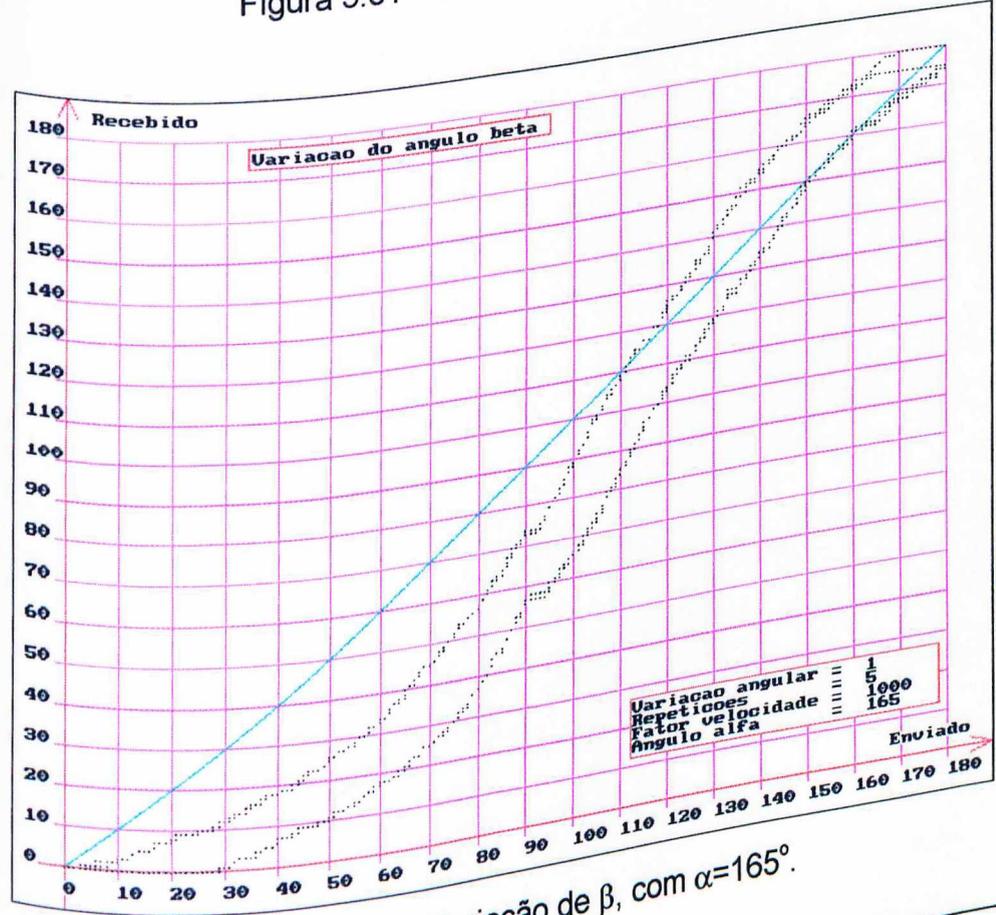


Figura 5.32 - Variação de β , com $\alpha=165^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

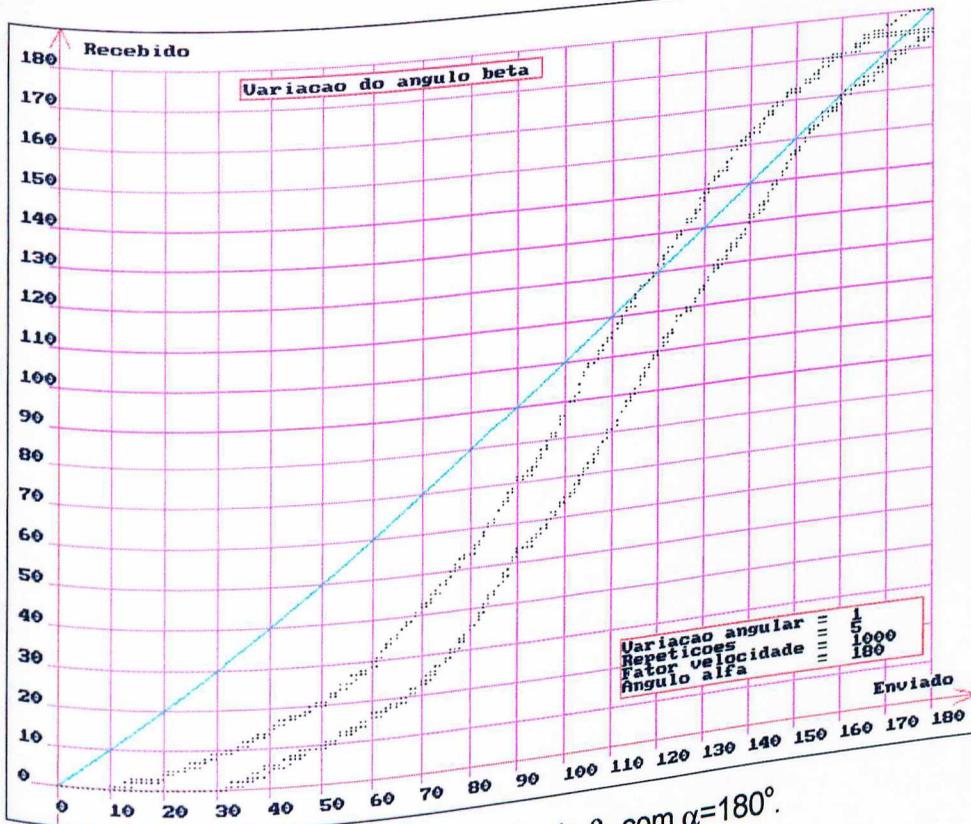


Figura 5.33 - Variação de β , com $\alpha=180^\circ$.

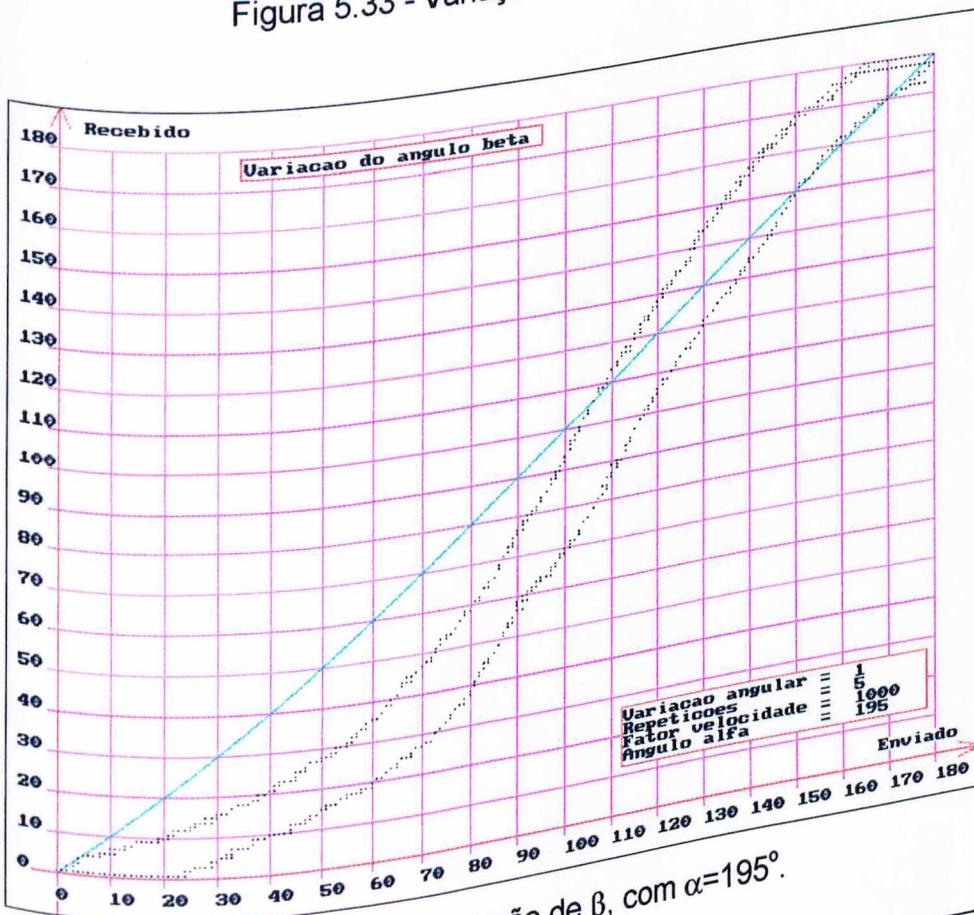


Figura 5.34 - Variação de β , com $\alpha=195^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

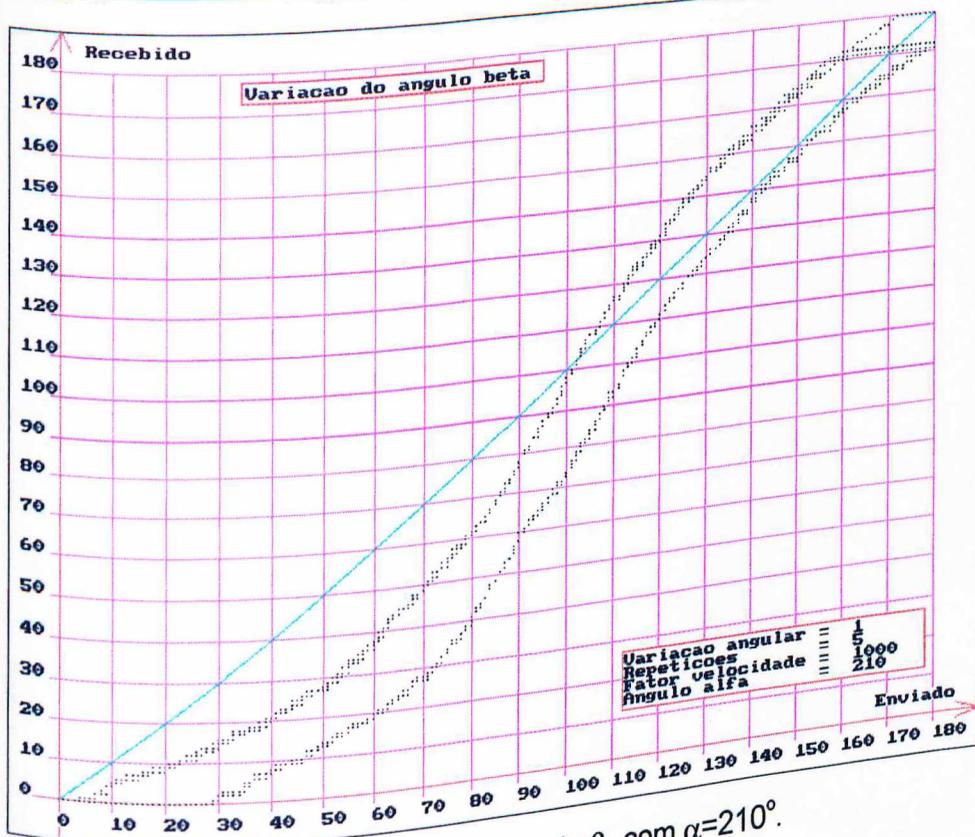


Figura 5.35 - Variação de β , com $\alpha=210^\circ$.

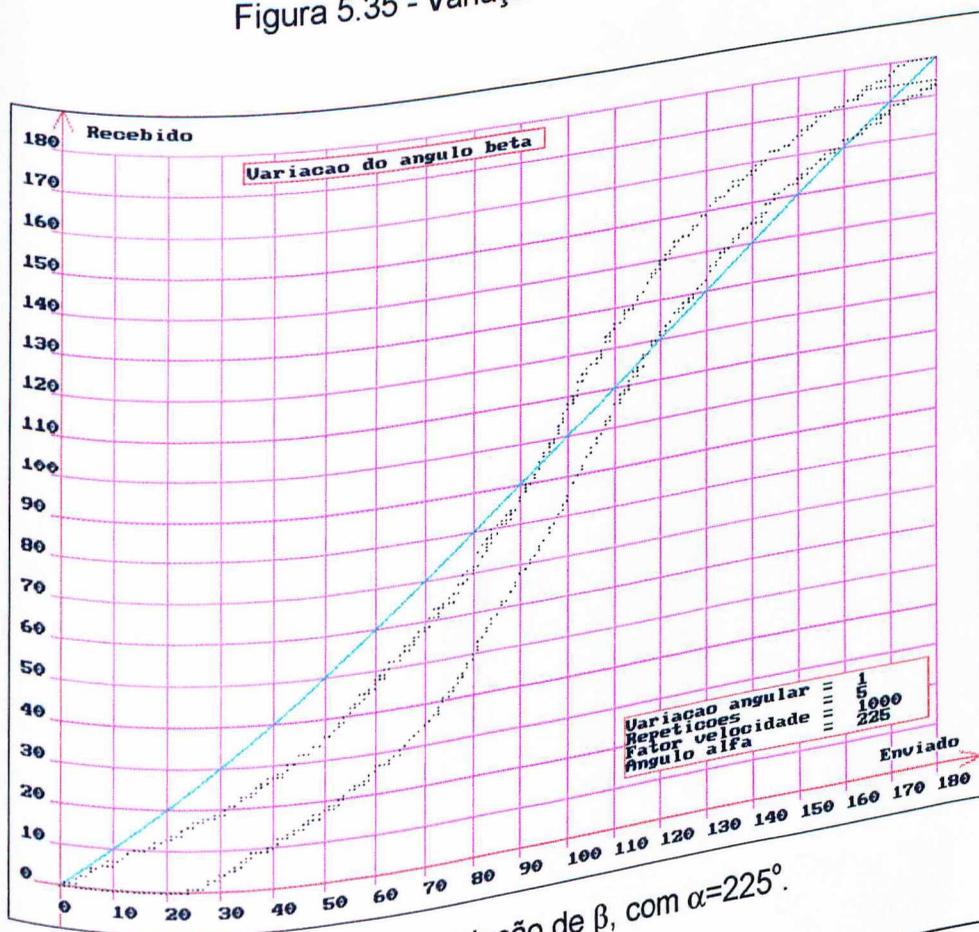


Figura 5.36 - Variação de β , com $\alpha=225^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

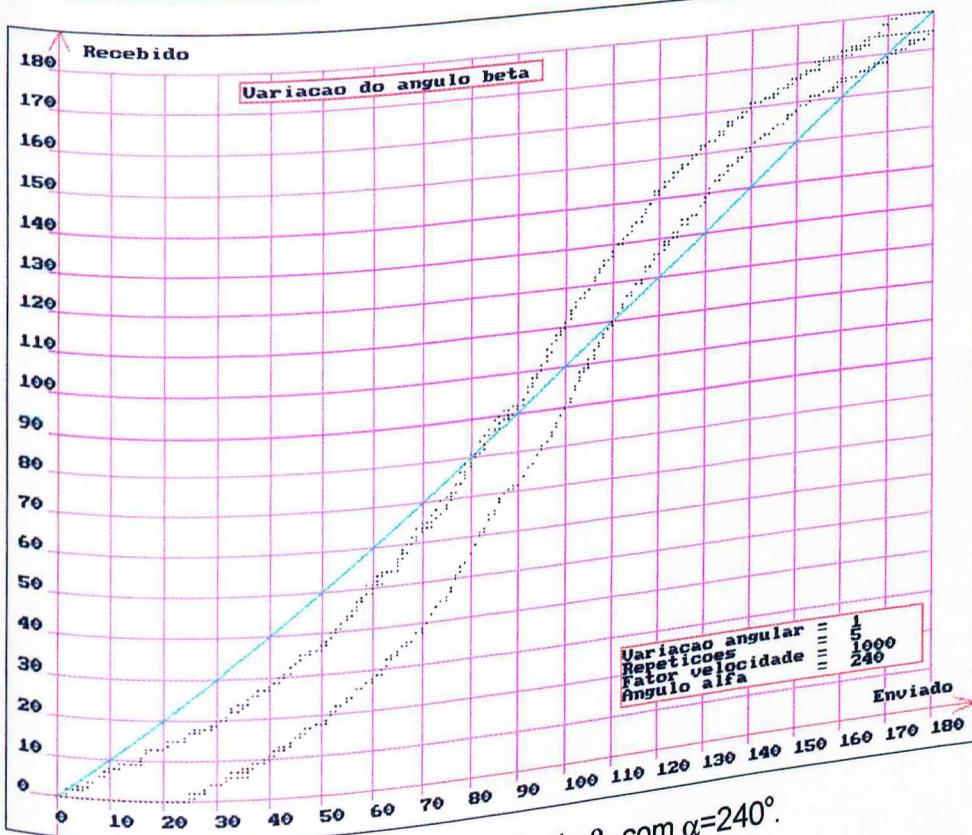


Figura 5.37 - Variação de β , com $\alpha=240^\circ$.

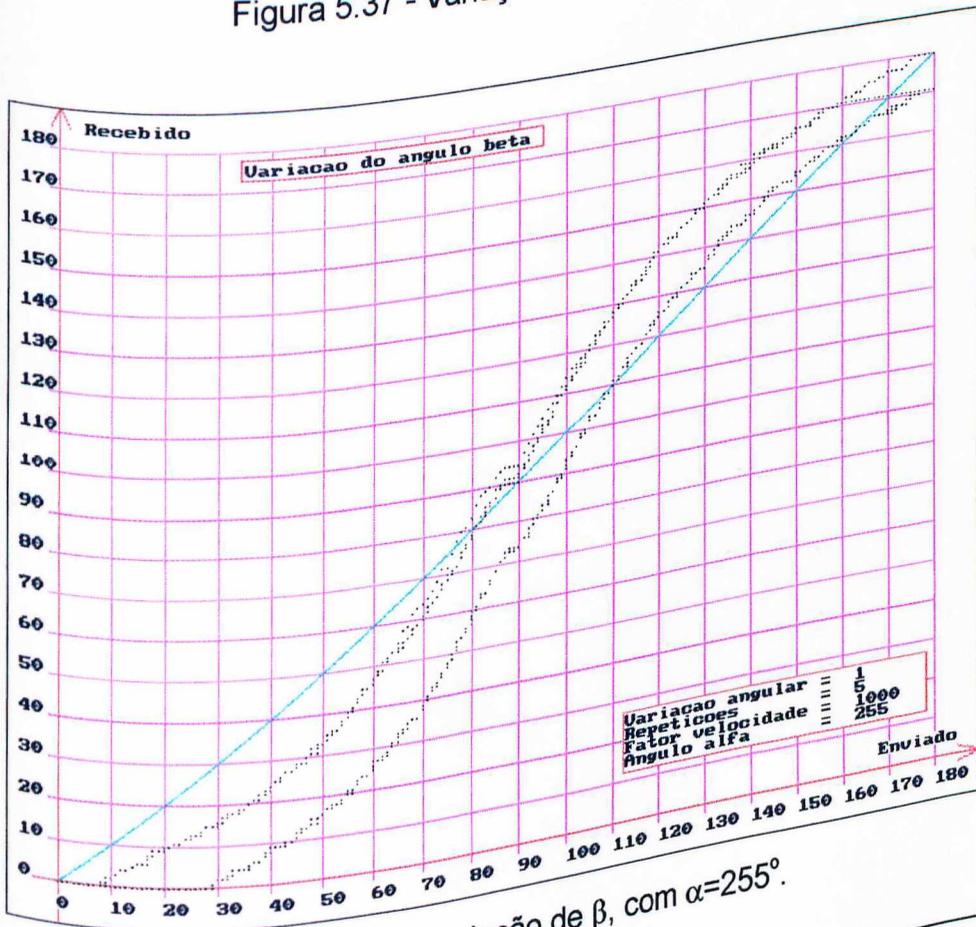


Figura 5.38 - Variação de β , com $\alpha=255^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

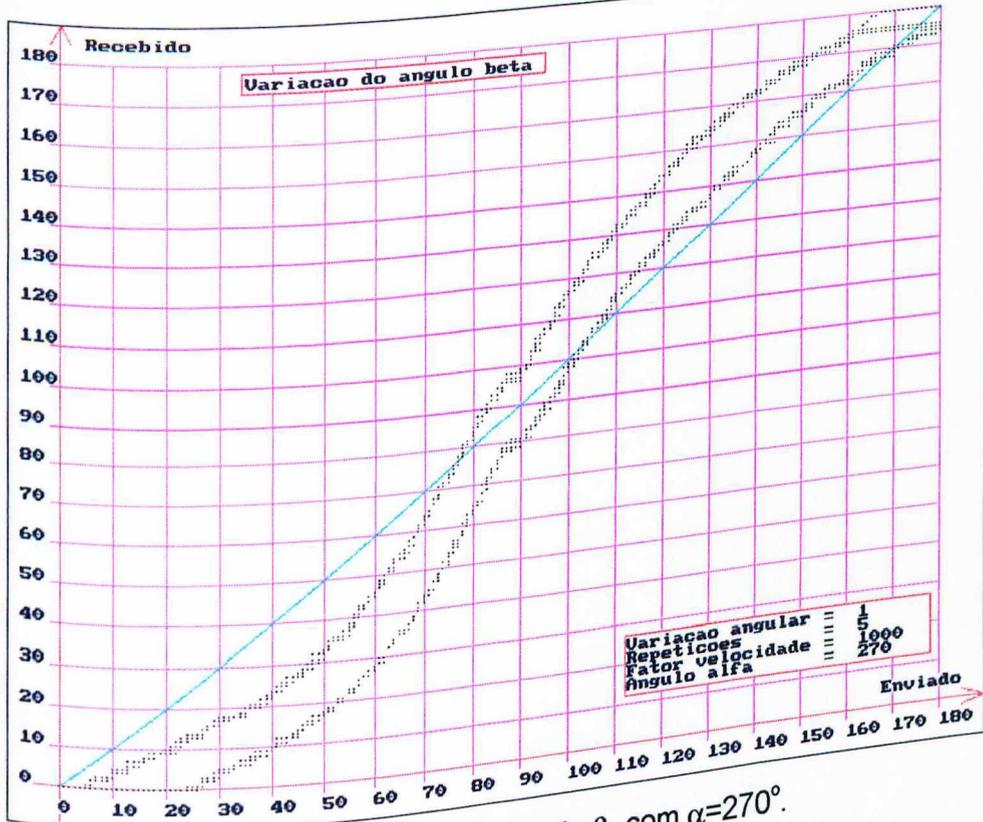
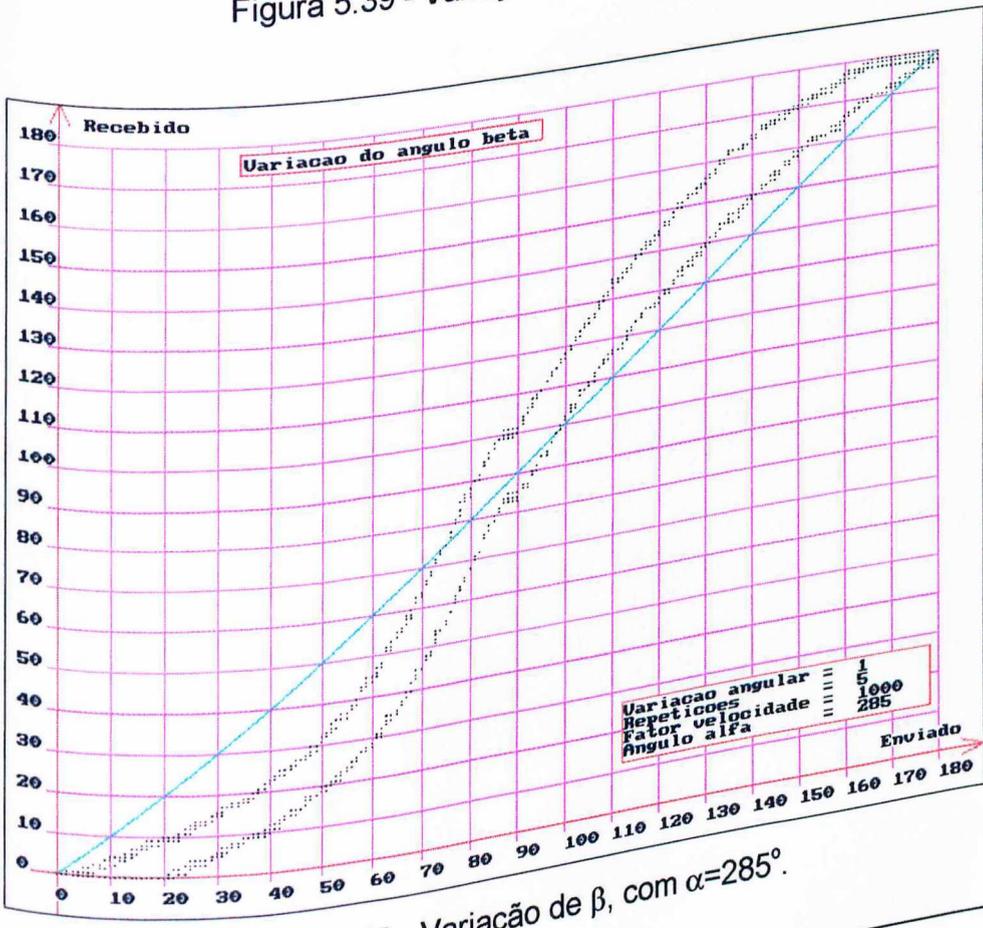


Figura 5.39 - Variação de β , com $\alpha=270^\circ$.



Variação de β , com $\alpha=285^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

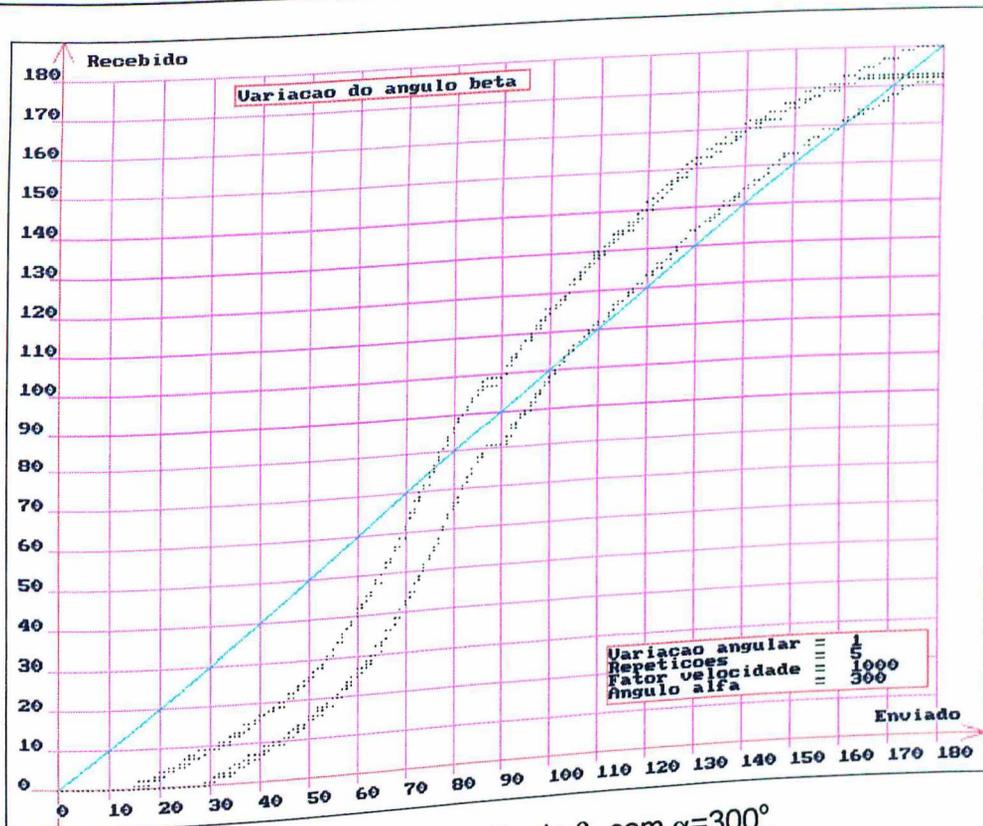


Figura 5.41 - Variação de β , com $\alpha=300^\circ$.

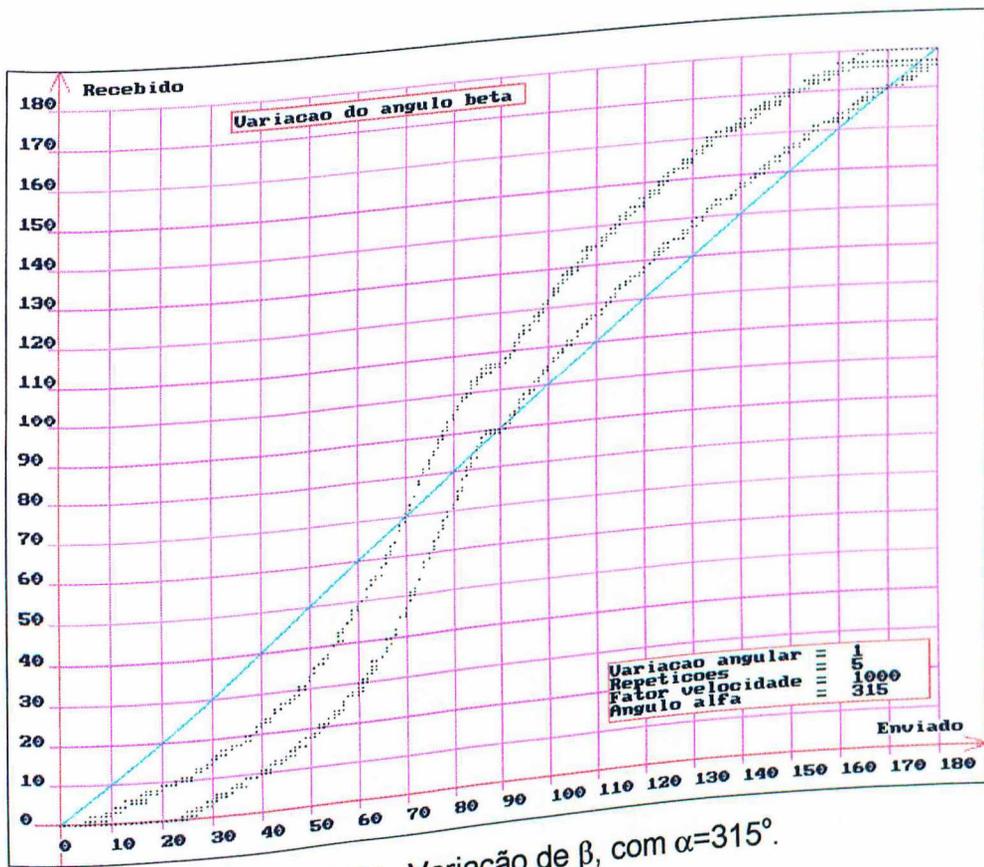


Figura 5.42 - Variação de β , com $\alpha=315^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

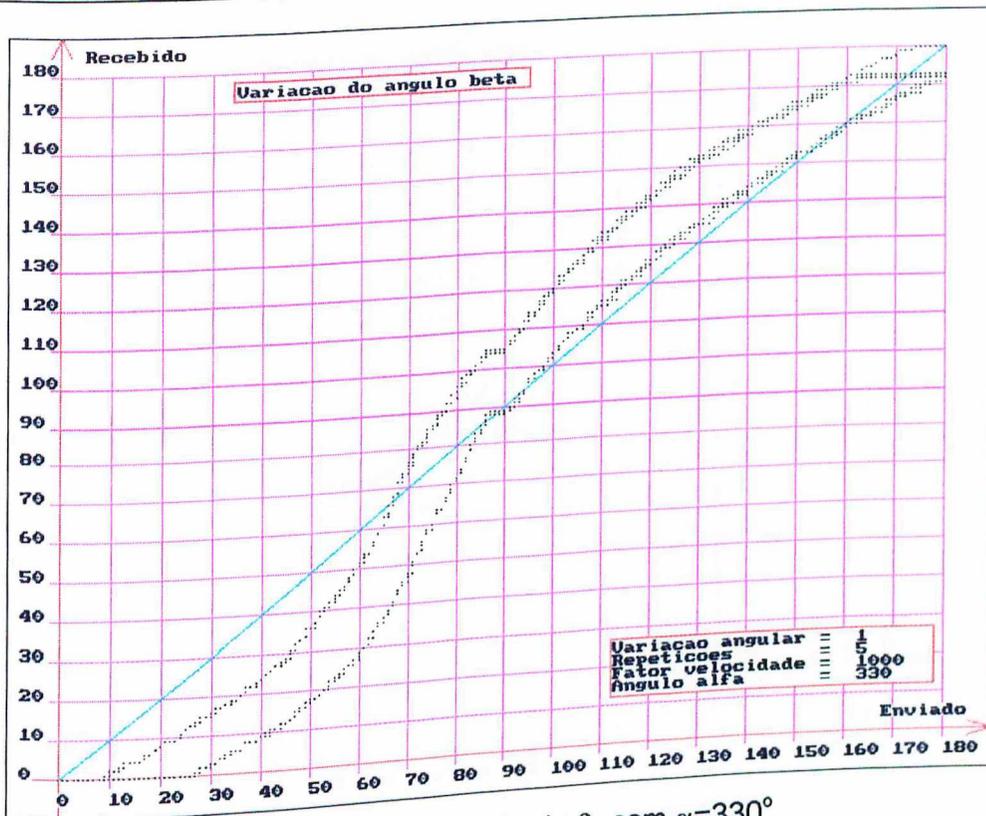


Figura 5.43 - Variação de β , com $\alpha=330^\circ$.

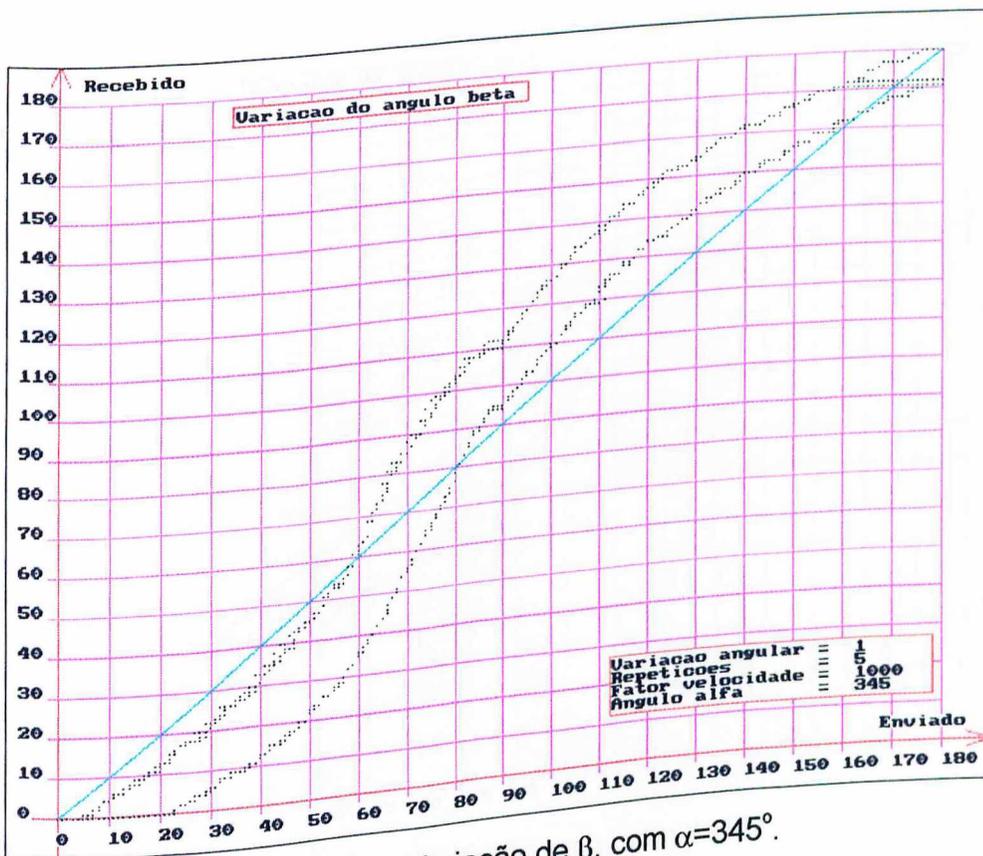


Figura 5.44 - Variação de β , com $\alpha=345^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

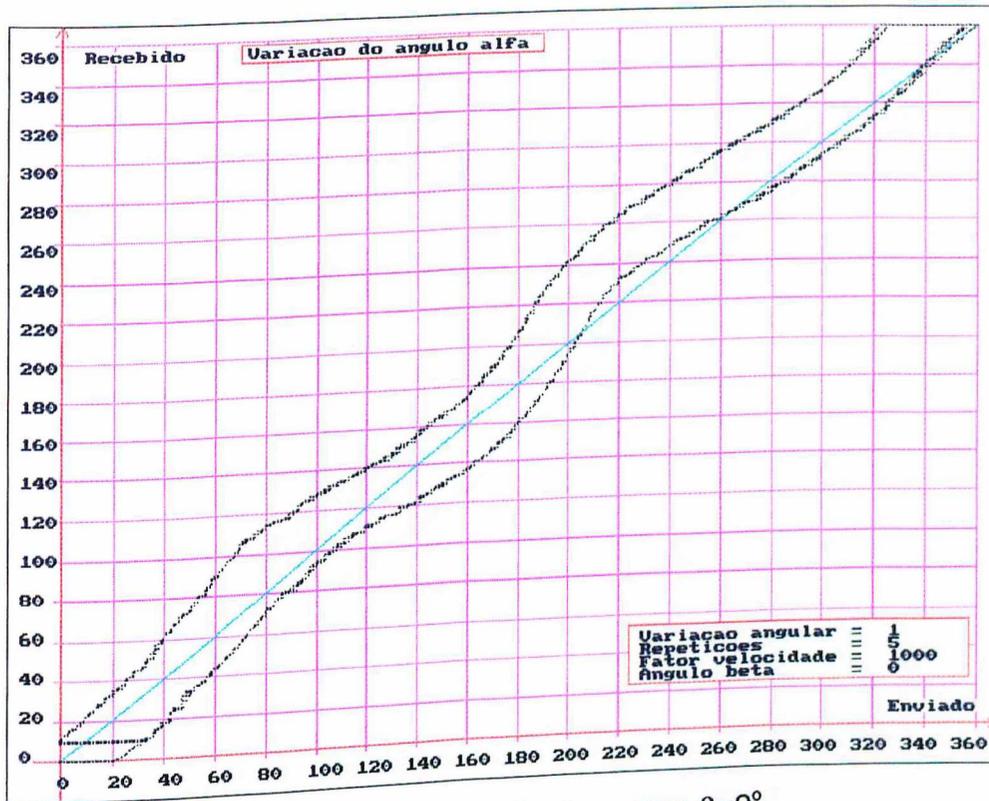


Figura 5.45 - Variação de α , com $\beta=0^\circ$.

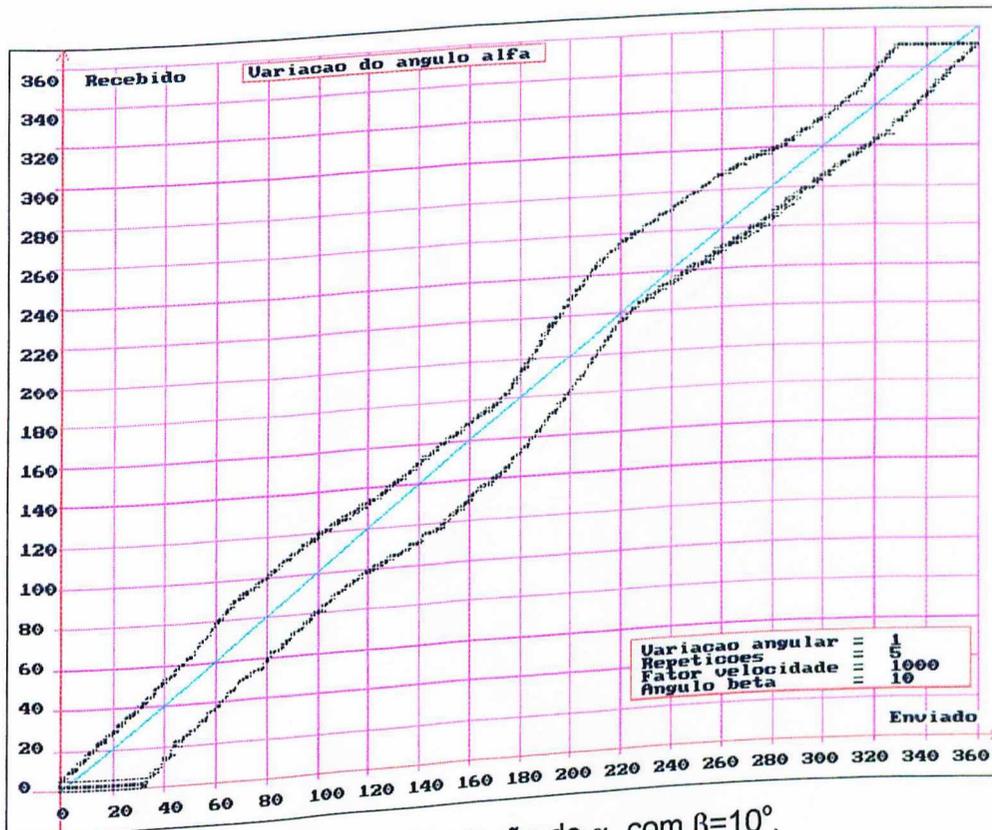


Figura 5.46 - Variação de α , com $\beta=10^\circ$.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

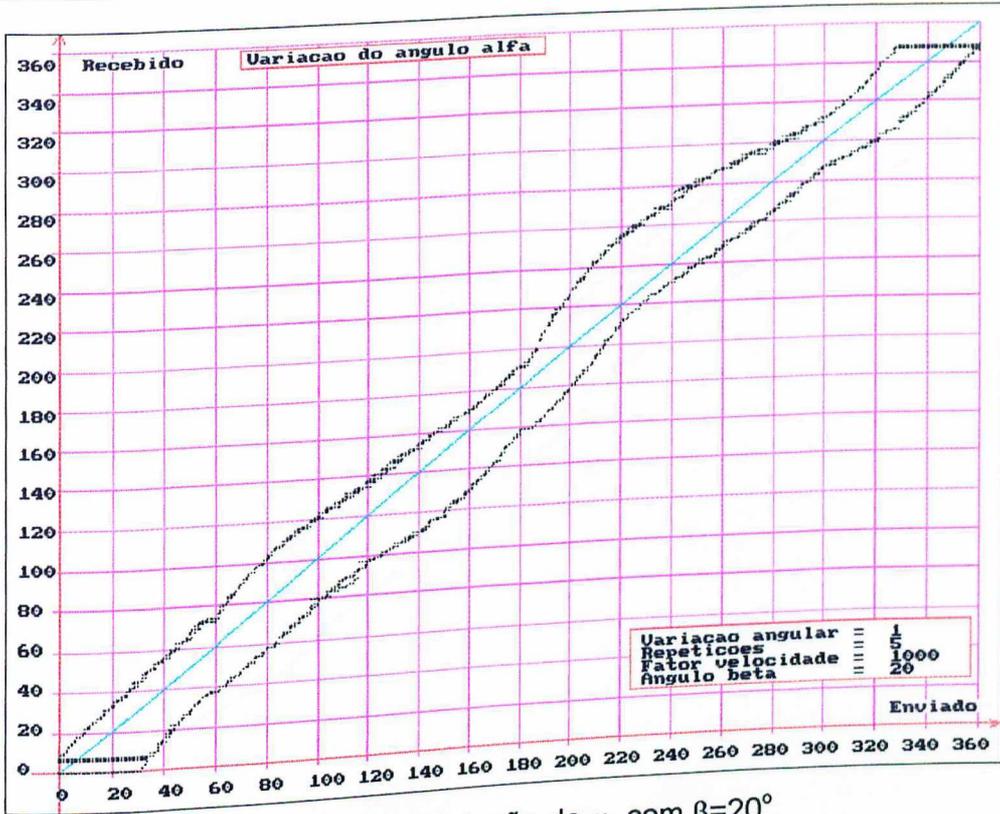


Figura 5.47 - Variação de α , com $\beta=20^\circ$.

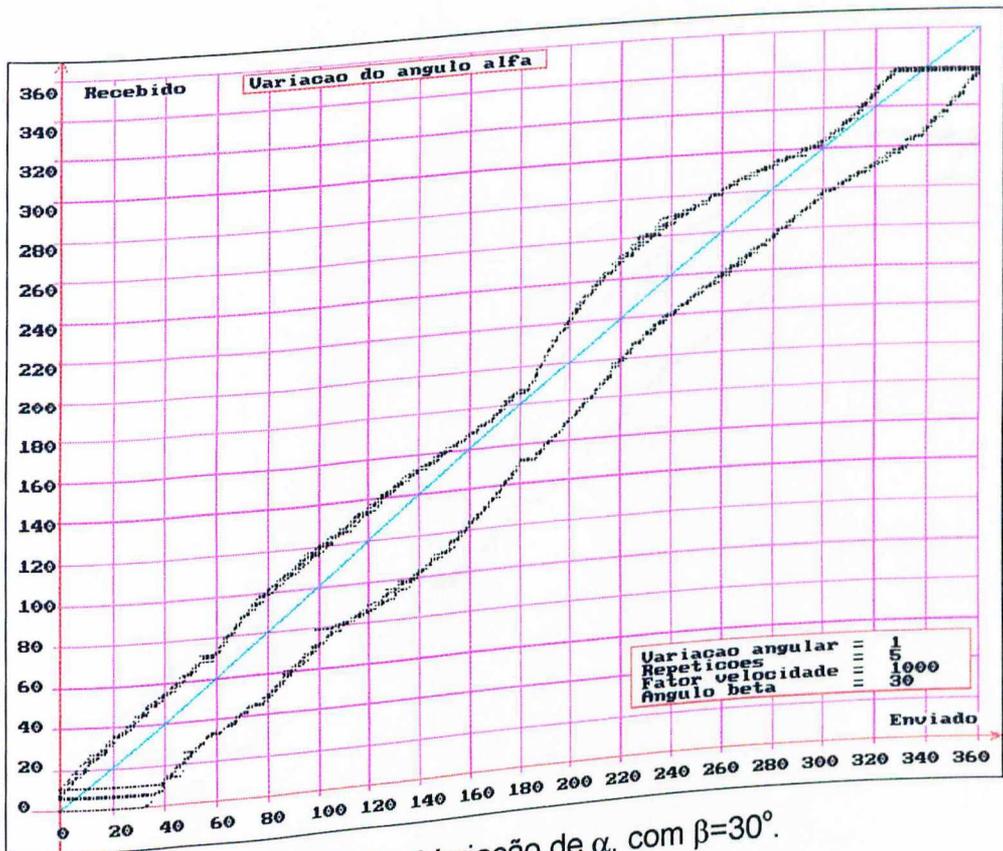


Figura 5.48 - Variação de α , com $\beta=30^\circ$.

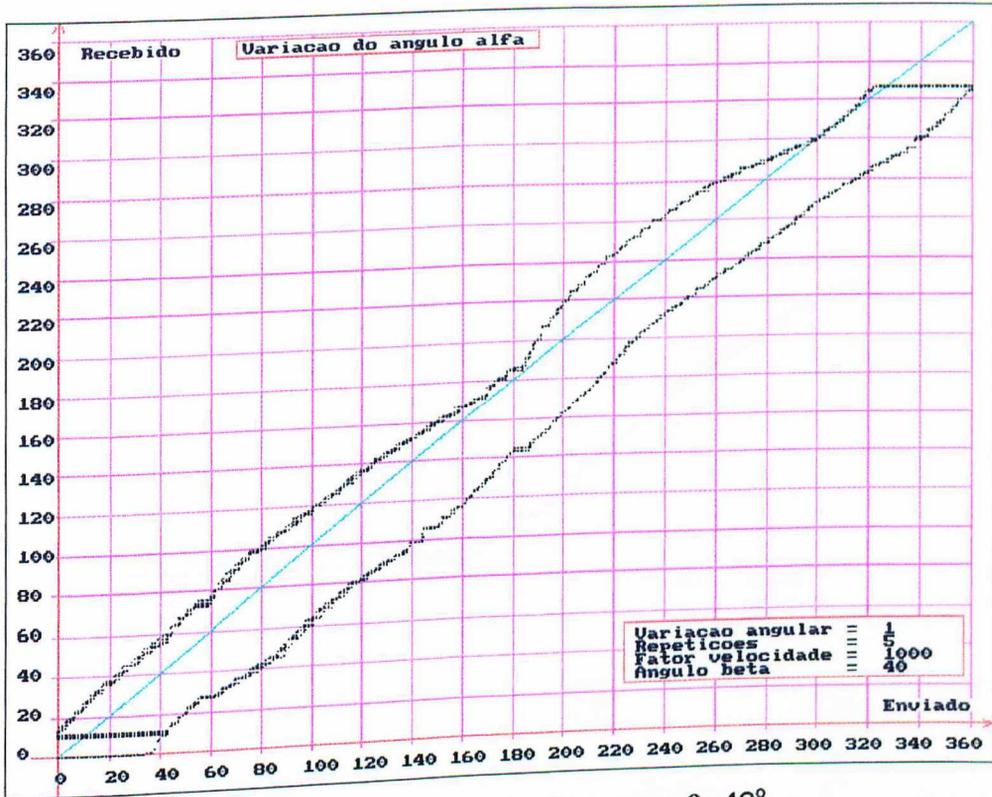


Figura 5.49 - Variação de α , com $\beta=40^\circ$.

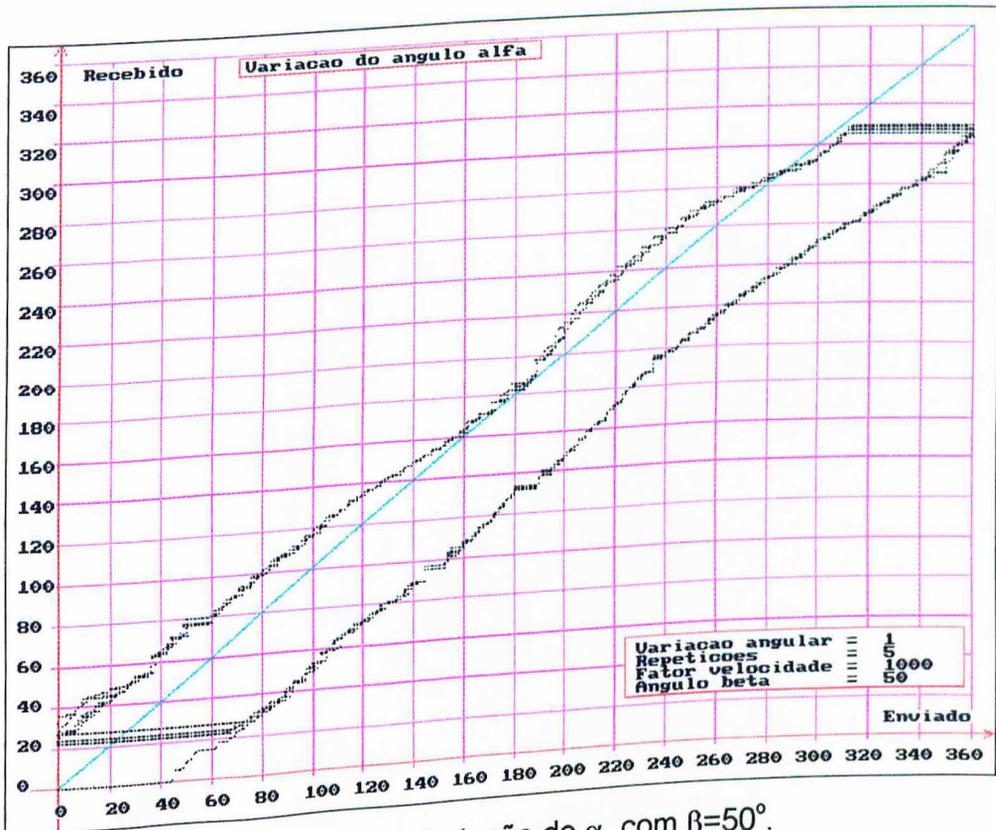


Figura 5.50 - Variação de α , com $\beta=50^\circ$.

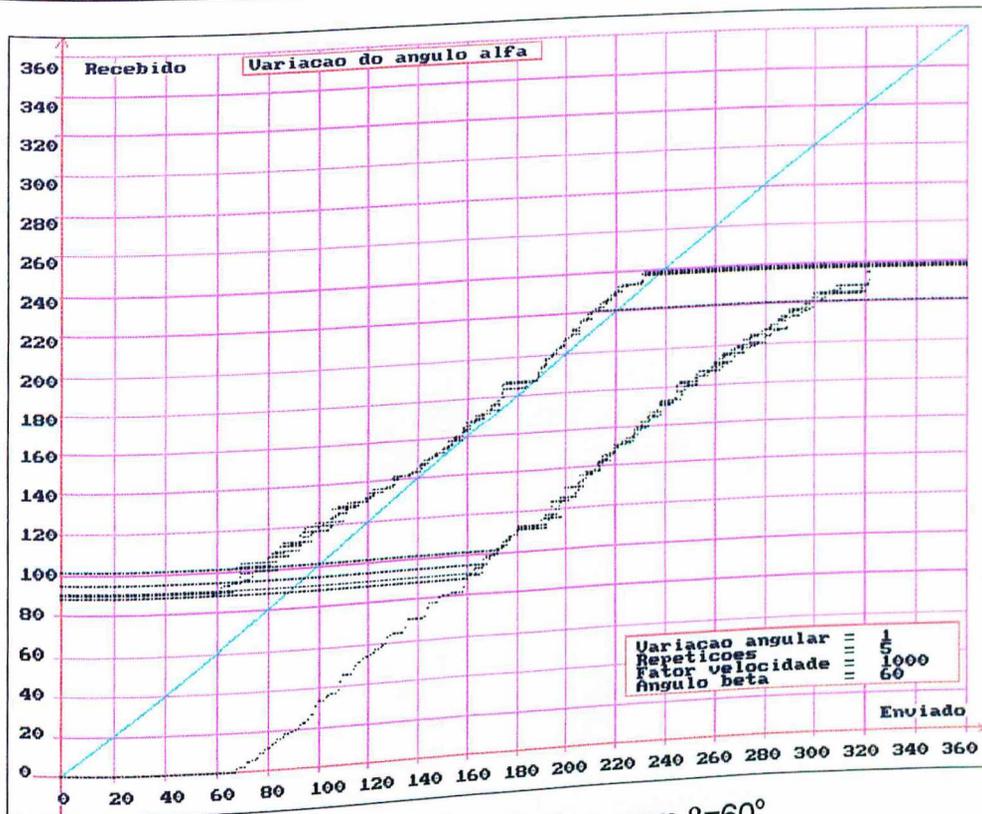


Figura 5.51 - Variação de α , com $\beta=60^\circ$.

5.3 - Análise dos resultados

Observando-se os resultados apresentados nos gráficos das figuras 5.1 a 5.10, pode-se concluir que o motor acionado à partir da modelagem matemática apresentada no capítulo 2, apresenta um funcionamento razoavelmente satisfatório apenas dentro de uma pequena região espacial em torno de $\alpha=70^\circ$ e β de 50° a 90° . Isto pode ser observado mais precisamente através das figuras 5.5 a 5.9. Existem certas condições em que o rotor praticamente não consegue passar de uma posição de equilíbrio para a próxima. São os casos indicados nos gráficos 5.1 e 5.2.

Analisando-se os resultados obtidos nos gráficos das figuras 5.11 a 5.51, pode-se concluir:

- Dentro de uma região que a princípio, o motor deveria funcionar em ambas as filosofias, esta última obteve êxito, mesmo com erros bastante variados. É oportuno lembrar que na primeira filosofia o rotor não conseguiu se posicionar em algumas partes da região acima mencionada.
- Fora da região correspondente à variação de α entre -30° e $+30^\circ$, o rotor tem um posicionamento mais próximo do correto para o ângulo β entre 90° e 180° . Isto pode ser justificado através das figuras 5.23 a 5.43.
- O posicionamento do rotor fica mais próximo do correto, quando se mantém o ângulo β constante. Isto pode ser justificado, comparando-se os gráficos das figuras 5.45 a 5.51 com 5.21 a 5.44.

Uma característica presente em todos os gráficos, independente da filosofia de acionamento, é a diferença existente entre as duas nuvens de pontos obtidos. Na tentativa de dar uma explicação à questão, a título de ilustração, a figura 5.52 mostra uma nuvem genérica que representa qualquer uma das nuvens inferiores dos gráficos das figuras 5.1 a 5.51.

Motor esférico - Um tipo de posicionador

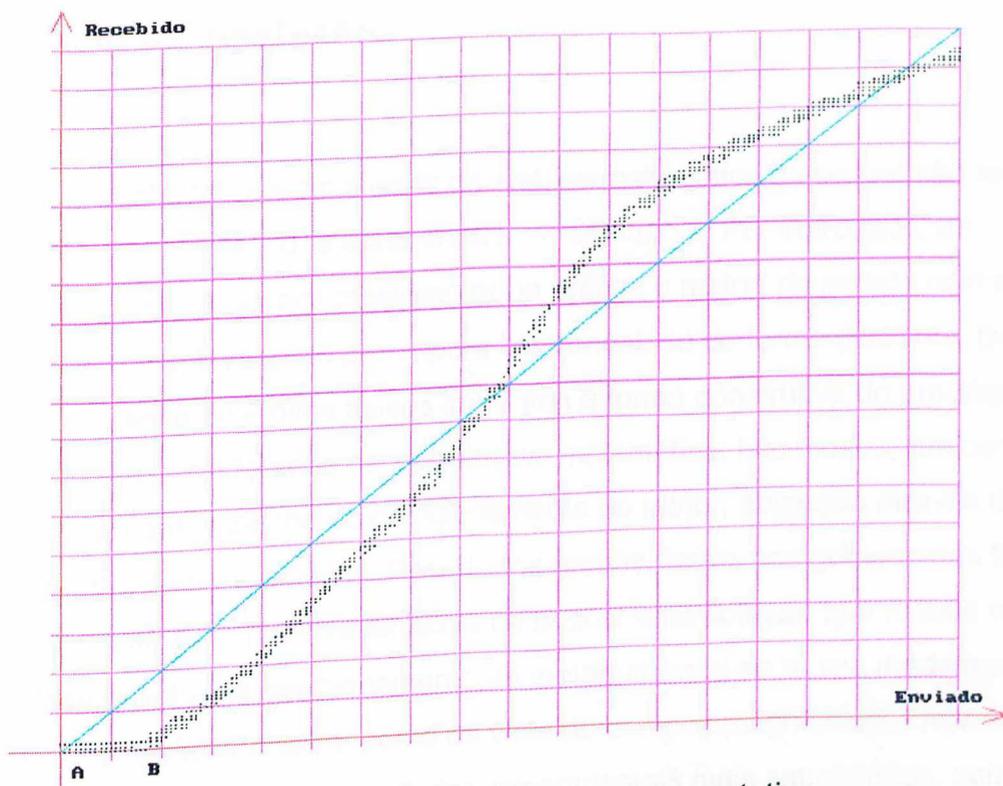


Figura 5.52 - Nuvem genérica representativa.

A princípio o rotor está na posição de ângulo zero, ponto "A" da figura 5.52. O computador envia para o motor, correntes " i_a ", " i_b ", " i_c " relativas a um ângulo, cujo valor está entre os pontos "A" e "B" da figura 5.52. Pela figura observa-se que o rotor não se desloca, pois o ângulo recebido continua nulo. Isto significa que o conjugado eletromagnético resultante aplicado no rotor não possui valor suficiente para vencer o conjugado de atrito. Isto ocorre até o ponto "B", onde o conjugado eletromagnético vence o atrito. Isto provoca o deslocamento para a direita da nuvem. Observando a nuvem superior dos gráficos, e utilizando-se do mesmo raciocínio, chega-se a mesma conclusão anterior.

Capítulo 6 - Conclusão

Este trabalho teve início a partir da análise matemática da concepção teórica dada para o motor esférico, e apresentada no capítulo 2. Por outro lado, as dificuldades construtivas em implementar na prática o motor, de acordo com a concepção teórica, levaram o protótipo a ser concebido de forma diferente. Desta maneira, uma série de efeitos físicos inerentes à forma construtiva do protótipo não são levados em consideração na modelagem matemática. Isto mostra, em certas regiões, o mau desempenho no posicionamento do motor, acionado através da referida modelagem matemática. Resultados apresentados nos gráficos das figuras 5.1 a 5.10, justificam o fato. Na tentativa de buscar uma solução que resulte em um melhor desempenho de posicionamento do motor, chegou-se a uma modelagem matemática simplificada, sob o ponto de vista de campos magnéticos. Embora, esta nova modelagem tenha dado resultados experimentais mais satisfatórios, como pode ser observado nos resultados dos gráficos das figuras 5.21 a 5.51, ainda não pode ser considerada como solução para a questão, e também não vem excluir totalmente a modelagem matemática inicial.

Com base nestas afirmativas, de uma forma geral, conclui-se que este trabalho reúne um conteúdo teórico-experimental sobre o motor esférico que poderá servir de base para o desenvolvimento de um processo iterativo entre teoria e experimento até se chegar a modelagens e protótipos que se traduzam mutuamente.

Dentro do processo iterativo aqui sugerido, algumas idéias surgem para futuros desenvolvimentos:

- análise física mais detalhada, com justificativas, dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados neste trabalho;
- com base nos resultados obtidos pela análise anterior, implementar nas modelagens matemáticas os efeitos físicos identificados;
- em função das respostas vindas das modelagens matemáticas modificadas, implementar novos protótipos

Referências Bibliográficas

- 1) Cheney, Margaret - Tesla: man out of time, pag. 72
- 2) K. Kaneko, I. Yamada, K. Itao - A Spherical DC Servo Motor With Tree Degrees of Freedom, Transactions of the ASME, Vol. 111, pag. 398-402
- 3) L.Martins Neto, D. A. Andrade, Motor esférico - Um servo posicionador, 8º Congresso Brasileiro de Automática, 10-14 de setembro de 1990, Anais Vol. 2, pag. 918-923

Bibliografia

- 1) L. Martins Neto, R. M. Mendes, D. A. Andrade, A Three-dimensional position servo, VII International Conference on Electrical Machines and Drives, Durhan, UK, 11-13 September 1995, IEE Conference Publication No. 412, pag. 227-231
- 2) Acanrley, P. P. - Stepping Motors: A Guide to Modern Theory and Practice, 2nd Ed. London, Peter Peregrinus Ltd, 1984
- 3) Johnston Jr. , E. R. - Mecânica Vetorial para Engenheiros, McGraw Hill
- 4) Kelly, D. O. And Simmons, S. - Introduction to generalized electrical machine theory, McGraw Hill
- 5) Kuo, B. C. - Theory and Aplications of Stepping Motors, Urbana, West Publishing Co., 1974