

DESCRIÇÃO E ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE MOTORES DE PASSO

DARIZON ALVES DE ANDRADE & HAROLDO RODRIGUES DE AZEVEDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
38400 - UBERLÂNDIA - MG - BRASIL

RESUMO:

Considerando a importância que os motores de passo possuem atualmente nos sistemas de controle automático de posição, o trabalho apresenta os tipos mais usuais e discorre sobre o princípio de funcionamento de cada um. Um modelo matemático é implementado em computador digital e os resultados obtidos são comparados com ensaios em laboratório comprovando a sua validade. Conclui-se também que o tempo de resposta de posição é muito dependente da configuração de corrente nos enrolamentos, e dos parâmetros mecânicos do motor.

1. INTRODUÇÃO:

O rápido desenvolvimento, e a vasta área de aplicações das técnicas digitais nos setores de controle automático, particularmente nos sistemas de controle de posição, colocaram em evidência um dispositivo até então pouco usado: os motores de passo.

Os motores de passo apresentam a característica de movimento discreto do eixo, ao contrário dos motores convencionais que quando excitados movimentam o seu eixo continuamente. Essa particularidade o torna um elemento de grande importância para as aplicações de controle de posição. Sendo o motor um dispositivo cujo deslocamento angular do eixo é definido pelo número de pulsos elétricos de entrada, ele apresenta a vantagem de operar em malha aberta, dispensando os complexos sistemas de controle em malha fechada que exigem a instalação de transdutores de posição no eixo dos motores convencionais de corrente contínua e síncronos. Aliado à vantagem de simplicidade no sistema de comando, propiciada pelo acionamento em malha aberta, os motores de passo são mais robustos e exigem manutenção mínima quando comparados com os outros.

Motores de passo são largamente utilizados para controle de posição em periféricos de computador tais como impressoras e disk drives; plotters XY, instrumentos médicos, máquinas de escrever eletrônicas, máquinas ferramenta na indústria, controladores de tempo, etc. Embora ainda hoje a grande maioria dos motores utilizados sejam de pequena potência, (da ordem de dezenas de watts), motores de passo com potência de até 5 KW já estão sendo desenvolvidos.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS

2.1. ÂNGULO DE PASSO

Uma das características importantes de um motor é o seu "ângulo de passo". O ângulo de passo é o deslocamento angular do eixo quando um passo é executado. Motores com ângulo de passo de 15°, 7,5°, 3,6°, 1,8°, e 0,72° são normalmente encontrados no mercado. Um motor com ângulo de passo de 1,8° por exemplo, executa $360/1,8 = 200$ passos por volta completa do rotor.

Motores de passo possuem precisão de posicionamento de ângulo de passo da ordem de 5%, não cumulativo, ou seja, se o motor executar diversos passos em sequência o erro de posi-

cionamento possível é 5% do último passo.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO

A característica de conjugado por velocidade ou frequência de passos de motores de passo, é apresentada na figura 1.

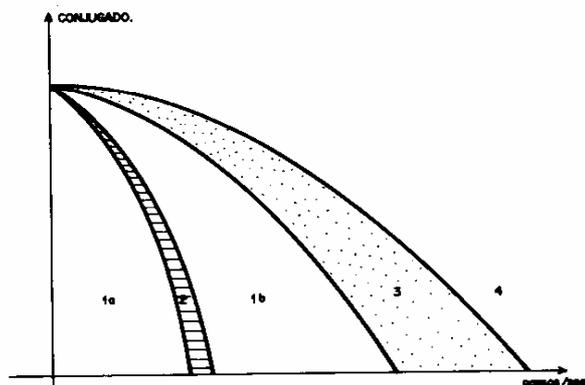


Figura 1 - Características de conjugado.

Nas regiões 1a e 1b, conhecidas como regiões de "partida-parada", o motor é capaz de partir e parar sempre em sincronismo com os sinais recebidos do sistema de comando, ou seja, não ocorrem perdas de passo nos processos de partida e/ou parada.

Para operação em pontos da região 2, o motor apresenta as chamadas "instabilidades de baixa frequência" causada pela ressonância do sistema devido às suas constantes mecânicas (inércia, amortecimento). A operação nessa região deve ser evitada pois ocorrem vibrações e ruídos intensos, e em alguns casos até perdas de passo.

A região 3 é aquela em que o motor desenvolve altas velocidades não sendo possível a partida ou parada. Para operar na região 3 o motor deve partir na região 1 sendo acelerado gradualmente até o ponto de operação. Procedimento idêntico deve ser seguido no caso da parada.

A curva entre as regiões 3 e 4 define os máximos conjugados de carga que o motor pode acionar a uma dada frequência de pulsos.

Deve-se observar entretanto que as características de conjugado bem como as delimitações das regiões citadas acima são muito dependentes das características do módulo de acionamento do motor. Estes incluem esquemas simples tais como módulos L/R que redu-

zem a constante de tempo com o acréscimo de resistências externas, ou técnicas mais elaboradas tais como alimentação a dois níveis de tensão, ou módulos do tipo chopper, em que a corrente do enrolamento é controlada.

Outras características importantes são o conjugado estático e o conjugado residual.

Conjugado Estático - C_e - É o máximo conjugado desenvolvido pelo motor quando, estando os seus enrolamentos energizados, atua-se no eixo, no sentido de deslocá-lo de sua posição de equilíbrio.

Conjugado Residual - Alguns tipos de motores de passo, devido às suas características construtivas, apresentam um pequeno conjugado no eixo mesmo quando os enrolamentos estão desenergizados. Esse conjugado é da ordem de 3 a 5% do conjugado estático, e recebe o nome de conjugado residual.

3. TIPOS DE MOTORES DE PASSO

Existem basicamente três tipos de motores de passo:

- . motores a relutância variável; cujo princípio de operação se baseia na criação de conjugados através da variação da relutância do circuito magnético;
- . motores de passo a ímã permanente; cujo princípio de operação se baseia na criação de conjugados através do alinhamento de campos magnéticos.
- . motores de passo Híbridos; cujo funcionamento é uma combinação dos casos anteriores.

3.1. MOTORES DE PASSO A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

São executados de duas maneiras distintas: de estator simples, e de múltiplos estatores.

Os motores a relutância variável de estator simples possuem um estator e um rotor construídos de material magnético laminado. A figura 2 apresenta um corte esquemático de um motor cujo ângulo de passo é 30° .

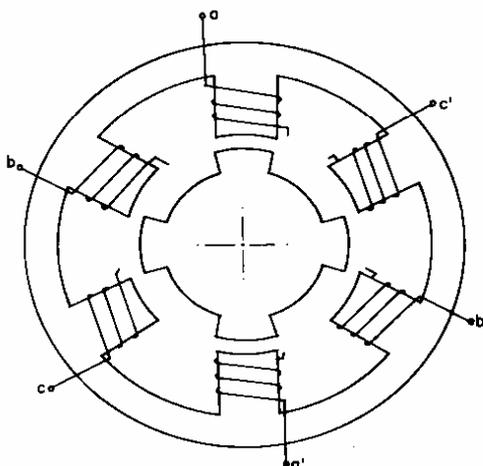


Figura 2 - Motor de passo a relutância variável estator simples.

O motor possui 3 fases no estator enroladas em seis polos. Cada fase ocupa 2 polos ou dentes do estator diametralmente

opostos. O rotor possui quatro dentes. Para que seja possível a operação com controle no sentido de rotação, é necessário que o número de dentes do estator (N_s) seja diferente do número de dentes do rotor (N_r), e que se tenha no mínimo 3 fases no estator.

Nesse tipo de motor, o conjugado é produzido pela variação da relutância do circuito magnético em função da posição, quando uma das fases é energizada. O fluxo criado atravessa o rotor, exercendo sobre ele um conjugado de relutância, que o arrasta para uma posição de mínima relutância. É o caso da fase A ser energizada na figura 2. Se a fase A for desconectada e em seguida, for energizada a fase B o rotor, devido a nova configuração de fluxo magnético, sofrerá um deslocamento de 30° no sentido horário a fim de proporcionar um caminho de mínima relutância para o fluxo da fase B. Comportamento idêntico acontecerá para desenergização da fase B e energização da fase C. Assim, se a sequência de energização das fases do motor da figura 2 for - A - B - C - A, o rotor vai executar os passos no sentido horário. Invertendo a sequência de alimentação das fases A - C - B - A, inverte-se o sentido de rotação do motor.

O ângulo de passo (γ) desse tipo de motor, é dado pela diferença entre os passos de dente do rotor e estator. No caso da figura 3 o passo de dente do rotor é 90° , o passo de dente (ou polo) do estator é 60° , o que resulta em ângulo de passo de $\gamma = 90 - 60 = 30^\circ$. Nesse caso o rotor precisa de $360/30 = 12$ passos para dar uma volta completa.

Outro desenho de motor de passo a relutância variável bastante usado, é o do tipo múltiplos estatores. Esses motores possuem três ou mais estatores idênticos magneticamente independentes. A cada estator corresponde uma fase, e um rotor. Tanto estatores como rotores são executados com material magnético laminado, sendo que os rotores são montados num eixo comum. Enquanto nos motores a estator simples, o número de dentes do estator é rotor são necessariamente diferentes, nos motores a múltiplos estatores eles são iguais. As figuras 3 e 4 apresentam cortes esquemáticos de motores a múltiplos estatores. Na figura 3 os dentes dos estatores estão alinhados enquanto os dentes dos rotores são deslocados entre si de $\tau = 360/N_r N_s$; onde N é o número de fases e N_r o número de dentes de estator ou rotor. Na figura 4 ocorre o contrário, estando alinhados os dentes dos rotores e deslocados de τ os dentes do estator. As duas configurações são usuais.

O ângulo de passo γ de um motor a múltiplos estatores é igual ao deslocamento entre os estatores (ou rotores) ou seja $\gamma = \tau = 360/N_r N_s$.

Considerando que o motor da figura 4 possua estatores com $N_s = N_r = 10$ dentes e $N = 3$ fases. O ângulo de passo será $\gamma = 360/10 \times 3 = 12^\circ$, e serão necessários $360/12 = 30$ passos para que o rotor execute uma rotação completa.

Pelo mesmo princípio do motor a estator simples, quando uma das fases é energizada, todos os dentes do estator e rotor daquela fase se alinharão em uma posição de mínima relutância. Se esta fase for desenergizada, e a fase seguinte energizada em seguida, o rotor por ação do conjugado de relutância

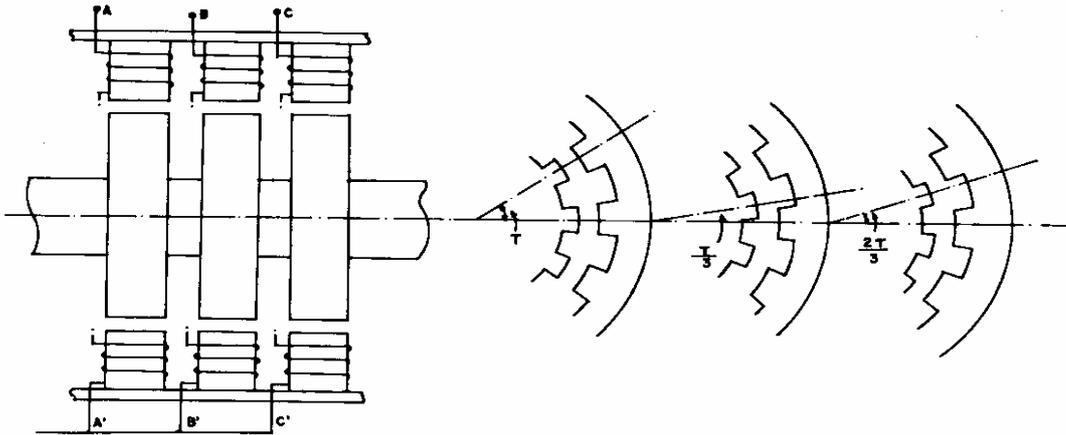


Figura 3 - Motor de passo a relutância variável com estatores múltiplos. Dentes dos estatores alinhados.

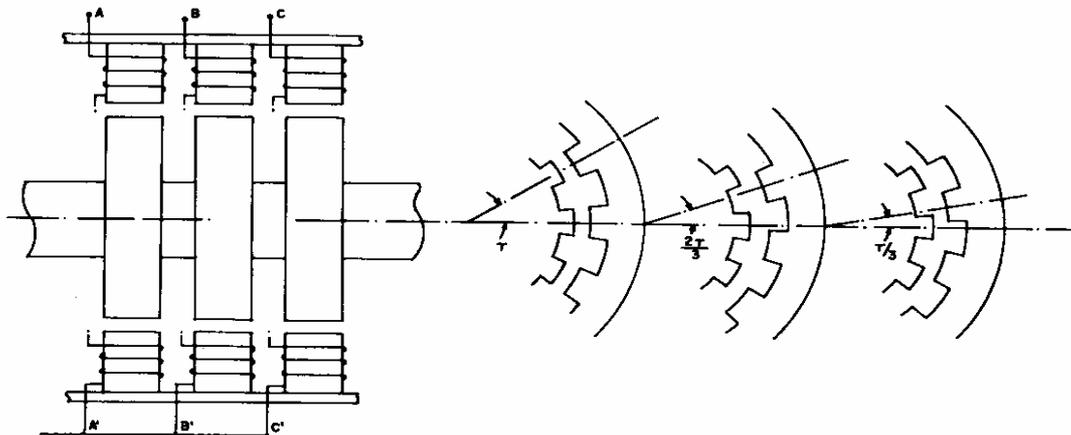


Figura 4 - Motor de passo a relutância variável com estatores múltiplos. Dentes dos rotores alinhados.

cia, executará um passo no sentido de que o circuito magnético da nova fase se encontre em condições de mínima relutância. Uma sequência lógica de chaveamentos leva o rotor a girar em um dado sentido. A inversão dessa sequência de chaveamentos inverte o sentido de giro do motor.

Se uma fase é energizada, o rotor se movimenta de forma a alcançar uma posição de equilíbrio estável. Nessa posição o conjugado resultante sobre o rotor é nulo. Se o rotor for deslocado de sua posição de equilíbrio mantendo a fase energizada, vai surgir um conjugado tendendo a levar o rotor à sua posição inicial, esse é o conjugado estático do motor e cresce com o deslocamento a partir da posição de equilíbrio.

A curva típica de conjugado estático para um motor de 3 fases, ângulo de passo $\gamma = 12^\circ$, é apresentada na figura 5.

As figuras 6a, 6b e 6c apresentam um diagrama linearizado com o rotor em diferentes posições, mantendo-se sempre a mesma fase energizada.

Na figura 6a, os dentes de estator e rotor estão alinhados, o conjugado sobre o rotor é nulo e a posição é estável.

Na figura 6b, o rotor foi deslocado de sua posição de equilíbrio, aparece conjugado de relutância, tendendo a levar o rotor à posição inicial.

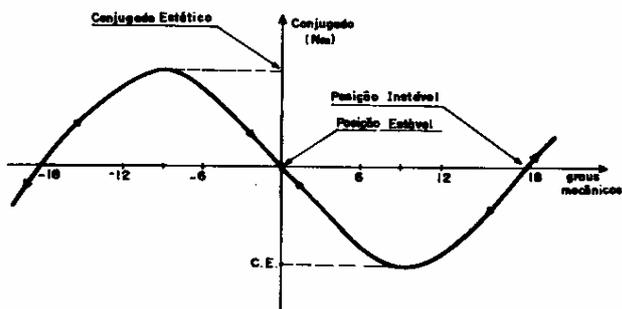


Figura 5 - Característica de conjugado estático.

Na figura 6c, o rotor está deslocado de meio passo de dente, o torque restaurador é nulo, mas a posição é instável, pois a relutância do circuito magnético não é mínima.

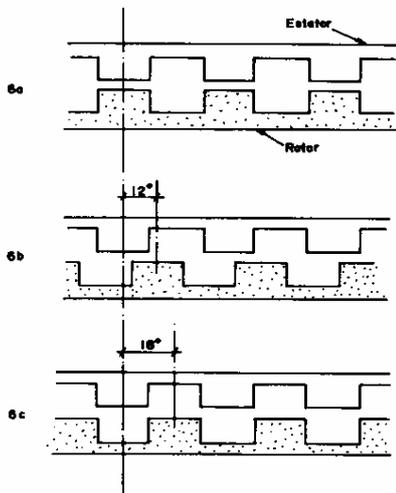


Figura 6 - 6a) Posição estável
6b) Existe conjugado motor
6c) Posição instável.

3.2. MOTORES DE PASSO A IMÃ PERMANENTE

Atualmente os motores de passo imã permanente são executados de duas formas básicas distintas: o motor convencional, cujo rotor possui um imã permanente cilíndrico de campo magnético radial, e o motor de rotor a disco, cujos imãs permanentes criam campo magnético axial.

A figura 7 apresenta um diagrama esquemático de um motor a imã permanente do tipo convencional, o estator é constituído de material ferromagnético e contém os enrolamentos das fases do motor. O rotor, suporta um imã permanente cerâmico de forma cilíndrica.

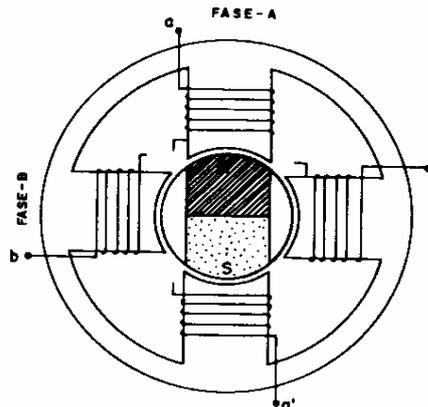


Figura 7 - Motor de passo a imã permanente.

O funcionamento desse motor baseia-se no princípio de alinhamento dos campos magnéticos de estator e rotor.

A figura 7 mostra a posição do rotor quando a fase A está energizada, com o terminal a positivo em relação ao terminal a'. Desconectando-se a fase A, e em seguida conectando-se a fase B com o terminal b positivo em relação ao terminal b', o rotor executará um passo de 90° no sentido anti-horário, a fim de que o campo magnético do imã permanente se alinhe com o campo magnético criado pela fase B. Desconectando-se a fase B, e energizando a fase A, com polarização oposta à energização anterior, o rotor executará outro passo no sentido anti-horário. Para que o conjugado motor obtido seja maior, normalmente são excitadas as duas fases simultaneamente, os ângulos de passo não se alteram, mas as posições de equilíbrio estável são deslocadas de meio ângulo de passo.

Devido à presença do imã permanente, surge o conjugado residual, que leva o rotor a apresentar posições preferenciais mesmo estando desenergizado, o que não ocorre com motores a relutância variável.

Os motores a imã permanente convencionais, apresentam ângulos de passo entre 7,5° e 90°. Ângulos de passo menores são difíceis de se obter devido às dificuldades em criar um grande número de polos no imã permanente.

Um dos últimos avanços na tecnologia de construção de motores de passo, é o motor a imã permanente com rotor a disco. Esse motor apresenta características de desempenho muito superiores aos motores convencionais. Construtivamente, são muito simples, constam de um rotor em forma de disco, constituído de material não magnético, onde são colocadas peças de imã permanente de terras raras (samário-cobalto), uniformemente distribuídas em torno da periferia do disco. O fluxo criado pelos imãs permanentes é axial, ou seja os polos norte e sul de cada imã estão em faces opostas do disco. Cada imã é colocado com polaridade oposta ao imã adjacente. O circuito magnético do estator é execu-

tado com materiais de alta permeabilidade magnética formando estruturas em forma de C. Nesses núcleos são enroladas as bobinas do estator, que normalmente possui duas fases. A figura 8 apresenta um diagrama esquemático do motor.

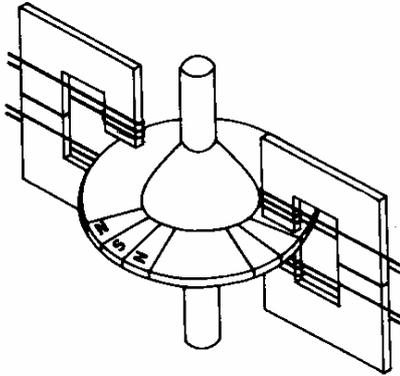


Figura 8 - Motor a ímã permanente com rotor a disco.

Graças às excelentes características magnéticas dos ímãs de terras-raras, esse tipo de execução é viável. Para se ter uma idéia, a espessura de um rotor a disco é da ordem de 1mm. Devido às características construtivas, os motores a disco apresentam momento de inércia da ordem de 1/10, constante mecânica 3 vezes menor, e capacidade de aceleração entre 5 e 7 vezes a de motores convencionais equivalentes.

O princípio de funcionamento desse motor é idêntico ao do motor a ímã permanente convencional. Os polos de uma fase do estator são deslocados de 1/2 passo de polo do rotor em relação à outra fase. Esse procedimento associado a uma sequência lógica de alimentação das fases propicia o movimento do rotor com controle no sentido de rotação.

As figuras 9a, 9b, 9c e 9d ilustram a operação do motor. Na figura 9a, tem-se a fase A energizada e a fase B desenergizada; a interação entre os campos de estator e rotor levam o rotor à posição mostrada. Na figura 9b, a fase A está desenergizada e a fase B energizada convenientemente. A interação entre os campos magnéticos de estator e rotor leva o motor a executar um passo que corresponde a 1/2 passo de polo do rotor. A figura 9e mostra um quadro com a sequência de chaveamento das fases.

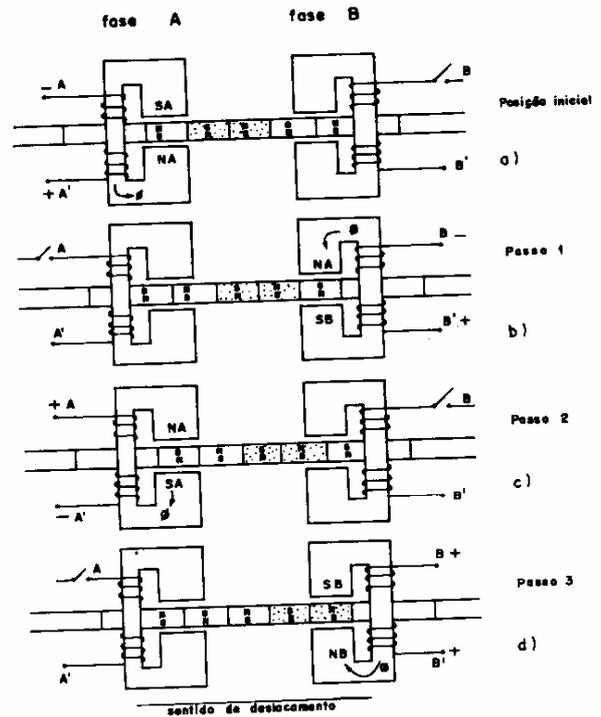
A cada passo, o rotor avança 1/2 passo de polo do rotor. O ângulo de passo γ então será dado por:

$$\gamma = 360/2.P \quad ;$$

onde:

P → número de pares de polos do rotor.

O número de passos por volta completa do rotor será igual ao dobro do número



PASSO	FASE - A	FASE - B
POS. INIC.	—	XXXX
PASSO 1	XXXX	—
PASSO 2	+	XXXXX
PASSO 3	XXXXX	+

Figura 9 - Princípio de funcionamento do motor a ímã permanente com rotor a disco.

de pares de polos. Motores com ângulos de passo de 1,8°; 3,6°; e 7,2° são normalmente encontrados no mercado.

3.3. MOTOR DE PASSO HÍBRIDO

O motor de passo do tipo híbrido combina as características do motor a relutância variável com o motor a ímã permanente. O estator é constituído de material magnético laminado e suporta as fases do motor. A superfície de cada polo do estator é normalmente dentada. O rotor se compõe de duas seções cilíndricas também dentadas, entre as quais é instalado um ímã permanente. O conjunto é montado no eixo de forma que cada uma das seções fique sob ação de um polo do ímã permanente, e que os seus dentes sejam deslocados de 1/2 passo de dente entre si.

te. A figura 10 mostra um motor em cor

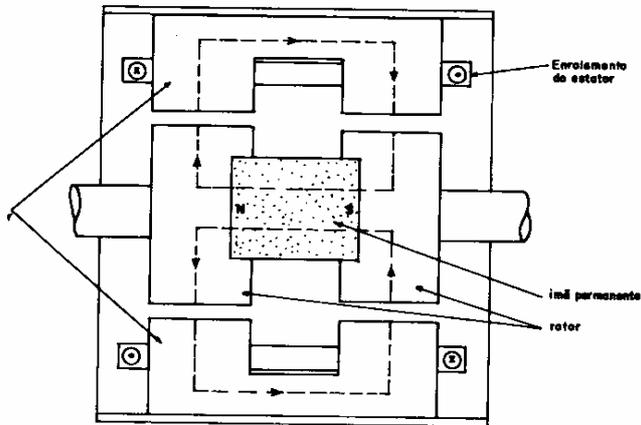


Figura 10 - Corte longitudinal de um motor de passo híbrido.

Da mesma forma que no motor a relutância variável de estator simples, o número de dentes do estator (N_s) é diferente do número de dentes do rotor (N_r). Para analisar o funcionamento de tal motor, consideremos um esquema simples, onde o estator possui duas fases, enroladas em 4 polos, cada polo com apenas 1 dente, e um rotor com 5 dentes, conforme a figura 11.

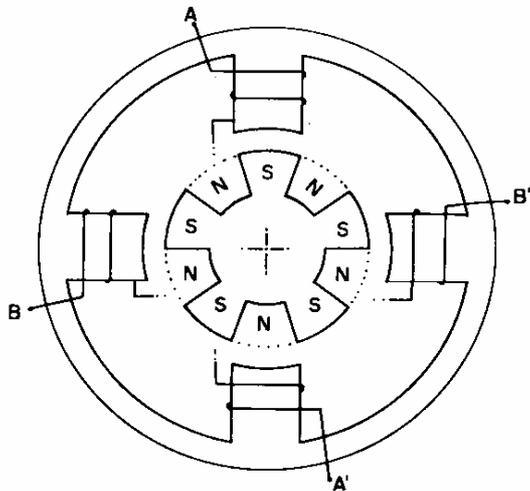


Figura 11 - Seção reta de um motor de passo híbrido com $N_s = 4$ e $N_r = 5$.

Como no motor a relutância variável de estator simples, o conjugado desenvolvido nesse motor, resulta da interação entre os fluxos de estator e rotor, que tende sempre a alinhar os dois campos magnéticos.

As figuras 12a, 12b e 12c apresentam as posições ocupadas pelo rotor quando as

fases são chaveadas conforme o quadro da figura 12d. Observa-se que para cada comutação das fases é executado um passo cujo ângulo de deslocamento corresponde a 1/4 do ângulo correspondente ao passo de dente do rotor. O ângulo de passo γ é definido pela relação:

$$\gamma = 360/4.N_r \quad ;$$

onde:

N_r → número de dentes do rotor

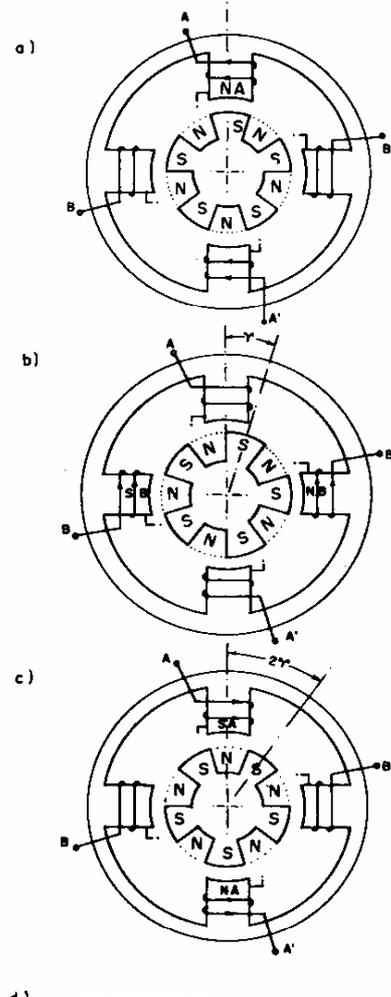


FIG.	PASSO	FASE-A	FASE-B
12a	0	—	XXXXX
12b	1	XXXXX	+
12c	2	+	XXXXX

Figura 12 - Princípio de funcionamento do motor de passo híbrido.

O ângulo de passo para o motor da figura 12 é portanto $\gamma = 360/4.5 = 18^\circ$, e para uma rotação completa do rotor serão necessários 20 passos. Motores de passo híbrido são normalmente executados com ângulos de passo de $3,6^\circ$; $1,8^\circ$; e $0,72^\circ$.

As curvas de conjugado estático tanto para o motor híbrido como para os motores a ímã permanente, têm a mesma forma daquela apresentada na figura 5 e são interpretadas da mesma maneira.

4. ESTUDO DA FUNÇÃO DE PASSO

4.1. MODELO MATEMÁTICO DO MOTOR

A fim de analisar o funcionamento do motor de passo, consideremos um motor de duas fases a ímã permanente ou híbrido cujo modelo matemático foi desenvolvido por [1] e tem sido largamente usado em estudos e pesquisas; segundo esse modelo, as equações elétricas e mecânicas que descrevem o comportamento do motor são:

a. Equações elétricas

$$V_a = r_a \cdot i_a + L(di_a/dt) - K \cdot \omega \cdot \text{sen}(N \cdot \theta) \quad 4.a$$

$$V_b = r_b \cdot i_b + L(di_b/dt) + K \cdot \omega \cdot \text{sen}(N \cdot \theta) \quad 4.b$$

$$T_m = K \cdot (-i_a \cdot \text{sen}(N \cdot \theta) + i_b \cdot \text{cos}(N \cdot \theta)) \quad 4.c$$

b. Equações mecânicas

$$\omega = d\theta/dt \quad 4.d$$

$$T_m = J(d^2\theta/dt^2) + B \cdot (d\theta/dt) + T_F \quad 4.e$$

onde:

- V_a, V_b - tensões aplicadas nos enrolamentos (volts)
- i_a, i_b - correntes nos enrolamentos (ampères)
- r_a, r_b - resistência do enrolamentos (ohms)
- L - indutância dos enrolamentos (henries)
- ω - velocidade angular do eixo (rd/seg)
- θ - deslocamento angular do rotor (rad.)
- N - Nº de pares de polos, ou dentes do rotor
- K - Constante de conjugado do motor (N.m/A)
- J - Momento de inércia do sistema (Kg.m²)
- B - Coeficiente de amortecimento do sistema (N.m.sec.)
- T_m - Conjugado motor (N.m)
- T_F - Conjugado de carga (N.m)

Portanto, as equações de estado que representam o motor são não-lineares. A análise dessas equações (4.a a 4.e), indica que quando os enrolamentos do motor são excitados de forma que o motor avance um passo, a resposta de posição é tal que ocorre uma oscilação em torno da nova posição de equilíbrio, cujas características de amplitude e frequência são definidas pelos parâmetros do sistema, ou seja, momento de inércia, amortecimento, e conjugado interno do motor. A resposta de posição a um pulso de comando descrita acima recebe o nome de função passo e tem o aspecto apresentado na figura 13.

A figura 14 apresenta o comportamento de um motor cuja frequência de passos é tal que o comando para o próximo passo ocorre antes da estabilização do eixo na posição anterior. Em aplicações de alta velocidade, onde a característica de amortecimento

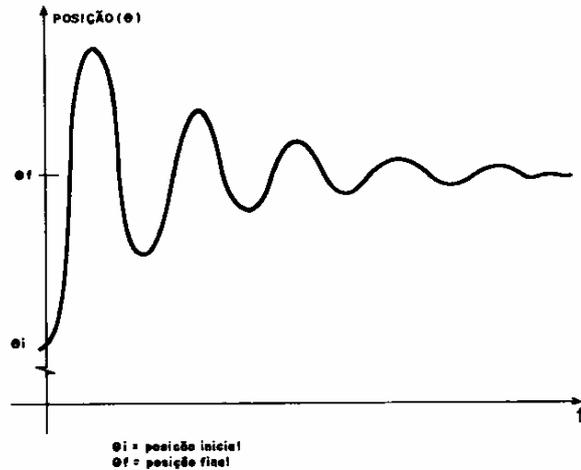


Figura 13 - Função passo.

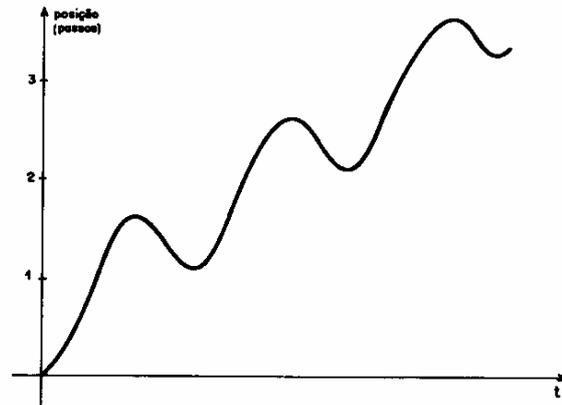


Figura 14 - Resposta de posição para frequência de pulsos elevada.

natural é inaceitável, recursos externos de amortecimento tanto elétrico como mecânico são utilizados.

5. SIMULAÇÃO DIGITAL

Para análise do comportamento do motor, utilizamos um computador digital, onde as equações diferenciais 4.a a 4.e que modelam o motor são resolvidas pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem. O motor simulado é do tipo híbrido, de duas fases, com as seguintes características:

- . Indutância dos enrolamentos $L = 11,2$ mH
- . Resistência dos enrolamentos $R = 5,0$ Ω
- . Corrente nominal dos enrolamentos $I = 1,2$ A
- . Constante de conjugado $K = 0,15$ N.m/A
- . Momento de inércia $J = 14,1 \cdot 10^{-6}$ N.m.s
- . Coeficiente de amortecimento $B = 1,2 \cdot 10^{-3}$ N.m.s
- . Ângulo de passo $\gamma = 1,8^\circ$

A figura 15 corresponde à resposta

de posição em função do tempo quando o motor está inicialmente em equilíbrio com as duas fases energizadas, e uma das fases é desenergizada. A figura 16 apresenta o comportamento das correntes nos enrolamentos, a corren-

te da fase desenergizada cai a zero evidentemente, e a corrente da fase que permaneceu energizada passa por um pequeno período transitório.

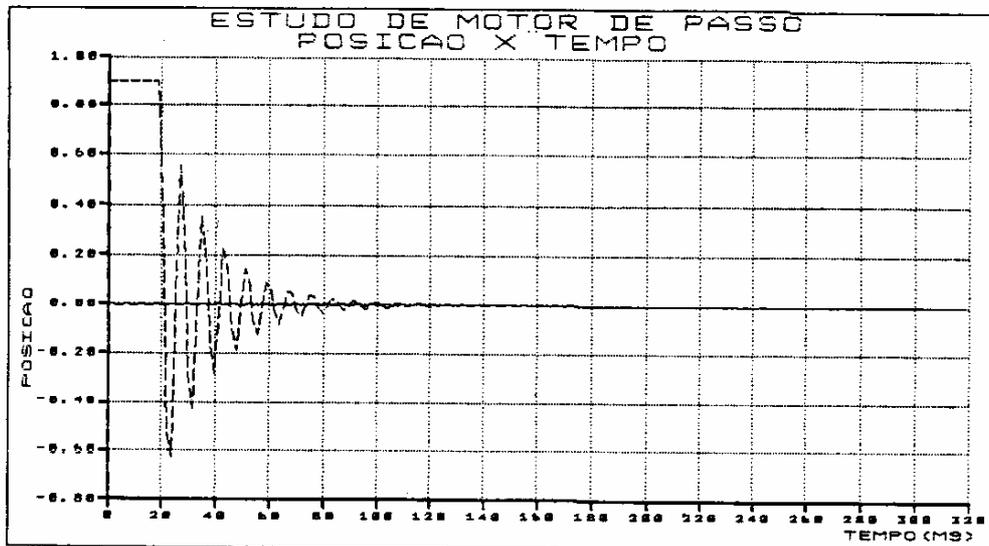


Figura 15 - Resposta de posição obtida na simulação digital quando as duas fases estão energizadas inicialmente e uma delas é desligada.

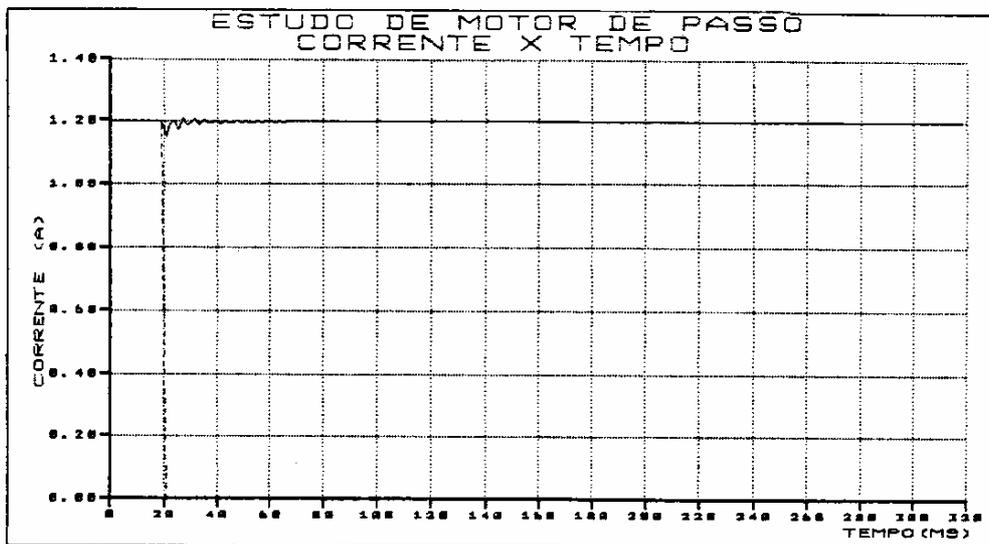


Figura 16 - Comportamento das correntes nas fases para situação da figura anterior.

A figura 17 apresenta a resposta de posição em função do tempo, quando inicialmente o motor está em uma posição de equili-

brio com apenas uma fase energizada, e um do momento a outra fase é ligada. Comparando as figuras 15 e 17, verificamos que o amorte

cimento para a segunda situação é bem maior que para a primeira, o que é de se esperar, pois com as duas fases energizadas, o conjugado motor é maior, levando a um tempo de

resposta de posição menor. A figura 18 mostra o comportamento das correntes nas fases para situação descrita na figura 17.

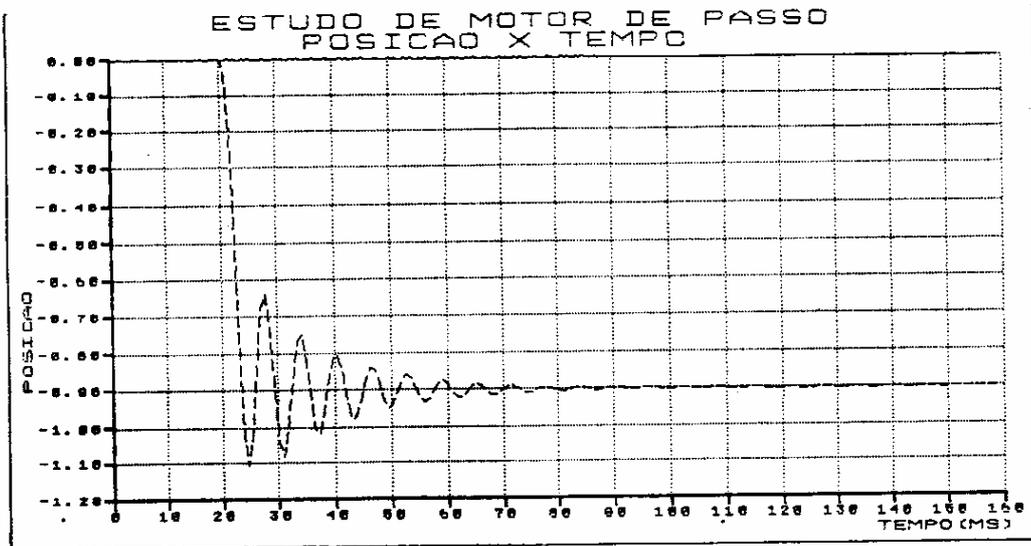


Figura 17 - Resposta de posição obtida na simulação digital quando uma fase está energizada inicialmente e a outra é ligada.

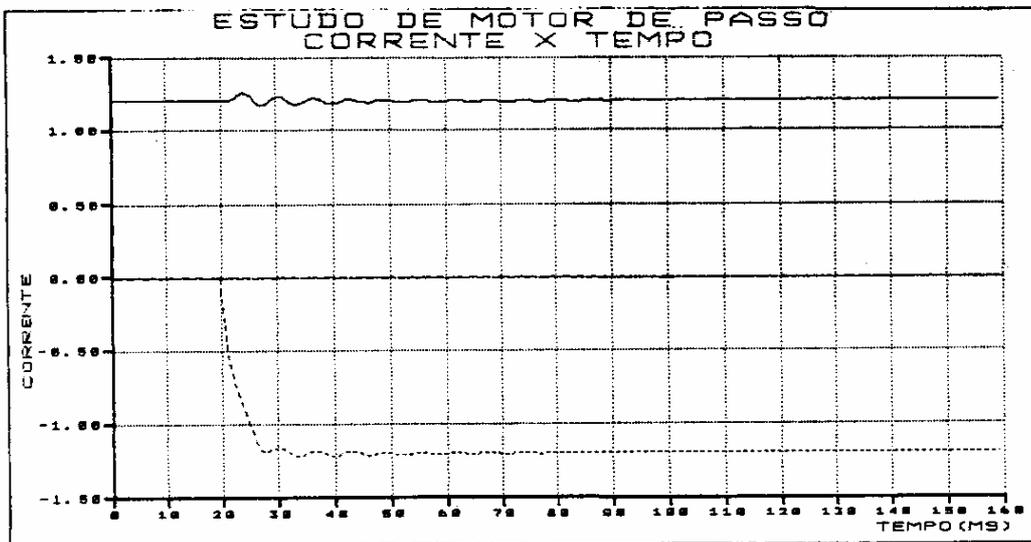


Figura 18 - Comportamento das correntes nas fases para situação da figura anterior.

5. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA VALIDADE DO MODELO TEÓRICO

Com o objetivo de verificar a validade do modelo teórico implementado, o mesmo motor de passo híbrido, que forneceu os da-

dos usados na simulação, foi ensaiado em laboratório.

A resposta de posição foi obtida através de um potenciômetro acoplado ao eixo do motor. O sinal do potenciômetro após uma

etapa de amplificação foi verificado através de um osciloscópio de memória. A figura 19

apresenta um diagrama de blocos da montagem prática.

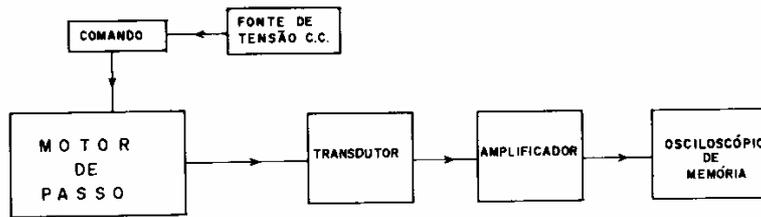


Figura 19 - Diagrama de blocos da montagem em laboratório.

O motor foi ensaiado de acordo com as duas situações descritas na simulação. Inicialmente, energizou-se as duas fases, e em dado instante uma delas foi desenergizada. A figura 20 corresponde à resposta de posição obtida. No segundo ensaio, com apenas uma fase energizada inicialmente, a resposta de posição obtida quando a outra fase foi conectada é vista na figura 21. O comportamento das correntes nas fases do motor foi observado, e resultou muito semelhante aqueles obtidos na simulação

tensas sobre o comportamento dinâmico do motor.

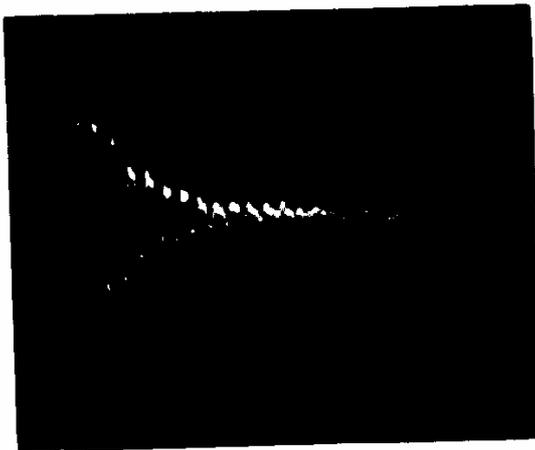


Figura 20 - Resposta de posição obtida em laboratório para situação correspondente à da figura 15. Vertical = 0,225 graus/divisão - Horizontal = 20 mseg/divisão.

Algumas distorções nas respostas obtidas nos ensaios experimentais são observadas quando comparadas com os resultados da simulação. É de nosso entendimento que o potenciômetro é o elemento responsável por essas distorções, dada à sua linearidade questionável para pequenos deslocamentos angulares.

A proximidade entre os resultados experimentais e os da simulação comprovam a validade do modelo utilizado e permite que o mesmo seja empregado em análises mais ex-

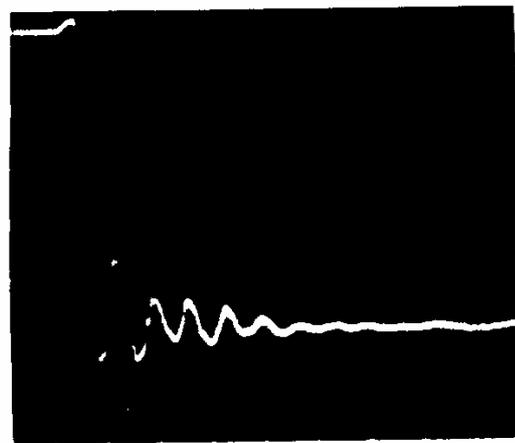


Figura 21 - Resposta de posição obtida em laboratório para situação correspondente à da figura 17. Vertical = 0,167 graus/divisão - Horizontal = 10 mseg/divisão.

6. CONCLUSÕES

No momento em que a demanda de motores de passo cresce paralelamente ao grande desenvolvimento dos sistemas de controle automático, consideramos oportuna a divulgação de características desses motores. Por outro lado, a possibilidade de contar com um modelo matemático que seja capaz de simular com a maior aproximação possível o comportamento do motor, se apresenta como ferramenta de grande valia na exploração de recursos que possam contribuir para a melhoria de desempenho dos mesmos. Da mesma forma, a verificação real do comportamento dos motores através de ensaios em laboratório é de grande importância. Assim é que durante o desenvolvimento desse trabalho, verificamos a validade do modelo matemático proposto através de ensaios práticos.

Com relação à resposta de posição de motor, verificamos que a forma como os en-

enrolamentos são energizados é um dos fatores determinantes no tempo de resposta. A função passo com apenas um enrolamento energizado apresenta um tempo de resposta maior que quando as duas fases permanecem energizadas ao mesmo tempo. Outro fator determinante no tempo de resposta é o momento de inércia. Motores com momento de inércia mais baixos que o utilizado no laboratório apresentam evidentemente, maior rapidez de resposta. É o caso dos motores com rotor a disco.

Finalizando, entendemos que estudos e pesquisas devem continuar com os objetivos: do aprimoramento do modelo matemático, da melhoria dos métodos de medida em laboratório, no sentido de reconhecer o comportamento exato dos motores de passo em todas as condições de operação, bem como do desenvolvimento de técnicas novas que permitam a sua otimização.

7. BIBLIOGRAFIA

- |1| - KUO, B.C., "Theory and Applications of Step Motors" West Publishing Co., Urbana, Illinois, 1974.
- |2| - ROBINSON, D.J. & TAFT, C.K., "A Dynamic Analysis of Magnetic Stepping Motors", IEEE Trans. Ind. Electron. Control Instrum., Vol. IECI-16, N° 2, Sept. 1969.
- |3| - ROGER, D. "Stepping Motors, Variations on a Theme", IEE Electronics & Power - pp. 467-471 - June 1985.
- |4| - CUNHA, H.J. "Tipos e Especificações de Motores de Passo", Revista C & I, pg. 24-32 - Dezembro 1983.
- |5| - KOMPASS, E.J. "Thin-Disk Rotor Improves Step Motors", Control Engineering, pg. 68-69, October 1983.
- |6| - DPIC - "Les Moteurs Pas a Pas, Leur Alimentation e Leur Commande" - Departement de Perfectionnement des Ingenieurs et Cadres - Nancy - France-1980.