



Instituto de Física "Gleb Wataghin" – UNICAMP  
F 609 – Instrumentação para Ensino  
Segundo semestre de 2007

## Relatório Final

### Motor Bifásico Partindo de uma Única Fase



Aluno: Tiago dos Santos RA: 011784  
(tsfisico@yahoo.com.br)



Orientador: Prof. Dr. Edson Bim  
(bim@dsce.fee.unicamp.br)

Coordenador: Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi

JUNDIAÍ  
29 de Novembro de 2007

## 1. Introdução

Este trabalho visa mostrar o campo girante criado por quatro espiras defasadas em  $90^\circ$  no espaço. Este campo girante foi criado a partir de uma única fase de 127V, utilizando um circuito RLC, gerando duas fases defasadas no tempo.

Este trabalho também mostra a transformação de energia elétrica em energia mecânica, pois a montagem realizada utiliza o princípio de um motor de indução monofásico com capacitor de regime permanente, ligado em uma rede elétrica alternada de 127V.

Este tipo de motor é muito utilizado em indústrias e em residências devido o seu funcionamento não ser tão complexo como, por exemplo, o liquidificador, enceradeiras, serras e lixadeiras. Geralmente ele é utilizado como motor de baixa potência. A grande vantagem do motor CA é poder ser ligado diretamente à rede elétrica residencial, pois ele utiliza apenas o efeito da corrente alternada para funcionar [2].

### - Importância Didática

Este experimento, além de mostrar o funcionamento de um tipo de motor, o estudante têm a oportunidade de investigar o porquê do giro do rotor (ou latinha de energético), surgindo questões: Por que o rotor gira nesta velocidade? Por que o rotor não gira se o capacitor não for acionado? E se eu utilizasse uma bateria (corrente contínua), este rotor iria girar?

Ao tentar responder estas questões, o estudante irá deparar com as leis de Ampère, Faraday e Lenz, utilização de fasores e questões relacionadas à mecânica.

O público alvo deste trabalho são estudantes do ensino médio, sendo uma experiência que pode ser utilizada para demonstrações em eletromagnetismo, bem como um aprofundamento em materiais ferromagnéticos, condutividade elétrica e o funcionamento de solenóides.

### - Originalidade

Este projeto foi baseado num relatório desta mesma disciplina sobre motor de indução trifásico realizado por Luiz Eduardo Ferreira Dias Jr. e orientado pelo Dr. Peter Alexander Schulz.

O que difere este projeto do já realizado é que a confecção do mesmo é mais viável por não necessitar de um autotransformador trifásico variável e por ser

ligado em uma rede monofásica, encontrada em qualquer escola, o que não acontece com a trifásica, facilitando sua demonstração.

- Lista de Materiais

Para a realização do mesmo, são utilizados os seguintes materiais:

- Quatro bobinas confeccionadas artesanalmente;
- Quatro núcleos de aço doce (AISI-1020) para preenchimento das bobinas;
- Um capacitor de  $5\mu\text{F}$ ;
- Um rotor tipo gaiola de esquilo fabricado em alumínio com núcleo preenchido com material ferroso;
- Uma lata de energético (feita de alumínio) vazia;
- Uma chave Phillips que servirá de eixo para a lata de energético;
- Dois rolamentos para melhor movimentação do rotor e da lata;
- Porta rolamento para a fixação do rotor e do eixo da latinha;
- Um interruptor paralelo, responsável pela partida do motor;
- Um interruptor simples para ligar o experimento;
- Cabos e tomada para ligação na rede;
- Base para montagem do experimento feito em madeira.
- Suporte para a fixação do núcleo da bobina.

- Observações

Meu orientador, o Prof. Dr. Edson Bim, concorda com os termos aqui estabelecidos para o projeto e declara que poderá dispor de todos os elementos necessários.

Exceções: Não há

Sigilo: Não solicita

## 2. Montagem Experimental

Para a realização deste projeto, a ponto inicial foi a confecção de um motor que fosse ligado em uma tensão alternada de 127V. Outro fator determinante das condições iniciais do projeto foi buscar informações sobre onde seria utilizado um rotor do tipo gaiola de esquilo (Squirrel Cage), pois, apesar de sua fácil construção, seria mais barato encontrar pronto em um “ferro velho”. Uma forma encontrada para substituir este rotor foi à confecção de um rotor utilizando uma lata de energético que têm a vantagem de ser de baixo custo e despertar uma maior curiosidade nos estudantes.

Com os materiais descritos, foi montado o experimento da figura 2, utilizando a figura 1 como um diagrama esquemático.

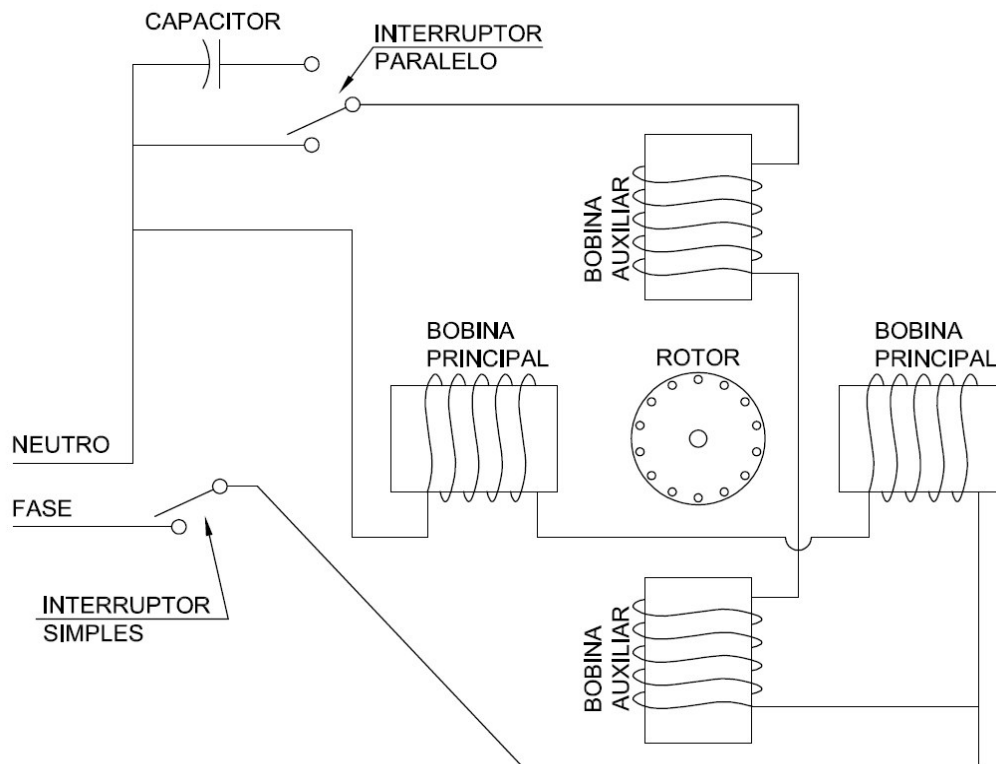


Figura 1 – Montagem esquemática do experimento

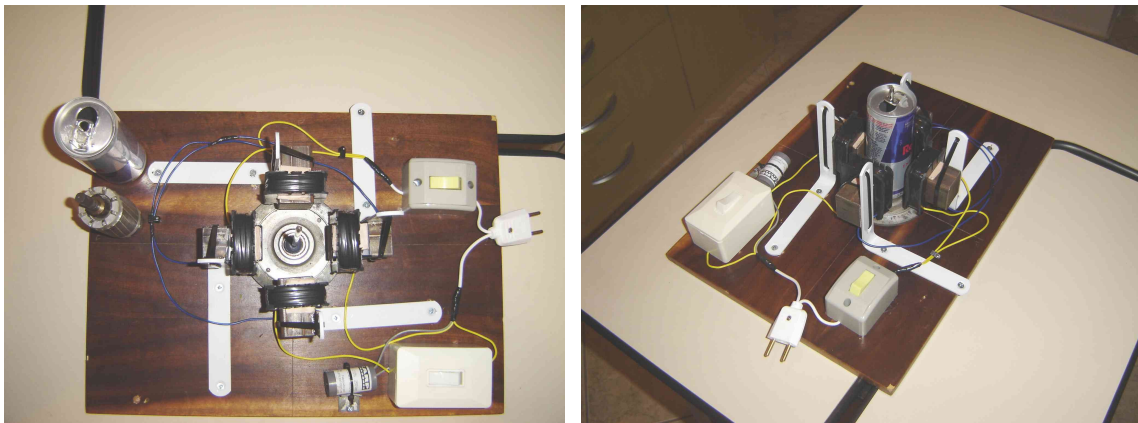


Figura 2 – Montagem experimental

Em um “ferro velho” na cidade de Jundiaí foi encontrado um rotor do tipo gaiola de esquilo (figura 3a) com diâmetro de 40mm e a altura de seu núcleo de 45mm. Uma latinha de energético foi utilizada como uma forma mais barata e mais

funcional pedagogicamente para a construção deste segundo tipo de rotor (figura 3b).

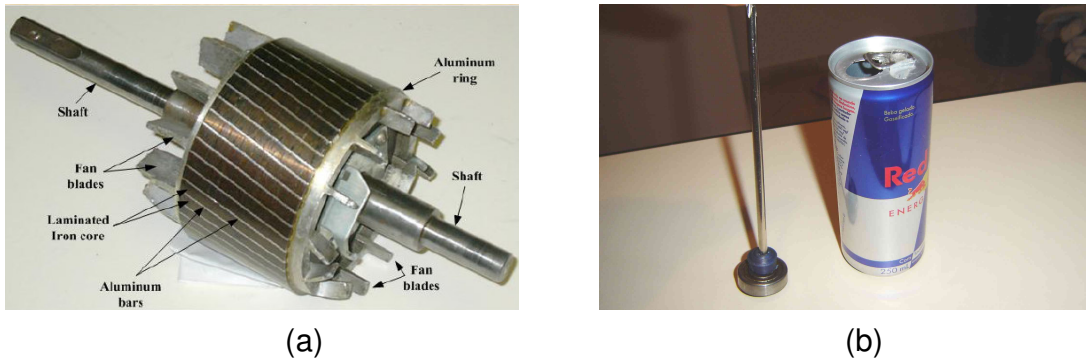


Figura 3 – (a) Rotor tipo gaiola de esquilo. (b) Lata de energético utilizada como rotor

Com as medidas dos rotores definidas, foi confeccionadas 4 bobinas idênticas com seção retangular de 32mm de largura por 40 de altura. Suas especificações são:

Números de espiras: 1200

Resistência: 76  $\Omega$

Impedância: 90 mH sem núcleo e 200 mH com núcleo

Fio condutor: Seção AWG #30 de cobre

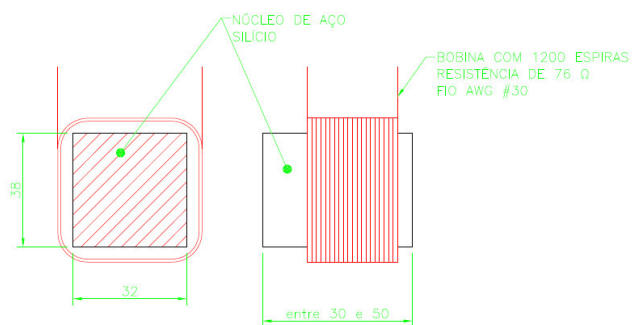
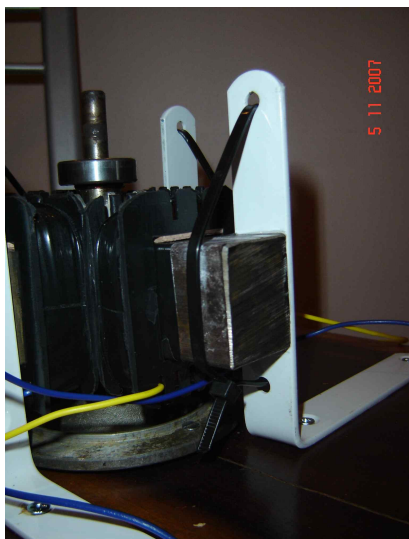


Figura 4 – Bobina com núcleo de aço fixa no suporte

Para se ter uma boa defasagem no tempo (perto de 90°) entre a fase auxiliar e a fase principal, foi acrescentado na fase auxiliar, um capacitor de 5mF.



Figura 5 – Capacitor

### 3. Dificuldades Encontradas

Para a fabricação da bobina foi muito difícil encontrar um lugar que vendesse fio de cobre envernizado com bitola AWG #30. Isto foi possível com a colaboração da empresa Gauss Transformadores, situada em Campinas, que confecciona, entre outros produtos, fonte de tensão. Como esta empresa dispunha de todo o material necessário, a bobina foi confeccionada conforme as especificações indicadas no item 2. O núcleo destas bobinas também não foi tarefa das mais fáceis, pois para a confecção dos mesmos foi necessário comprar uma barra quadrada de 40mm e usinada para 32mm em um de seus lados, para encaixar no carretel da bobina.

O rotor foi retirado de um motor de esmeril de pequeno porte (potência não indicada no mesmo). Como ele foi comprado em um ferro velho, o custo foi baixo, mas o restante das peças, apesar de seus baixos valores individuais, deve-se ficar atento para não gastar mais do que o esperado.

### 4. Descrição

Quando uma corrente elétrica atravessa um fio condutor surge nas proximidades um campo magnético cuja densidade pode ser calculada pela lei de Ampère. Se uma superfície metálica é submetida à presença deste campo magnético surgem correntes circulares induzidas que tendem a contrapor qualquer variação do fluxo magnético, de acordo com a lei de Faraday-Lenz. Estas correntes interagem com o campo e dão origem a forças magnéticas atuando sobre o corpo metálico.

Se um campo magnético for aplicado em uma direção tal, que forme um ângulo não nulo com a reta normal às áreas das espiras, a força magnética induzida sobre o corpo metálico tenderá a alinhar a normal da espira com o vetor densidade de campo. Sendo assim, se a superfície metálica for presa a um eixo e submetida à presença de um campo magnético girante, perpendicular ao eixo, surgirá na superfície metálica um movimento giratório e teremos um motor elétrico.

O funcionamento deste aparato está baseado na teoria de campos girantes, a mesma teoria utilizada em motores bifásicos com alimentação monofásica. O sistema bifásico clássico consiste em um transporte de energia utilizando dois condutores, cujas tensões senoidais estão defasadas de 90 graus no tempo, e um condutor neutro de equilíbrio, mas é usado em poucas aplicações. Quando é referido um motor bifásico, portanto, deseja-se dizer que o mesmo possui dois enrolamentos defasados espacialmente de 90 graus que deveriam ser, teoricamente, alimentados por uma rede bifásica. [6]

Para que seja criado este campo girante é necessário duas ou mais fases defasadas no tempo. Como utilizamos uma rede monofásica, para obter esta defasagem, foi feito, paralelo ao enrolamento principal do estator (parte fixa do experimento), um enrolamento auxiliar defasado fisicamente em 90° contendo um capacitor para obter um adiantamento desta fase em relação ao principal. Este estator possui uma impedância apreciável para manter baixa a corrente de funcionamento.

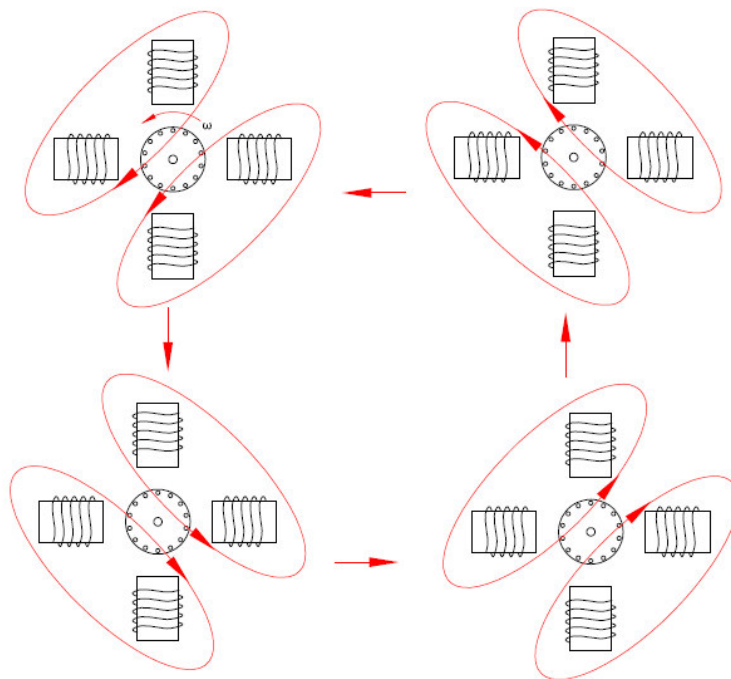


Figura 6 – Princípio de funcionamento de um campo girante bifásico

Primeiramente, vamos descrever o experimento utilizando a lata de energético como rotor, indicado no diagrama esquemático do experimento (figura 1).

Inicialmente, o interruptor simples está na posição aberto, com isto, a corrente não circula pelo circuito. Quando ligamos este interruptor, nada é observado, pois, apesar de circular corrente no circuito, as bobinas auxiliares e principais estão ligadas numa tensão que possui a mesma fase, não gerando um campo magnético que proporcione a rotação da latinha. Quando o interruptor paralelo é alterado de posição, a corrente começa a circular através do capacitor, fazendo com que a corrente desta fase auxiliar seja defasada no tempo em relação a corrente da fase principal, obtendo, desta forma, o giro da latinha. A figura abaixo mostra a defasagem destas correntes.

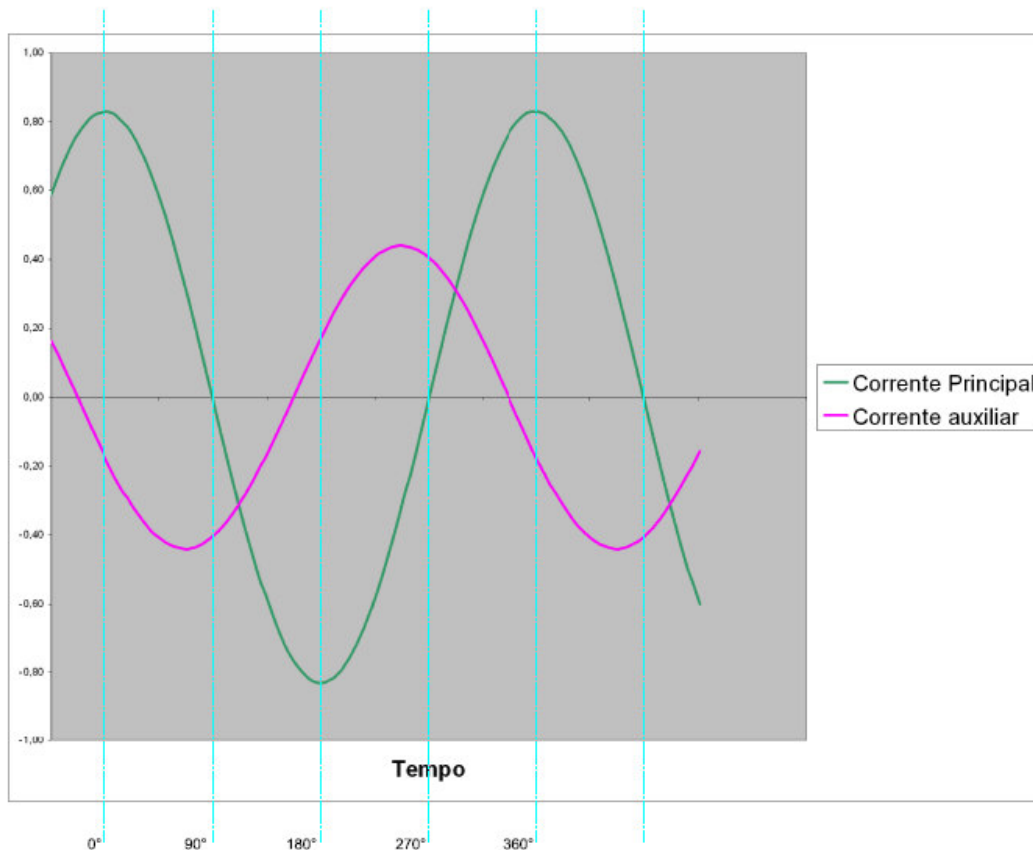


Figura 7 – Corrente Principal e Auxiliar defasadas no tempo

Este mesmo fenômeno ocorreu quando utilizamos o rotor que é utilizado comercialmente (em aparelhos elétricos domésticos), só que a rotação é maior, bem como seu torque. Isto se deve por ser de uma geometria mais adequada e por utilizar um material ferromagnético em seu núcleo que possui uma maior permeabilidade magnética em comparação com o ar, facilitando o fluxo magnético.



Com a finalidade de verificar se os componentes utilizados na parte estática (estator) conseguem criar um campo girante, foi resolvido o circuito RLC abaixo, para se obter o ângulo de defasagem das duas correntes (Auxiliar e Principal) que atuam sobre as bobinas.

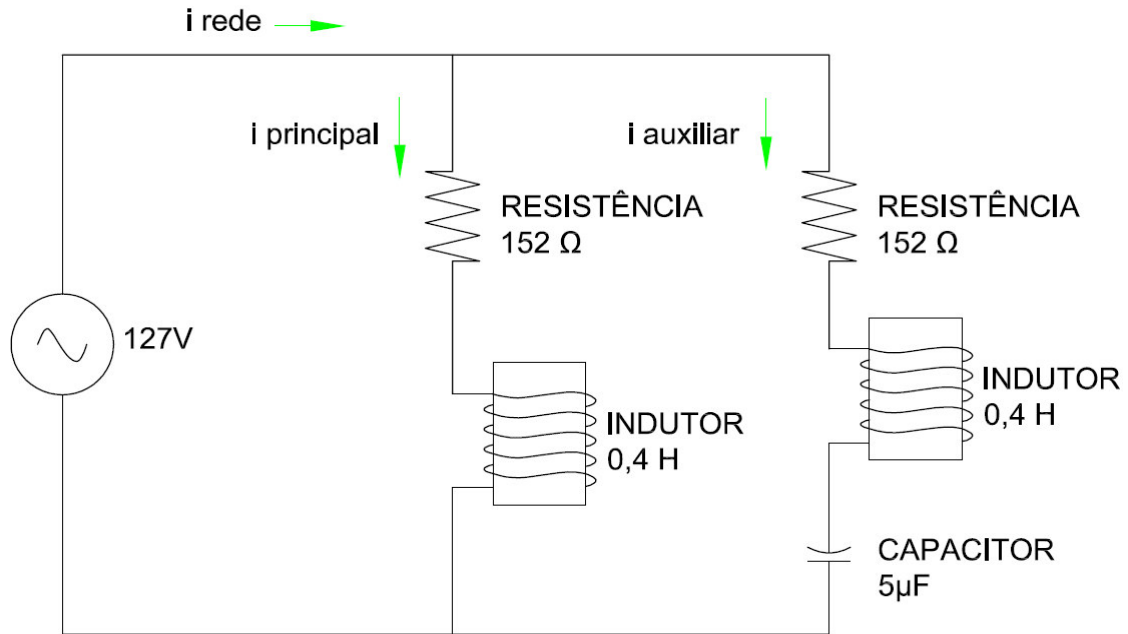


Figura 8 – Circuito equivalente do estator

- Fase Principal / Circuito RL / Corrente Atrasada

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0,4 = 151 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{(R^2 + X_L^2)} = \sqrt{(152^2 + 151^2)} = 214 \, \Omega$$

- Corrente

$$i_P = \frac{V}{|Z|} = \frac{180}{214} = 0,83 \, \text{A}$$

- Ângulo de Fase

$$\tan \varphi_P = \frac{X_L}{R} = \frac{151}{152} = 0,99 \quad \varphi_P = 44,8 \cong 0,78 \, \text{rad.}$$

$$i_P = 0,83 \cdot \sin(120 \pi t - 0,79) \text{ em relação ao eixo das abscissa.}$$

- Fase Auxiliar / Circuito RLC / Corrente Adiantada

$$X_L = \omega \cdot L = 151 \, \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 530 \, \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{\left( R^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2 \right)} = \sqrt{152^2 + (-379)^2} = 408 \, \Omega$$

- Corrente

$$i_a = \frac{V}{|Z|} = \frac{180}{408} = 0,44 \, A$$

- Ângulo de Fase

$$\tan \theta_a = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{151 - 530}{152} = -2,49 \quad \theta_a = -68^\circ \cong -1.19 \, \text{rad}$$

$$i_a = 0,44 \cdot \sin(120 \pi t - 2,76)$$

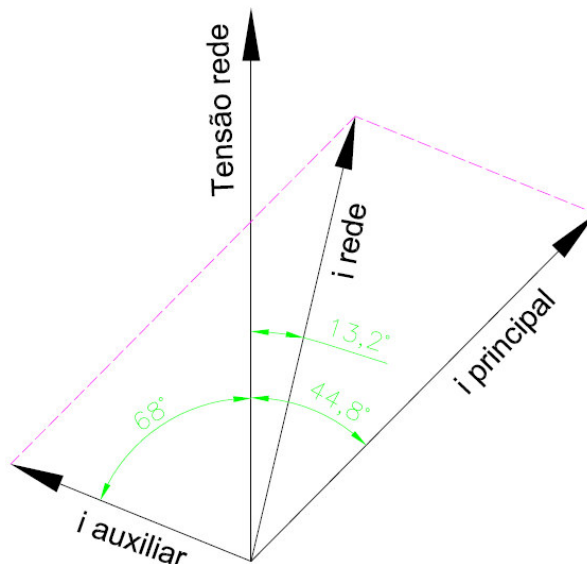


Figura 9 – Diagrama de Fasores do estator

## **5. Resultados e Discussão**

Com a montagem experimental realizada foi possível obter ótimos resultados. O experimento funcionou de forma satisfatória, criando um campo girante capaz de girar a latinha de energético e também o rotor.

Foi observado que quando mais próximo à bobina fica do rotor, maior é o fluxo magnético que atravessa o rotor, fazendo com que este rotor gire com uma maior rotação e torque.

Devido ao diâmetro do fio condutor da bobina ser muito pequeno, a potência que é criada pelo efeito Joule pode danificar a mesma, portanto deve-se tomar cuidado com o tempo que o experimento fica ligado de forma contínua.

Para facilitar a demonstração de como a distância da bobina influencia no rendimento do motor, seria conveniente criar uma base móvel para a bobina.

## **6. Conclusão**

Este experimento foi de grande valia, pois além de por em prática uma parte dos conhecimentos adquiridos no curso de graduação.

Apesar de despender muito tempo para a conclusão, foi possível notar quais são as dificuldades encontradas quando procuramos demonstrar experimentalmente uma teoria da física. Mesmo sendo uma teoria tão conhecida e comumente aplicada em nosso cotidiano, várias dificuldades foram encontradas, pois nos deparamos com situações nas quais temos que realizar certas tarefas que não fazem parte de nosso currículo e de nossas habilidades.

Um exemplo para ilustrar esta situação foi à confecção do núcleo da bobina e do eixo de rotação da lata de energético, sendo necessário à utilização de torno, furadeira e bancada para a fabricação, habilidades não desenvolvidas no curso.

Portanto, para a formação de um profissional/educador, além das matérias curriculares, é necessário desenvolver no aluno autonomia, para que ele procure uma constante aprendizagem, mas não perdendo o vínculo com a prática, pouco desenvolvida no curso.

## **7. Declaração do orientador**

O coordenador aceitou o projeto e comentou que, neste trabalho, poderia ser utilizada uma bobina que gerasse um fluxo magnético de maior intensidade para que a fase auxiliar, que esta ligada ao capacitor, fosse desligada após a partida do motor; desta forma o motor funcionaria com uma única fase, assim como um motor de indução monofásico de fase dividida com capacitor de partida.

## 8. Agradecimentos

Agradeço a colaboração do Prof. Dr. Edson Bim pela ter contribuído na orientação e nas explicações dos fenômenos envolvidos no experimento, viabilizando a realização deste projeto.

Agradeço, também, ao Prof. Dr. José Joaquín Lunazzi pela compreensão e por coordenar esta disciplina que nos coloca numa situação mais próxima da realidade que iremos encontrar em nossa vida profissional. Neste mesmo patamar, agradeço ao meu pai (in memoriam) por ter me guiado até o último momento de sua vida.

## 9. Referências

[1] Kosow, Irving Lionel – Máquinas Elétricas e Transformadores – Porto Alegre, SP, Editora Globo, 1977.

[2] Almeida, José Francisco Marcondes de – Contribuição ao estudo do motor de indução monofásico com capacitor chaveado – Campinas, SP, 2000

[3]

<http://www.grupozug.com.br/ENGEL/motor%20de%20inducao%20monofasico.htm>

[4] [http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco/textos/SEE\\_-\\_Maquinas\\_de\\_inducao\\_monofasicas.pdf](http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco/textos/SEE_-_Maquinas_de_inducao_monofasicas.pdf)

[5] [http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/Eletrotecnica/Apostila\\_MI.pdf](http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/Eletrotecnica/Apostila_MI.pdf)

[6] Neri Junior, Almir Laranjeira – Acionamento suave do motor de indução bifásico através de eletrônica de potência – Campinas, SP, 2005

## 10. Apêndice

A – Referência [3]

Nesta referência podemos encontrar os diferentes tipos de motores de indução monofásicos.

B – Referência [4]

É apresentada, nesta referência, uma teoria sobre os motores de indução e algumas características construtivas.

C – Referência [5]

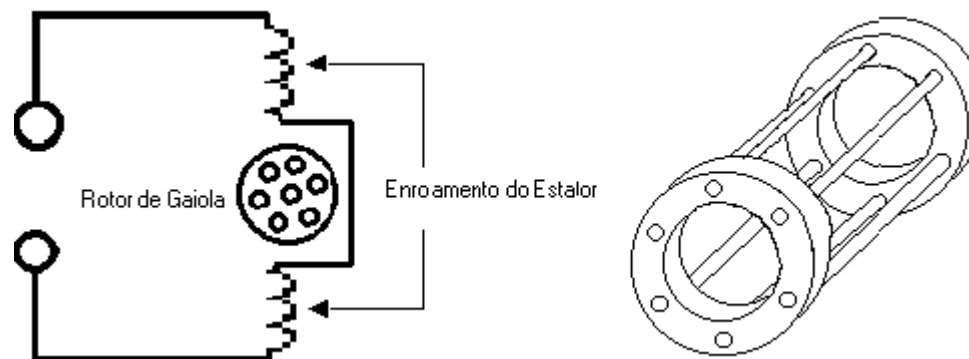
É abordada a teoria de campo girante e a defasagem entre fases de forma satisfatória, mas para uma alimentação trifásica.



## MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO.

Os motores de indução monofásicos, são em regra construídos para potências inferiores a um HP, para serem utilizados em circuitos de baixa tensão, de distribuição.

Tais motores, contudo, têm sido construídos para capacidades de 5 e 10 HP para fins especiais, onde não se podem empregar motores trifásicos. Sob o aspecto construtivo, estes motores são semelhantes aos motores polifásicos, possuindo rotores do tipo de gaiola de esquilo.



### Funcionamento:

O rotor possui um bobinamento, tipo gaiola de esquilo, representado por condutores duplos, pois é percorrido por duas correntes que podem ser consideradas independentes.

Na realidade, tanto os condutores mais de fora como os mais de dentro, têm igual comportamento e a corrente final é a associação das duas correntes supostamente separadas.

Para simplificar, supõe-se que o enrolamento do rotor tenha o mesmo número de espiras do enrolamento do estator.

Quando se aplica uma f.e.m.  $E_1$  Monofásica, ao estator, origina-se uma corrente magnetizante que provoca o nascimento de um fluxo de transformador  $\Phi$  que abraça os bobinamentos do estator e do rotor.

Estes dois bobinamentos atuam como o primário e o secundário de um transformador e, como o bobinamento secundário está fechado em curto-circuito, aí circula uma corrente de forte intensidade, porém, sem produzir um binário motor capaz de por a máquina a girar em qualquer sentido.

No motor de indução monofásico, por conseguinte, à velocidade de sincronismo, há um campo girante de valor invariável que se move à velocidade síncrona tal como no motor polifásico.

### Teoria do duplo campo girante.

Pode-se dar uma outra explicação para o funcionamento do motor de indução monofásico.

A f.m.m. alternativa monofásica, gerada no bobinamento do estator, pode ser decomposta em duas forças magnetomotrizes rotativas que se deslocam em sentidos opostos, à velocidade síncrona, tendo cada qual a metade da amplitude da força única magnetomotriz.

Cada uma destas forças magnetomotrizes produz seu próprio campo rotativo.

Desenvolver-se-á um momento de torção positivo no sentido da rotação e um momento de torção mais pequeno em sentido oposto.

O rotor assumirá uma velocidade, de movimento acelerado, até aproximar-se da velocidade de sincronismo.

### Tipos de motores de indução monofásicos

**Motores com pólos amortecedores** : O motor com pólos amortecedores vem a ser um motor de indução monofásico, dotado de um bobinamento auxiliar, não isolado e posto permanentemente em curto-circuito, o qual se encontra deslocado quanto à sua posição magnética, em relação ao bobinamento principal.

Os punçõamentos do estator formam pólos salientes e as faixas de cobre, de baixa resistência ôhmica, ou bobinas amortecedoras, constituem um circuito fechado que circunda mais ou menos a metade de cada pólo.

Quando o fluxo em um pólo de estator está crescendo de valor, induzem-se correntes na bobina amortecedora que retardam o crescimento do fluxo naquele mesmo pólo. Há portanto, um leve desvio de fluxo da seção não amortecida para a seção amortecida do pólo e o rotor recebe um pequeno aumento de torção positiva que o faz mover-se no sentido indicado pela seta.

As máquinas dotadas de pólos amortecedores são utilizadas para acionares pequenos ventiladores ou finalidades semelhantes onde se precisa de momentos de torção de muito pequeno valor.

**Motores com divisão de fase** : Um motor de fase dividida vem a ser um motor de indução monofásico, equipado com um bobinamento auxiliar, o qual se encontra deslocado com respeito ao bobinamento principal quanto à posição do campo magnético.

Eletricamente, este bobinamento auxiliar acha-se ligado em paralelo com o bobinamento principal.

Se os dois bobinamentos do estator forem ligados a uma fonte de alimentação monofásica, de modo que a fase no 1 fique ligada diretamente e a fase no 2 em tempo, com o gerado pela fase no 1 e produzirá, por isso, algum momento de torção aproveitável para dar arranque ao motor.

Quando a rotação do motor chega a 70% da velocidade de sincronismo, o bobinamento de arranque (fase no 2) pode ser aberto por uma chave acionada pela força centrífuga e o motor passa a funcionar como máquina monofásica, à base da fase no 1.

**Motor com resistência de partida** : O motor com resistência de partida vem a ser uma máquina com fase dividida, que tem uma resistência ligada em série com o bobinamento auxiliar.

**Motor com arranque capacitivo** : O motor com arranque capacitivo é também uma forma de motor com fase dividida, que dispõe de um condensador ligado em série com o bobinamento auxiliar.

Este circuito auxiliar abre-se assim que o motor chega a uma pre-determinada rotação.

Por meio de tal artifício, conseguem-se momentos de arranque até 4 vezes maiores que o respectivo momento de plena carga.

**Motores capacitores** : Nos motores capacitores, obtém-se a divisão da fase por meio de uma capacitância, em vez de se usar uma resistência.

O bobinamento auxiliar permanece continuamente ligado, de modo que o fator de potência, à plena carga, tem um valor próximo à unidade.

Quando se precisa de um momento de torção de arranque maior pode ligar-se no instante da partida, em paralelo com o capacitor fixo  $C$ , um segundo capacitor  $C'$ , o qual se desliga por meio da chave  $S$ , logo que o motor adquire certa velocidade.

**Motor de indução com arranque de repulsão** : O motor simples de repulsão, pode desenvolver momentos de torção na partida quatro ou cinco vezes mais poderosos que o de plena carga, mas possui a característica da variação da velocidade igual à do motor-série c.c e apresenta a tendência de correr com velocidades exageradas quando sob pequenas cargas.

Seu estator tem um bobinamento monofásico, enquanto que o rotor tem um bobinamento distribuído, ligado a um coletor que possui um jogo de escovas posto em curto circuito e montado a um dado ângulo com respeito ao campo do estator. O motor, desta maneira, comporta-se como um simples motor de repulsão.

Colaboração : [O mundo da eletrônica.](#)

# Máquinas de indução monofásicas

Gil Marques  
2005

## Conteúdo

- Introdução
- Constituição
- Princípio de funcionamento
- Circuito equivalente
- Características
- Métodos de arranque
  - Condensador de arranque
  - Enrolamento de arranque simples
  - Espira de sombra

## **Introdução**

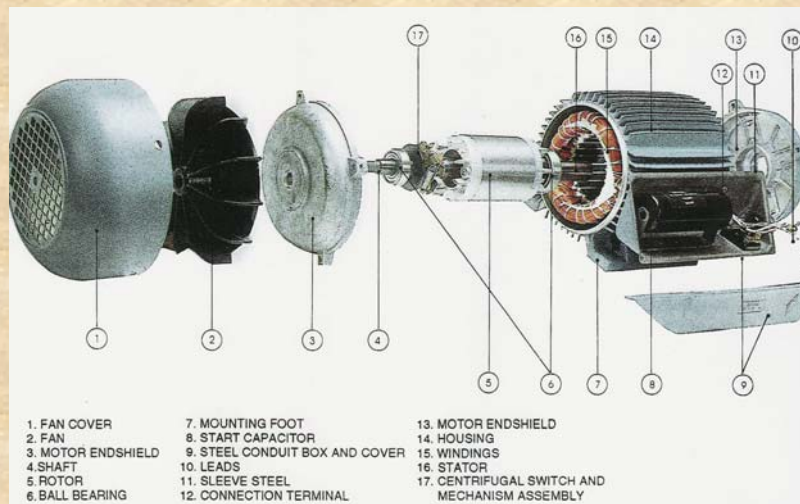
- O motor de indução monofásico é o motor mais usado em aplicações domésticas como frigoríficos, máquinas de lavar, relógios, compressores, bombas, etc.
- A potência vai até 10 HP
- Acima de 1HP têm menor binário de arranque, são mais caros e mais ruidosos que os motores trifásicos

## **Introdução (cont.)**

- Tem dois enrolamentos no estator colocados perpendicularmente
  - Um é o principal
  - O outro é o auxiliar ou de arranque
- Consoante o tipo de arranque tem designações diferentes e características e aplicações diferentes
- É difícil obter correntes desfasadas de  $90^\circ$  a partir de uma fonte monofásica



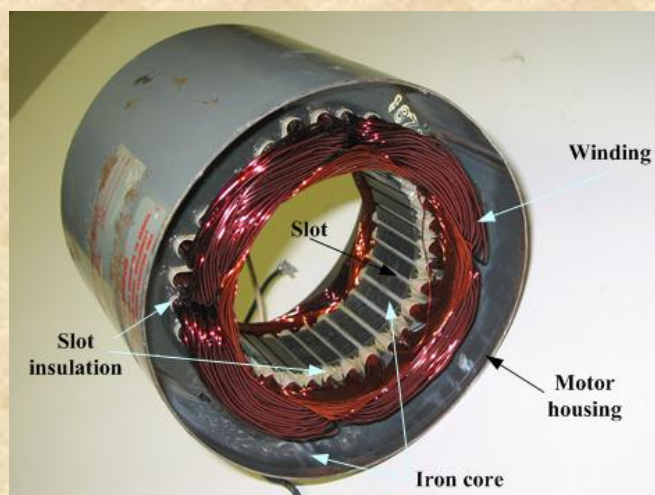
## Constituição:



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

5

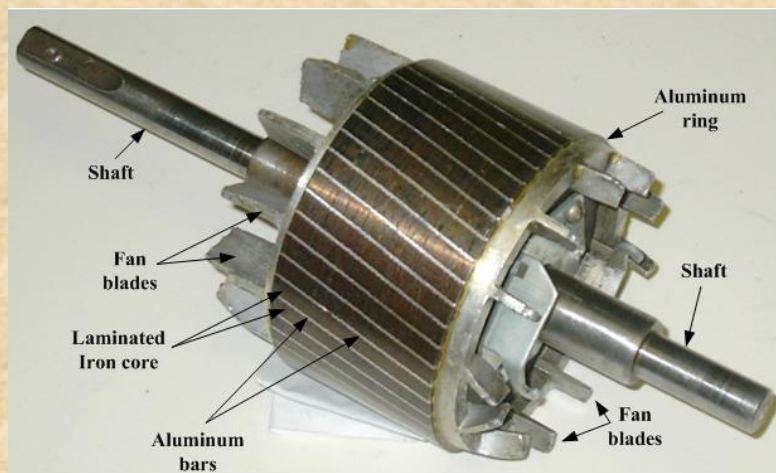
## Constituição do estator



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

6

## Constituição do rotor

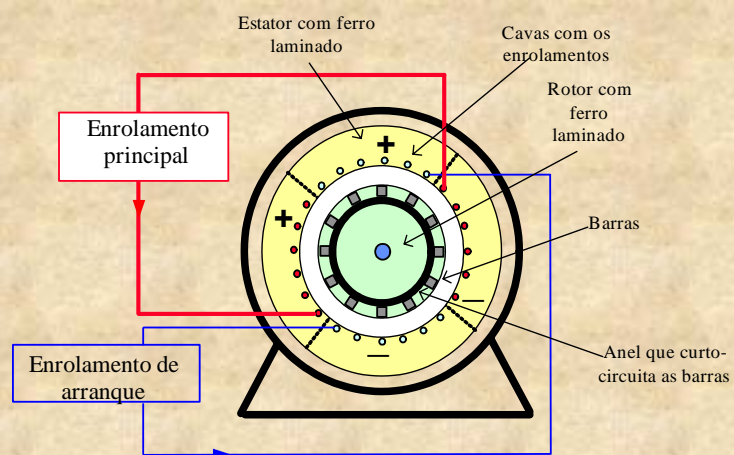


Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

7

## Constituição

- É na realidade um motor bifásico



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

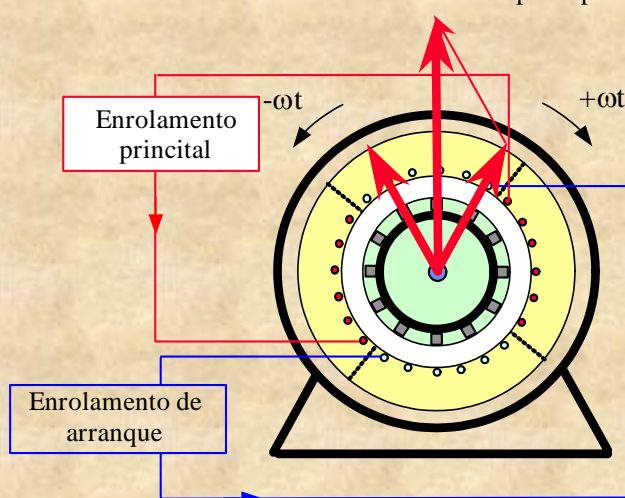
8

## Princípio de funcionamento

- O enrolamento principal monofásico produz um campo pulsante
- Matematicamente o campo pulsante pode ser decomposto em dois campos girantes rodando em oposição
- A interação entre estes campos e as correntes induzidas no rotor produzem binários opostos

## Decomposição do campo pulsante

Fluxo do enrolamento principal

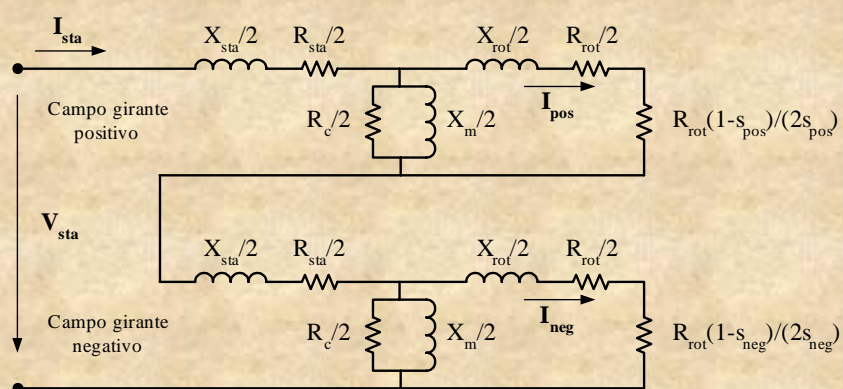


## Escorregamentos

$$s_{pos} = s = \frac{N_{sin} - N}{N_{sin}} = 1 - \frac{N}{N_{sin}}$$

$$s_{neg} = \frac{N_{sin} + N}{N_{sin}} = 1 + \frac{N}{N_{sin}} = 2 - s$$

## Circuito equivalente



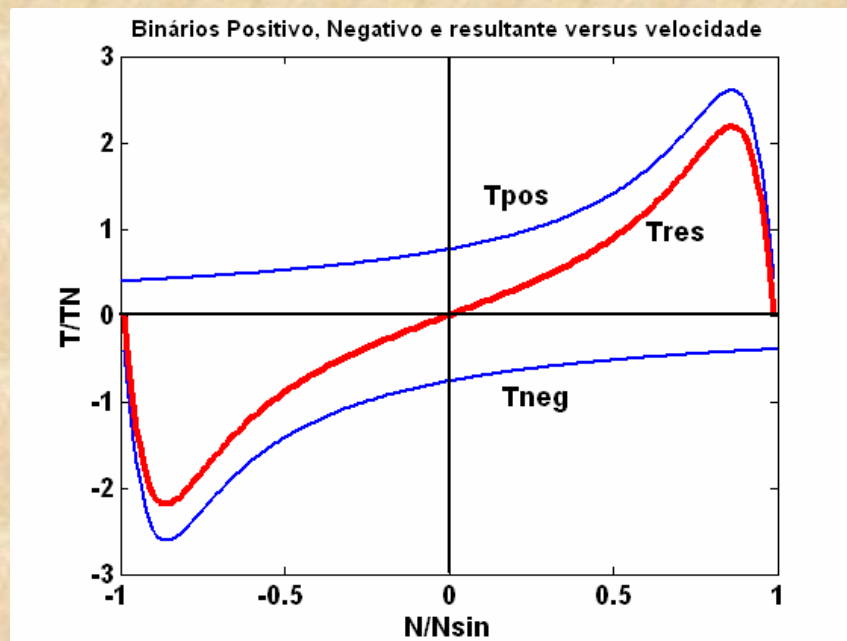
## Expresões

- Potência de entrada:

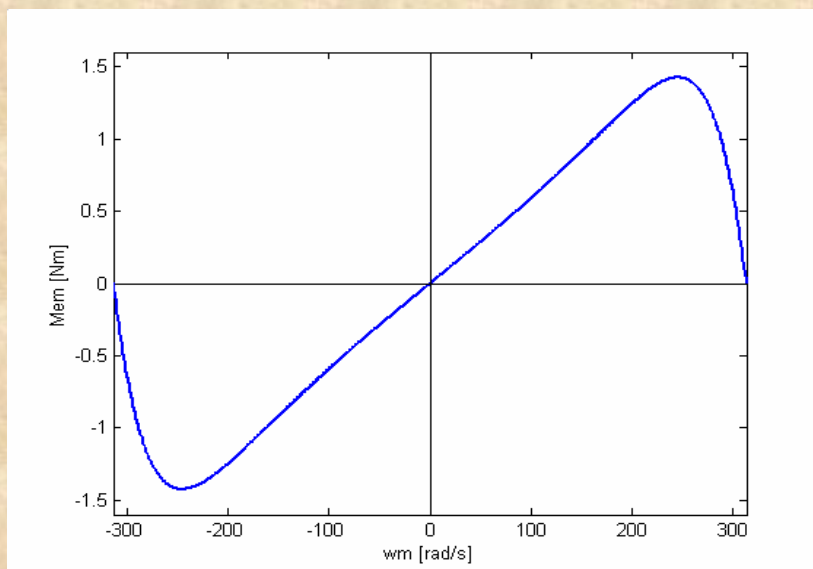
$$S_{in} = V_{sta} I_{sta}^*$$

- Potência de saída:

$$P_{dev} = |I_{pos}|^2 \frac{R_{rot}}{2} \frac{1-s_{pos}}{s_{pos}} + |I_{neg}|^2 \frac{R_{rot}}{2} \frac{1-s_{neg}}{s_{neg}}$$



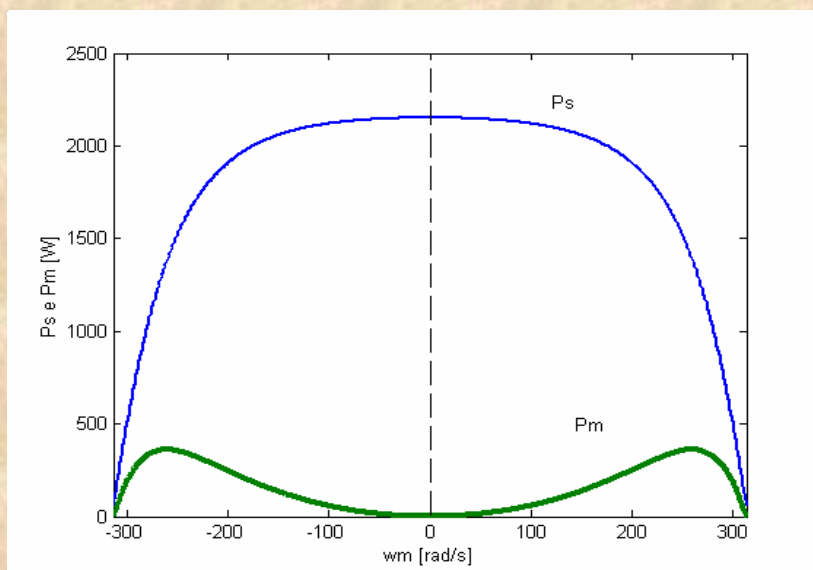
## Binário versus velocidade



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

15

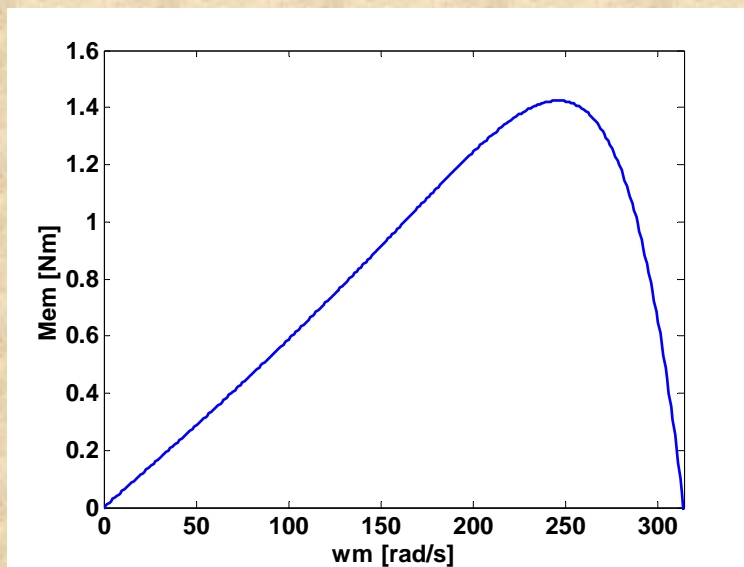
## Potência de entrada $P_s$ e de saída $P_m$



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

16

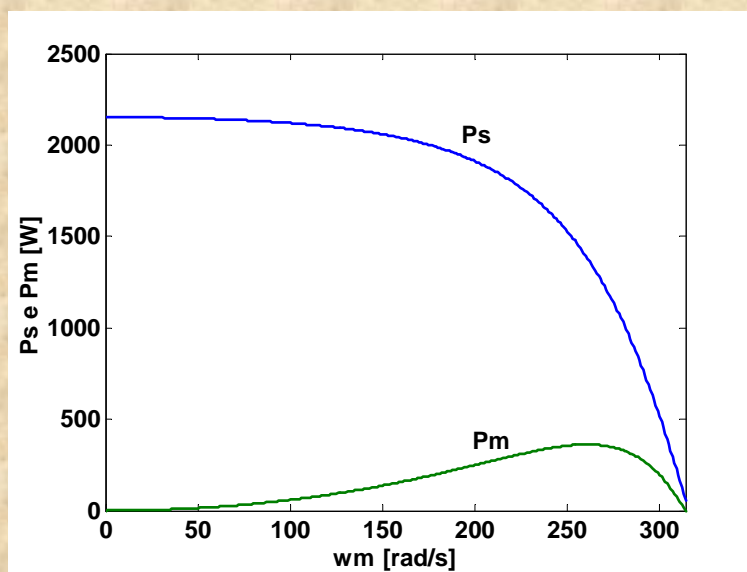
## Binário versus velocidade



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

17

## Potência de entrada e de saída



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

18

- Nas condições de circuito monofásico o motor não arrancará.
- Se o motor for accionado para fora da velocidade nula ele arrancará no sentido da velocidade inicial
- Para que o motor possa arrancar é necessário dispor de um circuito auxiliar disposto a  $90^\circ$  no espaço em relação ao principal e alimentado por uma corrente também desfasada de  $90^\circ$  no tempo

## Métodos de arranque

- **A diferença de fase é obtida através de:**
  - **uma resistência,**
  - **uma indutância, ou**
  - **Um condensador**

**Em série com o enrolamento de arranque.**

- **O mais vulgar é usar um condensador em série com o enrolamento de arranque.**



## Motor de indução monofásico

Quando o motor alcançar a velocidade de operação, um interruptor centrífugo desliga o circuito do enrolamento de arranque.

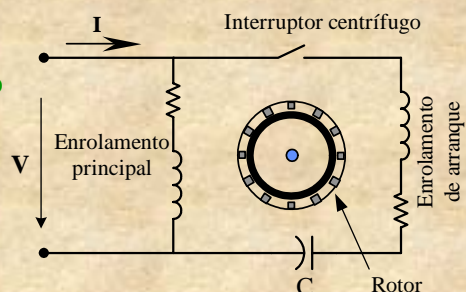


Figura: Esquema do motor de indução monofásico.

## Motor de indução monofásico

- É necessário o interruptor centrífugo porque a maioria dos motores utiliza um condensador electrolítico barato que pode ser percorrido por correntes alternadas durante apenas um curto espaço de tempo
- Um condensador apropriado produz aproximadamente uma desfasagem de  $90^\circ$  e consequentemente um grande binário de arranque.

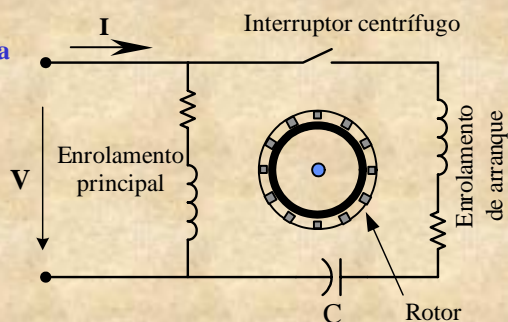


Figura: Esquema do motor de indução monofásico.

## Motor de indução monofásico

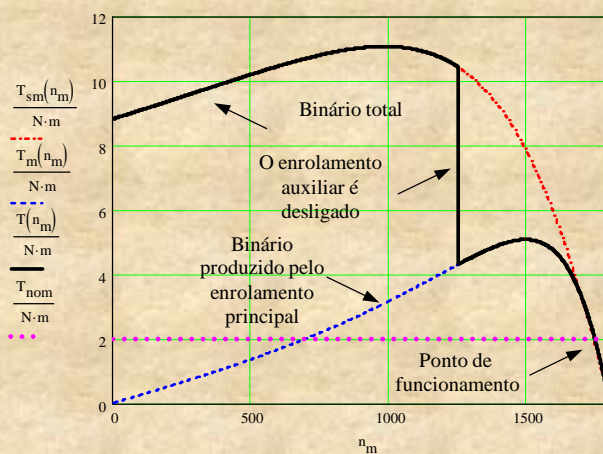


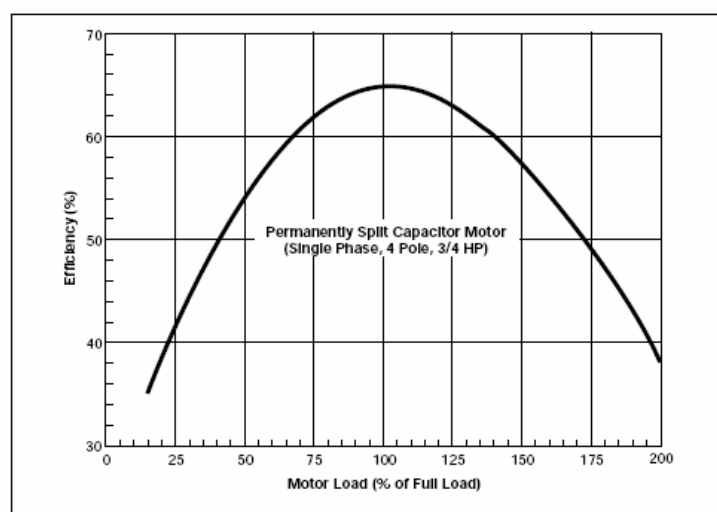
Figura: Característica Binário velocidade de um motor de indução monofásico pequeno

Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

23

## Rendimento vs. Carga

Figure 10. Motor Efficiency vs. Motor Load

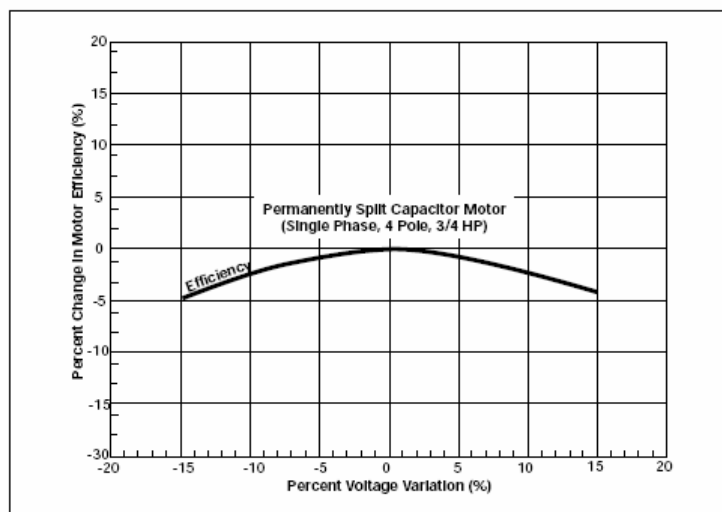


Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

24

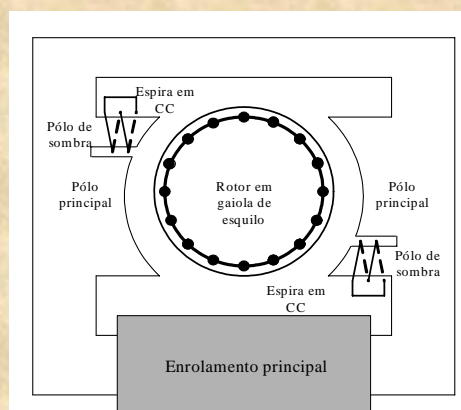
## Variação do rendimento com a tensão

Figure 11. Effect of Voltage on Motor Efficiency

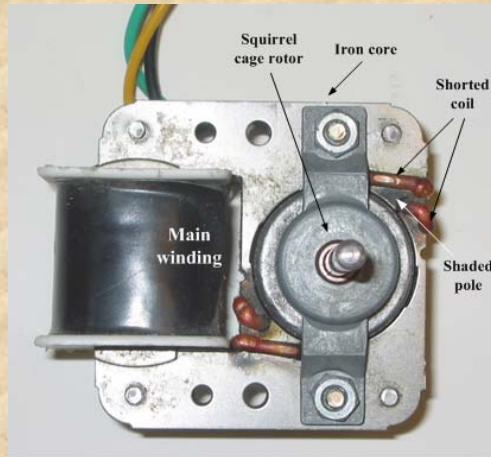


## Motor de indução monofásico de espira de sombra

- O motor tem dois pólos salientes que irão ser percorridos por fluxos alternados.
- Cada pólo tem uma espira em curto-circuito.



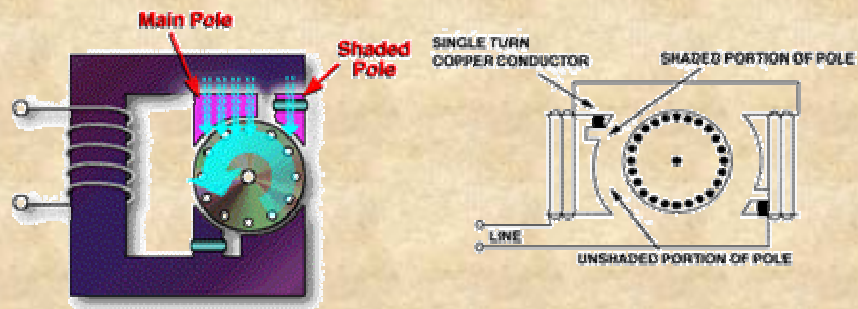
## Motor de indução monofásico de espira de sombra



Motor de espira de sombra para ventilador doméstico.

Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

27



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

28

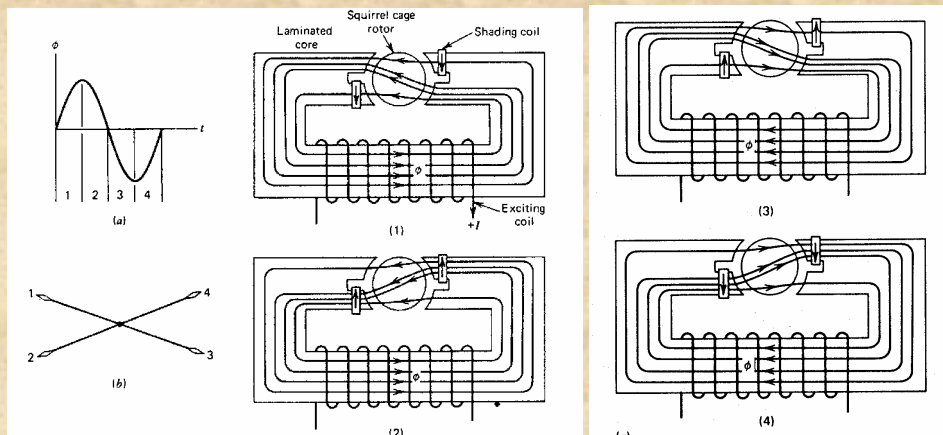
## Motor de indução monofásico de espira de sombra

- É um método menos eficiente, mas mais económico e usa pólos com espira de sombra
- O motor tem dois pólos salientes excitados por fluxos alternados.
- Cada pólo inclui uma pequena parte que tem uma espira em curto-circuito. Designa-se esta parte do pólo por pólo com espira de sombra.
- O enrolamento principal produz um fluxo pulsante que é ligado com o circuito do rotor.
- O fluxo principal induz uma Fem na espira de sombra que por sua vez é percorrida por uma corrente.

## Motor de indução monofásico de espira de sombra (cont.)

- Esta corrente gera um fluxo que se opõe à variação do fluxo principal no pólo com a espira de sombra.
- O resultado é que o fluxo na parte com espira de sombra e na outra parte serão diferentes.
- Tanto a amplitude como o ângulo de fase serão diferentes.

## Funcionamento do motor de espira de sombra



Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

31

## Motor de fase auxiliar simples

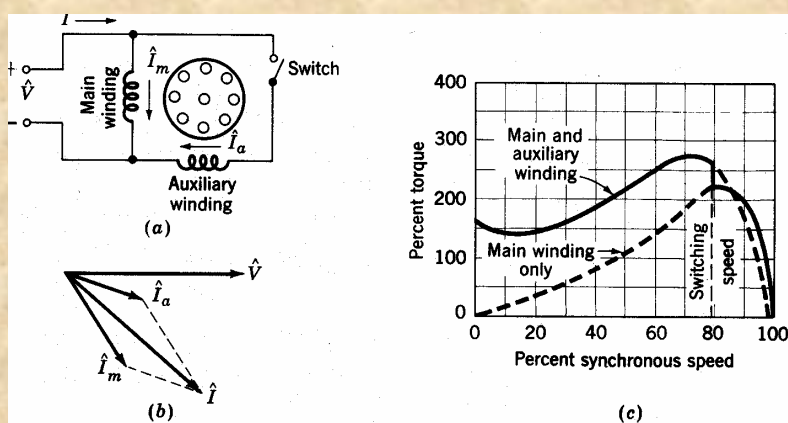


Fig. 11-3. Split-phase motor: (a) connections, (b) phasor diagram at starting, and (c) typical torque-speed characteristic.

Máquinas de Indução Monofásicas – Gil Marques 2005

32

Table 1. Summary of Split-Phase Motor Characteristics

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	50 to 60%
Power Factor	60 to 70%
Starting Torque	100% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations
Components	Contains Centrifugal Switch
Other	High Inrush Starting Current
Cost	Moderate

## Motor com arranque por condensador

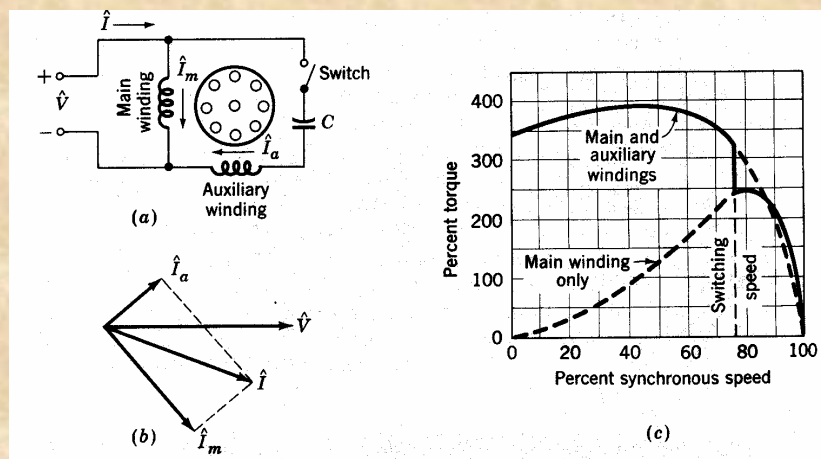
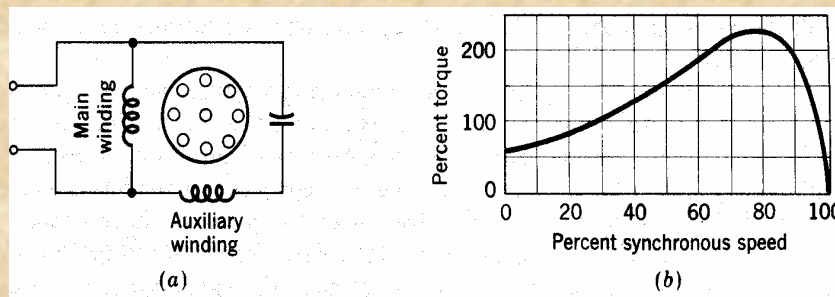
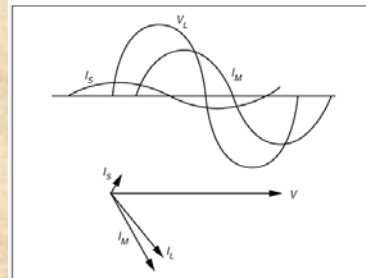


Table 2. Summary of Capacitor-Start Motor Characteristics

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	50 to 60%
Power Factor	60 to 70%
Starting Torque	Up to 300% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations
Components	Contains Centrifugal Switch & Capacitor (Intermittent Duty)
Other	Capacitor Controls Inrush Starting Current (Lower Than Split-Phase Type)
Cost	Slightly Higher Than Split-Phase Type

## Motor com condensador permanente

Figure 19. Phase Relationships (PSC Motor)

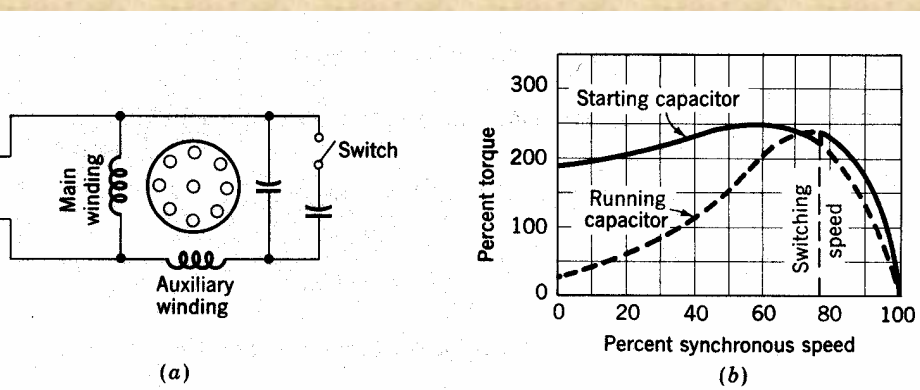




*Table 3. Summary Permanently Split Capacitor Motor Characteristics*

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	55 to 65%
Power Factor	80 to 100%
Starting Torque	50 to 80% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations Reduced
Components	Contains Capacitor (Continuous Duty)
Other	Can be used with speed control devices (not possible with SP & CSIR types)
Cost	Smallest motor for given output

### Motor de dois condensadores um para o arranque e o outro permanente



*Table 4. Summary Capacitor Start-Capacitor Run Motor Characteristics*

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	55 to 65%
Power Factor	80 to 100%
Starting Torque	Up to 300% Full Load Torque
Noise & Vibration	120 Hz Torque Pulsations Reduced
Components	Contains Centrifugal Switch & Capacitor (Intermittent Duty). Contains 2nd Capacitor (Continuous Duty).
Other	Capacitor controls inrush starting current & run capacitor simulates 2-phase operation.
Cost	The best of the single-phase motor types. Exceptionally quiet. Most expensive motor design type.

## Característica do motor de bobina de sombra

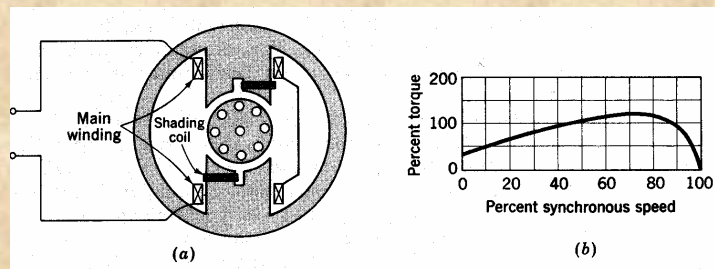
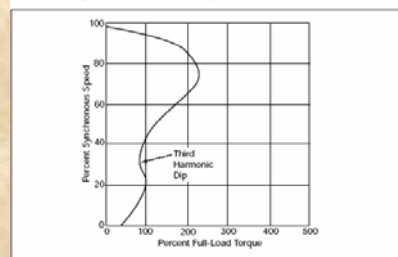


Figure 24. General Performance Characteristic (Shaded Pole Motor)



**Table 5. Summary Shaded Pole Motor Characteristics**

CHARACTERISTIC	NOTES
Peak Efficiency	20 to 40%
Power Factor	50 to 60%
Starting Torque	40 to 50% full load torque plus third harmonic dip
Noise & Vibration	120 Hz torque pulsations plus winding harmonics
Components	No additional components needed
Other	Can be used with speed control devices (not possible with SP & CSIR types)
Cost	Cheapest of all single-phase motors

**Table 6. Summary of Five Single-Phase Motor Types**

MOTOR TYPE	SPLIT-PHASE	CAPACITOR-START	PERMANENTLY SPLIT CAPACITOR	CAPACITOR START-CAPACITOR RUN	SHADED POLE
DESCRIPTION	Start winding connected in parallel with main winding, connection controlled by centrifugal switch or relay.	Identical to the split-phase design except includes the addition of a capacitor in series with the start winding circuit.	Start winding permanently connected in parallel to main winding with a continuous duty capacitor in the circuit at all times.	Combination of capacitor-start and PSC type motor. Start winding permanently connected in parallel to main winding with a continuous duty capacitor in the circuit at all times and capacitor in series with the start winding circuit.	Single main winding with shading coils for providing starting torque.
HP RANGE	1/8 to 1	1/4 to 2	1/100 to 1	3/4 to 20	1/1000 to 1/4
TYPICAL RATED SPEED (60 HZ)	860, 1140, 1725, 3450	860, 1140, 1725, 3450	1050, 1625, 3250	1725, 3450	1050, 1550, 3100
EFFICIENCY RANGE	50 to 80%	50 to 80%	55 to 65%	55 to 65%	20 to 40%
POWER FACTOR	60 to 70%	60 to 70%	80 to 100%	80 to 100%	50 to 60%
STARTING TORQUE (% OF FULL LOAD)	100%	Up to 300%	50 to 80%	Up to 300%	40 to 50%
TYPICAL APPLICATION	Suitable for frequent starting of fans in both direct and belt driven units.	All-purpose motor for high starting torque, low starting current used in both direct and belt driven units.	Intended for direct drive models and applications requiring speed control.	All-purpose motor for high starting torque, low starting current used mainly in larger belt driven units.	Suitable for direct drive low power fans and multi-speed applications.
ADVANTAGES	a. Good starting torque. b. Medium efficiency.	a. High starting torque. b. Lower starting current than split phase design.	a. High running efficiency. b. Capable of multi-speed operation. c. Can be used with speed control devices (i.e., triacs). d. Quietest of all small induction motors.	a. High starting torque. b. Lower starting current than split-phase design. c. Available in larger HP sizes than capacitor-start or PSC motor types. d. High running efficiency.	a. Inexpensive to manufacture. b. Multi-speed operation. c. Compact.
DISADVANTAGES	a. Not suited for high starting torque loads. b. Not applicable for speed control. c. High starting current	a. More expensive than split-phase design. b. Not applicable for speed control.	a. Low starting torque. b. Speed varies more under load.	a. Most expensive single-phase motor type. b. Not applicable for speed control.	a. Low efficiency. b. Low starting torque.

# Introdução à Máquina de Indução

## 1. Introdução

Nesta apostila são abordados os aspectos básicos das máquinas de indução. A abordagem tem um caráter introdutório; os conceitos abordados serão aprofundados no decorrer da disciplina.

A máquina elétrica mais freqüentemente utilizada na prática, sobretudo na indústria, é a *máquina de indução*, também chamado de *máquina assíncrona*, sobretudo quando operando em regime de motor. Dada que a sua performance como gerador é geralmente inferior à sua performance como motor, ele raramente é empregado como gerador, mas sim como motor, sendo assim conhecida como **motor de indução**, ou ainda **motor assíncrono**. O seu largo emprego se justifica pela sua robustez (não existe partes que se desgastam facilmente, tais como comutador e escova), pelo seu baixo custo, pouca necessidade de manutenção e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, incluindo ambientes hostis, ambientes explosivos, ambientes com poeiras, aplicações navais, etc... Por outro lado, a variação e controle da sua velocidade não é tão fácil como no caso do motor de corrente contínua. Os métodos clássicos de controle de velocidade - variação da tensão estatórica, comutação de enrolamento, variação da resistência rotórica no caso de motores de anéis, etc...- são em geral pouco eficientes e apresentam baixos rendimentos, o que na atualidade representa uma séria desvantagem. Sistemas mais modernos empregam conversores estáticos para a variação da velocidade, sendo que estes permitem a variação simultânea da tensão e da freqüência que são aplicadas ao estator ou ao rotor da máquina. Estes métodos são, assim, mais eficientes e convenientes; o seu custo todavia ainda é alto em relação a métodos clássicos, podendo-se no entanto observar uma tendência decrescente no custo, motivo pelo qual o seu uso já é bastante difundido na prática. Desta forma, nos próximos anos, motores de indução ou síncronos acionados por conversor deverão substituir quase que totalmente os tradicionais motores de corrente contínua.

## 2. Princípio de Funcionamento

Conforme já foi visto anteriormente em outras disciplinas, sempre que houver uma variação do fluxo sobre uma espira (ou um conjunto de espiras formando uma bobina) surge nesta uma tensão induzida, a qual é proporcional à taxa de variação do fluxo. Numa máquina de indução o fluxo tem uma distribuição espacial aproximadamente senoidal e é criado inicialmente pelo enrolamento do estator. Sobre o enrolamento do rotor existe assim um fluxo alternado produzindo neste tensões induzidas, as quais por sua vez produzirão correntes induzidas sempre que o enrolamento do rotor se encontrar fechado. O campo magnético criado pelas correntes do rotor cria, por sua vez, um outro campo magnético também senoidalmente distribuído que é atraído pelo campo do estator, à semelhança do que ocorre com os pólos de dois ímãs. A força de atração se traduz num torque que atua sobre o eixo do rotor, fazendo-o girar. Quando o rotor estiver

acoplada a uma carga mecânica o torque e a velocidade transmitirão uma potência mecânica para a carga.

O princípio de funcionamento da máquina de indução pode ser melhor entendido analisando-se o arranjo simplificado de uma máquina trifásica de 2 pólos mostrada na figura 1. Os eixos magnéticos dos enrolamentos do estator estão defasados espacialmente de 120 graus. Além disso, eles estão ligados a um sistema de tensões trifásicas defasadas de 120 graus elétricos, criando um conjunto de correntes igualmente defasadas de 120 graus elétricos entre si. Cada uma destas correntes cria por sua vez um campo magnético no interior da máquina, que se concentra principalmente no entreferro. Uma análise detalhada da superposição dos campos criados pelas três fases mostra que elas criam conjuntamente um campo com uma distribuição espacial fixa e muito próxima de uma senóide e que gira, sendo assim semelhante a uma onda, conforme mostra a figura 2 para três instantes de tempo. O campo criado é por isso chamado de **campo girante**. A natureza do campo girante faz com que o fluxo sobre os enrolamentos do rotor varie temporalmente induzindo neste tensões. As tensões induzidas no enrolamentos do rotor são igualmente tensões senoidais, as quais por sua vez fazem com que correntes senoidais circulem nos enrolamentos do rotor, criando um campo de reação semelhante ao campo criado pelo estator, mas defasado em relação a este. A força de atração dos campos do estator e do rotor faz com que surja um torque no eixo do rotor e o mesmo gire.

Observa-se que, com o rotor parado, a frequência das correntes do rotor é idêntica à frequência do estator. Conforme o rotor vai acelerando a frequência das correntes do rotor diminui, de tal forma que sob condições de carga nominal ela é de apenas uma pequena parcela da frequência do estator (tipicamente de 3 a 10%). Por outro lado, a rotação mecânica é muito próxima da velocidade com que o campo magnético do estator gira, chamada de velocidade síncrona  $n_s$ , a qual é dada por :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (\text{rpm}) \quad (1)$$

f - frequência (Hz) da rede de alimentação onde o motor está ligado.

p - número de pólos da máquina, determinado pelo forma com que o enrolamento foi construído (bobinagem do estator).

Por exemplo, um motor de 4 pólos ligado a uma rede de 60 Hz possui uma velocidade síncrona dada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{6} = 1200 \text{ rpm} .$$

Salienta-se que o número de pólos do motor é sempre par, não existindo portanto motor com número de pólos ímpar (3, 5, 7,....).

O motor de indução trabalha numa rotação mecânica um pouco inferior à rotação síncrona, sendo que existe pouca variação da velocidade em função da carga mecânica acoplada ao eixo. A diferença entre a velocidade do motor  $n$  e a velocidade síncrona  $n_s$  é chamada de escorregamento  $s$ , que em geral é expresso como um percentual da velocidade síncrona:

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2)$$

Em geral, o escorregamento não é maior que 10% em motores normais. Pode-se também expressar a velocidade mecânica do motor em função do escorregamento e da velocidade síncrona:

$$n = \left[ 1 - \frac{s(\%)}{100} \right] \cdot n_s \quad (\text{rpm}) \quad (3)$$

Tomando-se, por exemplo, um motor com velocidade síncrona de 1200 rpm e escorregamento de 5% obtém-se a seguinte velocidade mecânica:

$$n = \left[ 1 - \frac{s(\%)}{100} \right] \cdot n_s = \left[ 1 - \frac{5}{100} \right] \cdot 1200 = 1140 \quad \text{rpm} \quad (4)$$

O nome *máquina assíncrona* resulta do fato de que a rotação mecânica difere da rotação síncrona, considerando-se que a máquina trabalhe em regime permanente. O torque da máquina assíncrona é zero na velocidade síncrona, uma vez que a tensão induzida é igualmente zero nesta condição particular; ela não pode assim funcionar na velocidade síncrona, uma vez que o torque eletromagnético desenvolvido é zero. Na velocidade síncrona o fluxo concatenado com o rotor é constante (não varia), o que explica porque a tensão induzida e conseqüentemente a corrente e o torque possuem valor nulo.

Observa-se que na prática quando a máquina opera a vazio o escorregamento é muito baixo, fazendo com que as tensões induzidas no rotor sejam igualmente baixas. Assim, a corrente do rotor é reduzida, mantendo-se em um valor suficiente apenas para produzir o torque necessário a vazio, o qual equivale é necessário para vencer as perdas rotacionais a vazio. O fator de potência é extremamente baixo e em atraso, entorno de 0.2-0.3 ou menor, pois a corrente que circula pelo motor é utilizada apenas para suprir as perdas no ferro, as perdas no cobre e para a criação do campo magnético necessário para que ocorra conversão eletromecânica de energia.

Quando uma carga mecânica é aplicada ao rotor, o mesmo tende a desacelerar, fazendo com que a velocidade diminua. O decréscimo na velocidade causa um aumento no escorregamento e da freqüência rotórica, fazendo com que a tensão induzida aumente. Como conseqüência, ocorre um aumento da corrente induzida no rotor. Por sua vez a corrente do rotor tende a desmagnetizar a máquina. Como a tensão aplicada é constante, o fluxo resultante na máquina deve também permanecer (aproximadamente) constante. Assim, a corrente do estator terá de aumentar a fim de compensar o efeito da maior corrente do rotor. Portanto, um aumento da corrente do rotor reflete-se num aumento da

componente ativa da corrente do estator (componente em fase com a tensão e que produz potência). Desta forma a rede fornecerá mais potência para o estator, a qual será convertida em trabalho mecânico. À plena carga o motor de indução sempre irá girar a um escorregamento que assegure o equilíbrio entre o torque eletromagnético desenvolvido pelo motor e o torque resistente da carga.

Uma vez que as máquinas de corrente alternada possuem características indutivas, a corrente do estator está atrasada em relação à tensão, sendo este defasamento caracterizado pelo fator de potência. O fator de potência a plena carga varia de 0,8 (em pequenos motores de aproximadamente 1 CV) a aproximadamente 0,95 (nos grandes motores, acima de 150 CV). Pode parecer que aumentos na potência além da plena carga produzirão melhoria no fator de potência. Porém, com o aumento da carga e do escorregamento, a frequência da corrente rotórica continua a aumentar e o aumento na reatância do rotor produz uma diminuição no fator de potência do mesmo. Portanto, com cargas acima da plena carga, o fator de potência aproxima-se de um máximo e então decresce. Além disso, acima da velocidade nominal, a corrente do rotor e do estator serão maiores que seus valores nominais, produzindo mais calor e aumentando a temperatura de trabalho da máquina. Este aumento da temperatura poderá destruir o isolamento produzindo a queima do motor. Assim, a máquina de indução não deve operar com carga acima da nominal por períodos muito prolongados. Deve-se salientar que a defasagem entre a corrente do estator em relação à tensão dependem tanto dos parâmetros elétricos da máquina (indutância e resistência) como da carga que está acoplada ao eixo.

Existe atualmente uma variedade de tipos construtivos de motores de indução. Por exemplo, pode-se encontrar motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo simples, com gaiola de esquilo dupla, com gaiola de barras profundas ou com rotor bobinado. Existem também motores de indução monofásicos com partida realizada por enrolamento auxiliar de uso intermitente, por enrolamento auxiliar mais capacitor de uso intermitente, com auxílio de bobinas de arranque, motores com pólos sombreados, entre outros. Cada um destes tipos construtivos são destinados a uma determinada aplicação. A correta escolha do motor que atenda de forma satisfatória uma carga dada é, desta forma, uma tarefa bastante comum para o engenheiro eletricista. A correta seleção e aplicação de motores possui implicações não apenas técnicas mas também econômicas.

Conforme dito, as máquinas assíncronas também podem trabalhar como gerador assíncrono (gerador indutivo). Para operar nesta condição, devem ser acionadas acima da velocidade síncrona e, além disso, deve-se prover uma forma de magnetizar seu núcleo ferromagnético. Na prática isto é feito associando-se capacitores em paralelo aos terminais dos enrolamentos do estator da máquina, os quais fornecerão a energia reativa necessária para a magnetização. Geradores assíncronos também podem operar em paralelo com uma rede, sendo que a rede deverá fornecer a energia reativa necessária para a sua magnetização. Como a potência reativa deste tipo de gerador é bastante elevada em relação à potência gerada (de 20 a 50%), eles não são muito utilizados na prática, sendo os geradores síncronos preferidos em relação aos de indução. A maior parcela da energia gerada é fornecida, desta forma, por geradores síncronos.

Além da operação como gerador e motor as máquinas de indução também podem operar como freio eletromagnético. Nesta condição o eixo gira em sentido contrário que no regime de motor e gerador, havendo grandes perdas tanto no rotor como no estator. Em

geral o regime como freio se restringe a breves períodos de tempo, a fim de evitar sobreaquecimentos excessivos. Maiores detalhes sobre cada um destes regimes de funcionamento serão abordados ao longo da disciplina.

### 3. Conexões do Motor Trifásico

A grande maioria dos motores trifásicos são fornecidos para operação em pelo menos duas tensões diferentes, o que os torna aptos a operarem em dois sistemas com tensões diferentes. A escolha de uma ou outra ligação é feita a partir da tensão disponível no local onde o motor deverá operar, sendo que suas características não se alteram devido à reconexão. A adaptação da tensão do motor à da rede é feita por meio da reconexão dos terminais. Os principais tipos de ligação dos terminais são: ligação série-paralela, ligação estrela-triângulo e tripla tensão nominal. Estas conexões estão ilustradas nas figuras 4, 5 e 6 e são brevemente explicadas no que segue.

#### 3.1 Ligação Série-Paralela

Esta conexão permite que o motor seja ligado em dois níveis de tensão, sendo que uma é o dobro da outra, conforme mostrado nas figuras 4a e 4b. A figura 4a mostra o caso de um motor capaz de trabalhar tanto na tensão de 440 Volts como na tensão de 220 Volts. O enrolamento do motor é dividido em duas partes; ao se ligar as duas partes em série, em cada uma delas será aplicada metade da tensão de fase do motor, no caso considerado 127 Volts. Nesta conexão o motor poderá ser ligado a uma rede de 440 Volts entre fases (254 entre fase e neutro).

Ao se ligar em paralelo as duas bobinas de fase, o motor poderá ser ligado numa rede de 220 Volts entre fases. A tensão aplicada em cada uma das bobinas em paralelo é 127 Volts, conforme mostra o exemplo na figura 4b.

Ressalta-se que em ambos os casos mostrados na figura 4, a tensão em cada uma das seis bobinas é 127 volts. Esta é a tensão nominal de projeto de cada uma das seções do enrolamento de fase, não devendo portanto ser ultrapassada. Nesta conexão o motor deve ser dotado de 9 terminais acessíveis na caixa de ligação.

#### 3.2 Ligação Estrela-Triângulo

Nesta conexão ambos os terminais dos enrolamentos de fase são acessíveis na caixa de ligação, sendo assim possível a ligação da máquina tanto em estrela quanto em triângulo, conforme ilustrado na figura 5. *A escolha de uma ou de outra ligação depende da tensão da rede onde o motor será ligado.* A relação entre a tensão mais alta e a tensão mais baixa é de  $\sqrt{3}$ . A figura 5a mostra o exemplo de uma máquina construída para operar tanto na tensão de 380 Volts como 220 Volts (entre fases). Caso a tensão da rede seja 380 Volts *deve-se* ligar o motor em estrela; ao contrário, caso a rede seja de 220 Volts, *deve-se* ligá-lo em triângulo. Desta forma, fica assegurado que a tensão em cada uma das fases seja de 220 volts.

Caso o motor for conectado em triângulo e ligado numa rede de 380 volts haverá um sobreaquecimento do motor causado pela corrente excessiva, decorrente da tensão ser maior que a nominal. Nesta condição o motor poderá vir a ser danificado. Por outro lado, ligando-se o motor em estrela e conectando-o a uma rede de 220 volts, haverá uma



tensão menor que a nominal aplicada em cada fase. Nesta condição, caso o motor consiga partir e atingir a rotação nominal, a corrente será menor que a nominal e motor não conseguirá desenvolver a sua potência nominal. Também poderá ocorrer que o motor não consiga partir e atingir a velocidade nominal, ficando bloqueado e aumentando a corrente que nele circula. Resumindo, nenhuma destas condições é aconselhável para a operação do motor e deve em termos práticos ser evitada.

### **3.3 Tripla Tensão Nominal**

Fazendo-se uma combinação dos dois tipos de ligação anteriores obtém-se 4 modos possíveis para a conexão da máquina. Neste tipo de motor o enrolamento é dividido em duas partes que podem ser ligadas em série ou em paralelo. Como todos os 12 terminais são acessíveis na caixa de ligação, pode-se ligar o motor tanto em estrela como em triângulo. Em geral, apenas 3 das 4 combinações possíveis são utilizadas sendo a quarta apenas uma tensão de referência, conforme ilustrado na figura 6:

- ligação estrela paralela (380 Volts, figura 6a);
- ligação triângulo paralela (220 Volts, tensão mais baixa, figura 6b);
- ligação triângulo série (440 Volts, figura 6c).

A quarta ligação no exemplo dado é ligação estrela série, o qual resultaria uma tensão de 760 Volts, não sendo na prática utilizada por não existir redes de baixa tensão com valor acima de 600 Volts. Esta tensão serve apenas para indicar a possibilidade de ligação em entrêla-série e para fins de partida do motor.

## **4. Valores Nominais**

Os principais valores que caracterizam o motor de indução são discutidos no que segue. O seu correto entendimento é de fundamental importância tanto na especificação de motores como para fins de substituição do mesmo. *No que segue será assumido que os valores nominais se referem ao regime de funcionamento como motor.*

### **4.1 Potência Nominal**

É a potência mecânica máxima que o motor pode fornecer no seu eixo em regime de trabalho normal. Trata-se, portanto, da potência de saída do motor, a qual está especificada na placa. Na prática utilizam-se as unidades de CV, HP e W e seus múltiplos.

### **4.2 Tensão Nominal**

É a tensão de trabalho do motor em condições normais, não deve ser excedida sob períodos prolongados de tempo sob risco de avariar o motor; é a tensão de projeto do motor. Pela norma brasileira todo o motor deve ser capaz de funcionar satisfatoriamente quando alimentado tanto com tensão 10% abaixo como 10% acima da tensão nominal, desde que a frequência seja a nominal. Caso a frequência varie simultaneamente com a tensão, a variação da tensão deve ser reduzida proporcionalmente, de modo que a soma da variação de ambas não ultrapasse 10%. Por exemplo, se a frequência variar 2% a

tensão só poderá variar de 8%. Os motores são em geral fabricados para operação numa temperatura ambiente máxima de 40 graus centígrados e uma altitude máxima de 1000 acima do nível do mar. Fora destas condições existem alterações nas características nominais, especialmente a potência nominal que será reduzida.

### 4.3 Corrente Nominal

É a corrente que o motor solicita da rede sob tensão, freqüência e potência nominais. O valor da corrente depende do rendimento e do fator de potência do motor sendo dado pela seguinte relação:

$$I = \frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \left(\frac{\eta}{100}\right) \cdot \cos(\varphi)} \quad (\text{A}) \quad - \text{ motor trifásico} \quad (5)$$

$$I = \frac{P_m}{V \cdot \left(\frac{\eta}{100}\right) \cdot \cos(\varphi)} \quad (\text{A}) \quad - \text{ motor monofásico} \quad (6)$$

$P_m$  - potência mecânica fornecida no eixo, potência de projeto, indicada no catálogo do fabricante e na placa do motor (cv, HP ou watts). Caso a potência seja indicada em cv deve-se convertê-la usando-se a relação: 1 cv = 736 watts.

$\eta$  - rendimento em %

$\cos(\varphi)$  - fator de potência nominal.

A variação da corrente com carga no eixo (rotação) é mostrada na figura 7. Pode-se observar que durante o período de partida o motor solicita uma corrente acima da nominal, provocando no mesmo um aquecimento adicional, motivo pelo qual o tempo para a partida não deve ultrapassar o limite estabelecido pelo fabricante. Além disso, a corrente elevada causa quedas de tensão na rede de alimentação e dispositivos de manobra e proteção. Os efeitos da partida do motor devem, assim ser levados em conta no projeto da instalação onde o motor se encontra. A corrente de partida de um motor de indução é em geral de 5 a 8 vezes a corrente nominal.

### 4.4 Freqüência Nominal

É a freqüência da rede de alimentação do motor, expressa em Hz, no Brasil a freqüência padronizada é de 60 Hz. Deve-se salientar que é possível utilizar-se um motor de 50 Hz na freqüência de 60 Hz, contudo as características de partida e de funcionamento serão alteradas, havendo em geral uma alteração na potência nominal. Quando isto for necessário é aconselhável uma consulta ao catálogo do fabricante

#### **4.5 Escorregamento Nominal**

É o escorregamento para a condição de plena carga do motor, correspondendo ao torque nominal (figura 7).

#### **4.6 Torque Nominal**

É o torque fornecido pelo motor no seu eixo sob tensão e corrente nominais. A figura 7 mostra a curva de variação do torque em função do escorregamento. Além do torque nominal também são importantes o torque máximo e o torque de partida, ambos mostrados na figura 7. O conjugado máximo exige correntes superiores à corrente nominal e por isso não pode ser fornecido continuamente. Deve-se salientar que todo motor de indução possui capacidade de fornecer um torque acima do nominal por breves períodos de tempo.

#### **4.7 Velocidade nominal**

É a velocidade (rpm) do motor funcionando à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. Conforme visto anteriormente, a velocidade mecânica depende do escorregamento, do número de pólos e da frequência da rede de alimentação. A velocidade do motor de indução varia muito pouco entre a condição de vazio e plena carga, cerca de 10%. Desta forma, o motor de indução alimentado a partir da rede da concessionária não é muito adequado onde se exige velocidade variável. No entanto, quando alimentado por meio de um conversor estático, a variação de velocidade é possível numa faixa bastante ampla.

#### **4.8 Rendimento nominal**

Depende do projeto do motor, variando com a carga no eixo do motor conforme mostra a curva típica na figura 8. Representa a relação em percentual entre a potência elétrica fornecida pela rede e a potência mecânica fornecida no eixo.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100 = \frac{(P_e - P_p)}{P_e} \cdot 100$$

$\eta$  - rendimento em percentual

$P_m$  - potência mecânica (útil) no eixo (Watt)

$P_e$  - potência elétrica de entrada (Watt)

$P_p$  - somatório das perdas (Watt).

A curva típica mostra que o motor obtém o maior rendimento dentro da faixa de operação que vai de 75% a 100% da carga nominal. O mesmo vale para o fator de potência. Desta forma deve-se evitar, sempre que possível, deixar o motor funcionando sob carga muito inferior à sua potência nominal, uma vez que isto acarreta um baixo rendimento e um baixo fator de potência, ambos indesejados, uma vez que significa custos operacionais e de aquisição do motor maiores que o necessário. Além disso, um motor com baixo fator

de potência contribui para que o fator de potência global da instalação seja baixo, eventualmente acarretando multas e/ou operação ineficiente da instalação.

O rendimento máximo que cada motor apresenta depende dos materiais utilizados na sua fabricação e das dimensões do mesmo. Em geral, o rendimento aumenta com as dimensões e a potência do motor, chegando a valores em torno de 98% para grandes motores (acima de 500 CV). Motores monofásicos de baixa potência apresentam rendimentos baixos, podendo chegar a 50%. Existem atualmente motores com rendimento acima do normal, chamados de motores de alto rendimento, que são mais caros que os normais. A economia de energia proporcionada permite que o custo adicional retorne num tempo muito menor que a sua vida útil. O seu uso requer via de regra um estudo técnico-econômico.

#### **4.9 Fator de Serviço**

O fator de serviço representa uma reserva de potência que a motor possui e que pode ser usada em regime contínuo (este tipo de regime é também chamado de regime S1, de acordo com a norma). A potência que pode ser obtida do motor é assim a potência nominal (indicada na placa) multiplicada pelo fator de serviço. Um motor de potência de 5 kW e com fator de serviço de 1.1 pode trabalhar continuamente com  $5 \cdot 1.1 = 5.5$  kW em regime contínuo. Um fator de serviço de 1.0 significa que o motor não possui reserva de potência.

O fator de serviço não deve ser confundido com a sobrecarga momentânea do motor, a qual vale por curtos períodos de tempo. Uma indicação típica de sobrecarga é : 60% da potência nominal por 15 segundos. Mesmo motores com fator de serviço 1.0 possuem uma determinada capacidade de sobrecarga por tempo limitado.

## **5. Partes Construtivas Principais da Máquina de Indução**

### **5.1 Carcaça**

É a estrutura que suporta as demais tais como tampas, caixa de ligação, etc... Em geral é feita de ferro fundido e dotada de aletas para melhorar a capacidade de dissipação de calor.

### **5.2 Estator**

É formado de um núcleo de chapas magnéticas (também chamado de pacote), o qual possui ranhuras axiais para alojar o enrolamento do estator. O uso de chapas magnéticas é justificado pela redução de perdas e melhora do rendimento. O uso de ranhuras além de diminuir o entreferro efetivo e a corrente de magnetização, também é um meio bastante eficiente de transmissão do calor para o exterior. Existem máquinas de CA (em geral máquinas síncronas) em que não existe ranhuras, sendo que a superfície interna do rotor é lisa, conhecidas como *slotless machine*. Trata-se no entanto de máquinas de uso restrito, sendo a configuração com ranhuras a mais comum no caso de máquinas elétricas. O estator também aloja as bobinas do enrolamento estático que pode ser tanto trifásico como monofásico. Entre as chapas e as bobinas do enrolamento existe elementos de isolamento, cuja função é evitar colocar a carcaça e o pacote de chapas sob tensão.

### 5.3 Rotor

É igualmente composto de um núcleo de chapas magnéticas, também dotadas de ranhuras axiais, onde o enrolamento do rotor é alojado. Os enrolamentos são de dois tipos:

- *enrolamento em curto-circuito* (rotor em gaiola de esquilo, rotor em curto-circuito), formado de barras de alumínio conectadas por anel em ambas as extremidades do pacote de chapas. Este enrolamento não é acessível, ou seja não existe nenhum terminal acessível que permita acessá-lo. A gaiola é injetada sob alta pressão e temperatura não havendo isolamento entre as barras e o pacote de chapas. Os anéis nas extremidades axiais tem também a função de garantir uma rigidez mecânica ao pacote de chapas. A forma das ranhuras do rotor influencia o desempenho do motor, especialmente a curva de torque.
- *enrolamento de bobinas* (rotor bobinado) feitas em geral de cobre. Trata-se de um enrolamento semelhante ao enrolamento do estator, em geral trifásico. Os seus terminais são conectados a anéis coletores e escovas, os quais podem ser acessados externamente. Este tipo de enrolamento é usado quando se deseja um controle das características de torque e velocidade da máquina. É menos freqüente que o enrolamento em gaiola, uma vez que é mais caro e menos robusto. A escolha de um motor com rotor bobinado também pode ser requerida devida ao processo de partida do motor, uma vez que este tipo de motor pode fornecer um torque mais elevado na partida.

## 6. Motor Monofásico de Indução

Conforme foi visto, o motor trifásico possui 3 enrolamentos independentes que podem ser conectados de diversas maneiras (série, paralelo, estrela triângulo, etc..). O motor monofásico, ao contrário, possui em geral apenas um enrolamento principal (ou de trabalho) no estator, o qual é ligado a uma rede monofásica. Ao ser ligado a uma rede de tensão alternada senoidal, circula no mesmo uma corrente igualmente senoidal. O campo criado por esta corrente possui uma distribuição espacial no entreferro muito próxima de uma senóide, cujo valor instantâneo depende da corrente instantânea do enrolamento. O campo criado é assim um campo do tipo pulsante, o qual induz uma tensão no enrolamento do rotor. Imaginado-se que o rotor esteja parado, a força de interação dos campos criados pelo estator e pelo rotor faz surgir um torque que atua com igual intensidade nos dois sentidos de rotação do motor. Como resultado o motor não apresenta conjugado de partida, e assim não consegue, por ele mesmo, acelerar e atingir a rotação nominal, figura 9. Desta forma é necessário dotar o motor monofásico de um dispositivo auxiliar de partida, a fim de que o mesmo possa ser utilizado. Os dispositivos de auxílio atuam basicamente no sentido de criar um desequilíbrio no campo do estator. Uma vez que o motor começa a girar observa-se que o torque fornecido pelo motor no sentido de rotação é maior que o torque exercido no sentido contrário, ou seja o motor passa a fornecer um torque acelerante. A forma mais usual de partida é o emprego de um enrolamento auxiliar, o qual pode atuar apenas na partida ou ainda ser conectado para funcionamento permanente. Os tipos mais comuns de motores monofásicos com enrolamento auxiliar são os seguintes:

- motor com partida a resistência e chave centrífuga;

- motor com partida a capacitor e chave centrífuga;
- motor com capacitor permanente;
- motor com duplo capacitor.

Motores monofásicos são em geral maiores e possuem rendimentos menores que motores trifásicos de mesma potência.

# Campo Magnético Girante

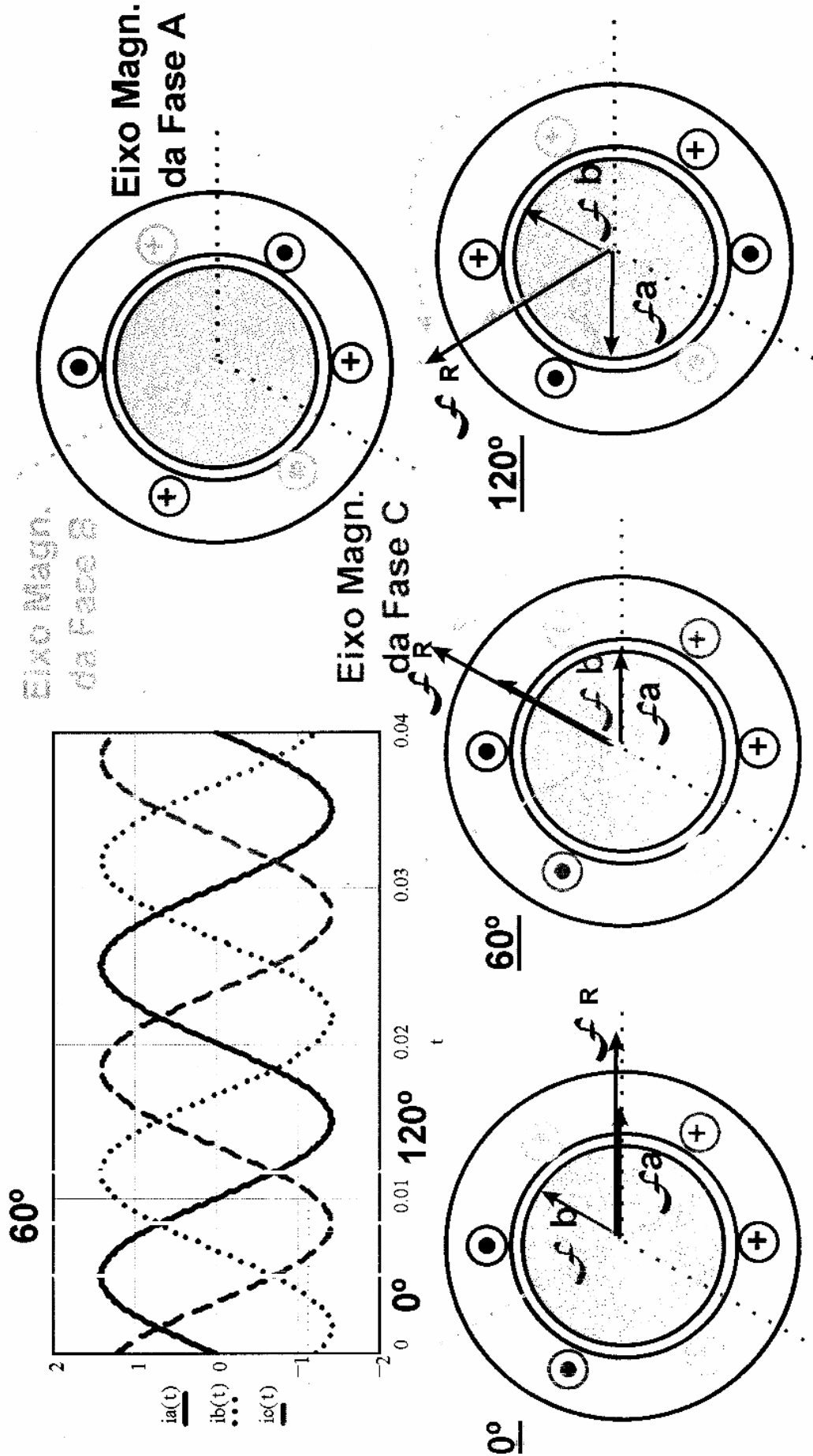


Figura 1 – Criação do Campo Magnético Girante

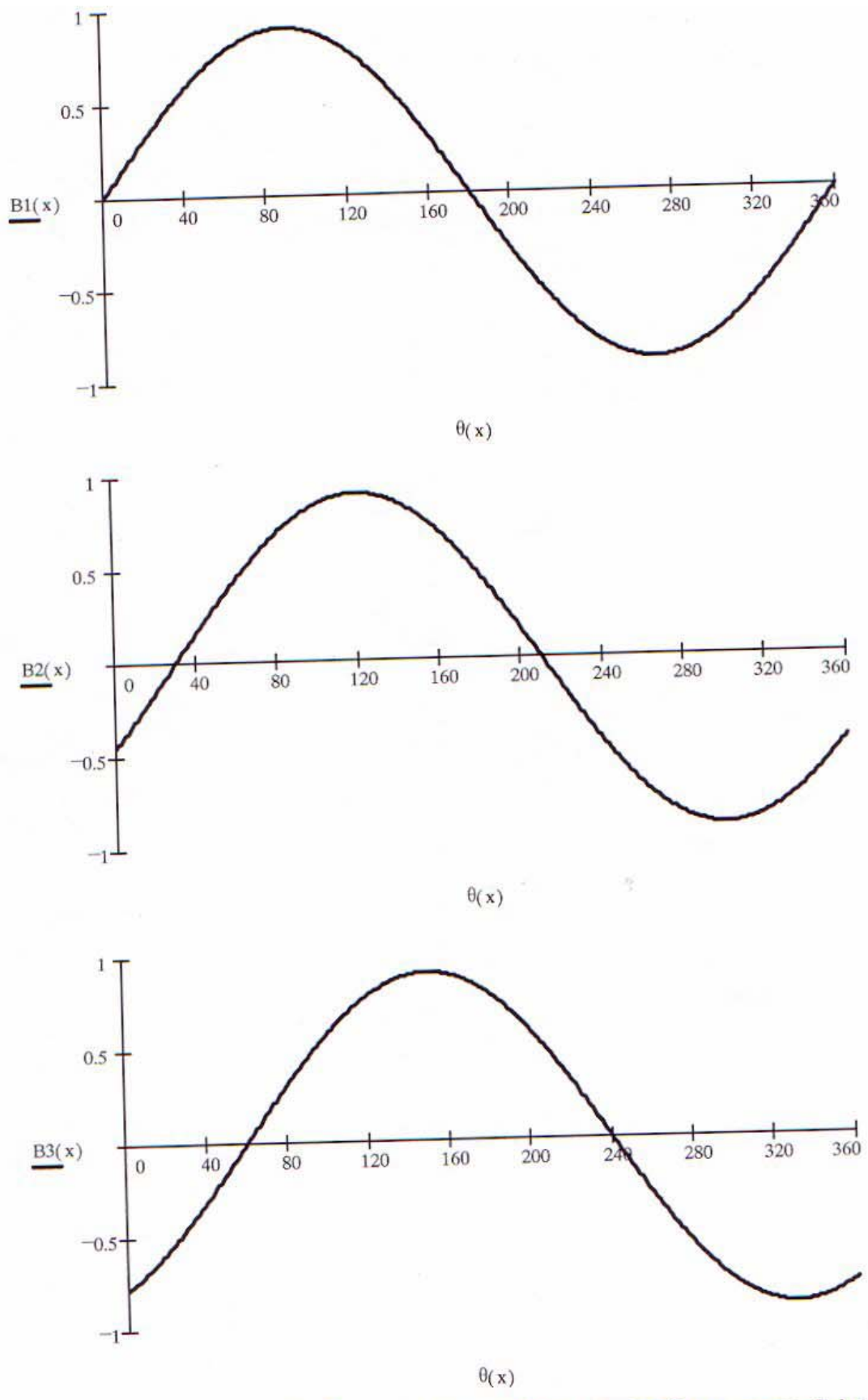


Figura 2 - Onda de indução no entreferro para 3 instantes



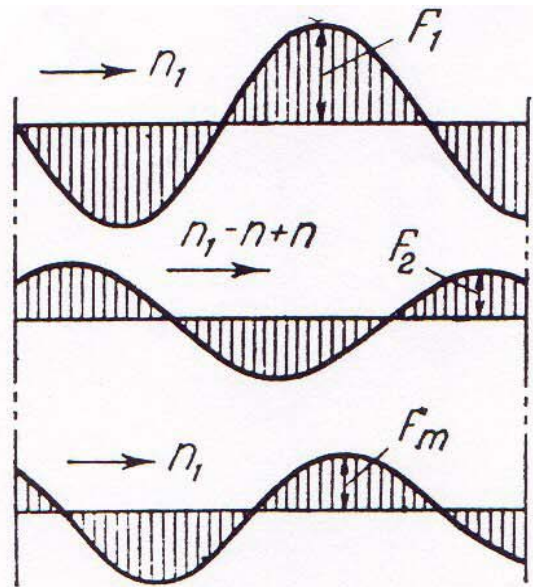


Figura 3 - Campos criados pelo estator e rotor:  $F_1$  - campo do estator,  $F_2$  campo do Rotor,  $F_m$  - Campo resultante

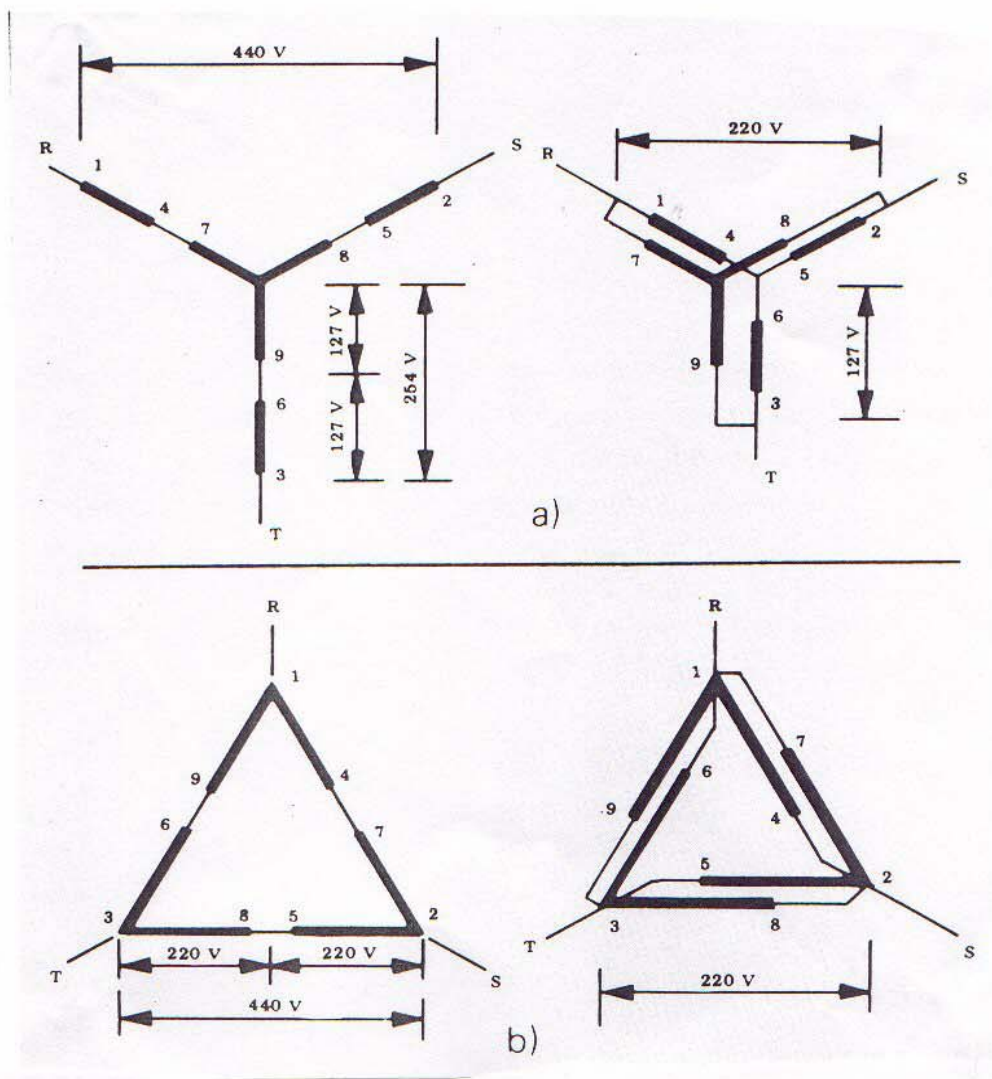


Figura 4 - Conexão Série Paralela do Enrolamento do Estator.

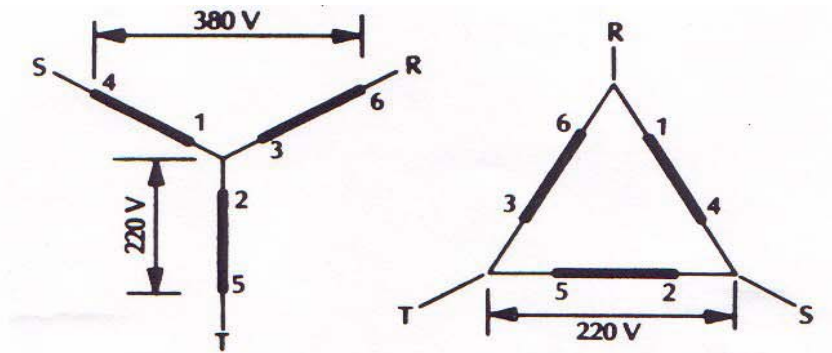


Figura 5 – Conexão Estrela-Triângulo do Enrolamento do Estator

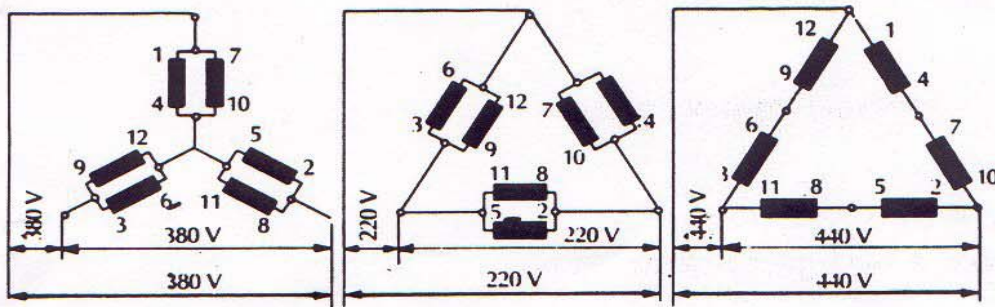


Figura 6 – Conexões Possíveis do Motor com Tripla Tensão Nominal

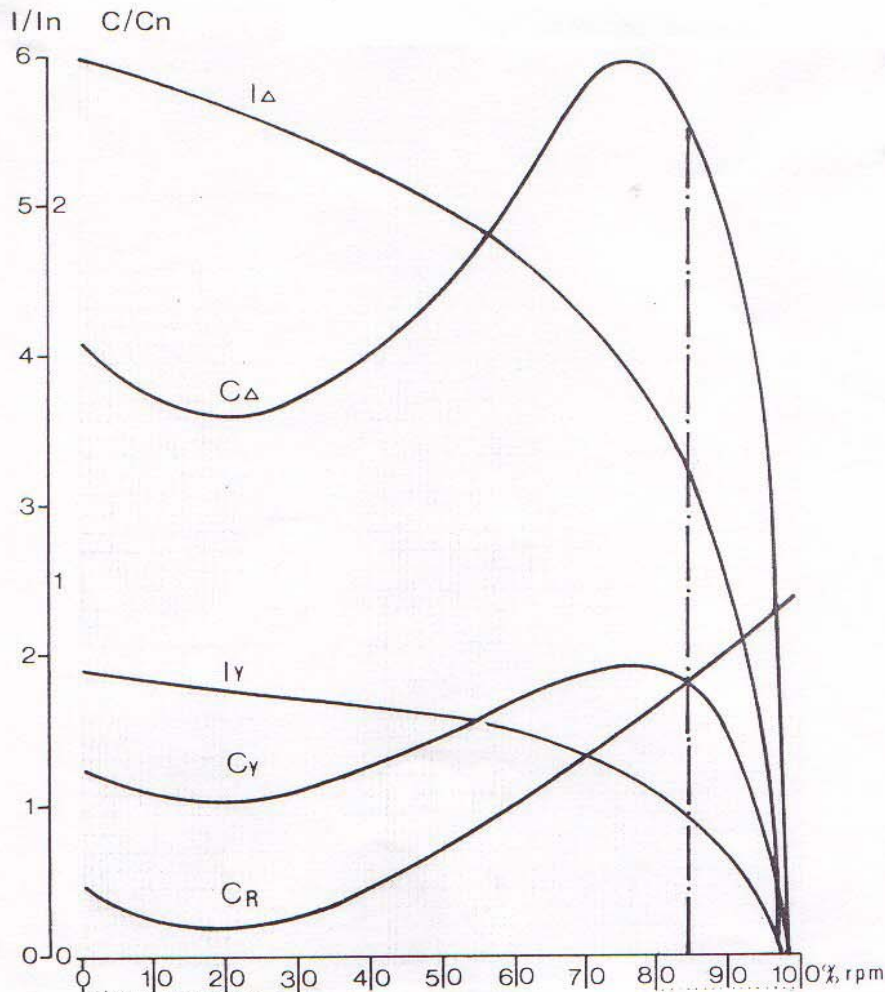


Figura 7 – Curvas Típicas de Torque e Corrente para um Motor Ligado em Triângulo em Regime de Funcionamento Normal e em Estrela na Partida.

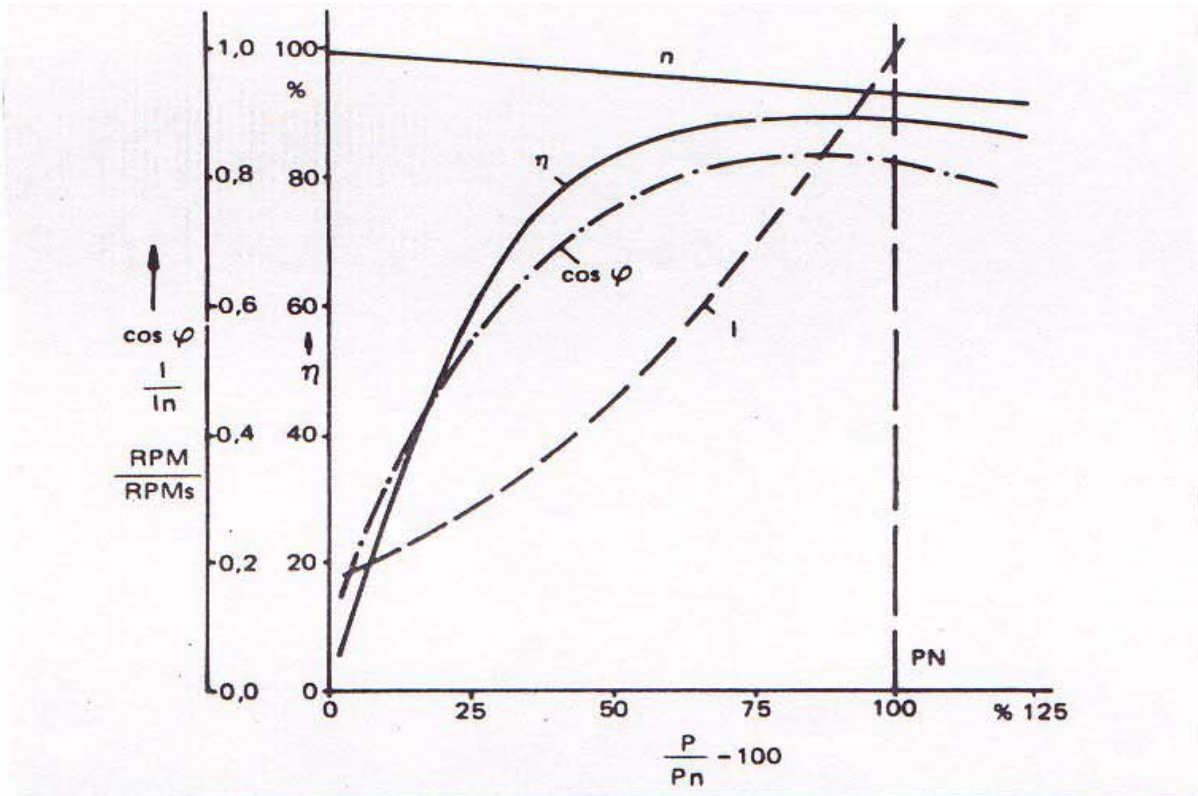


Figura 8 – Curvas Típicas do Motor de Indução

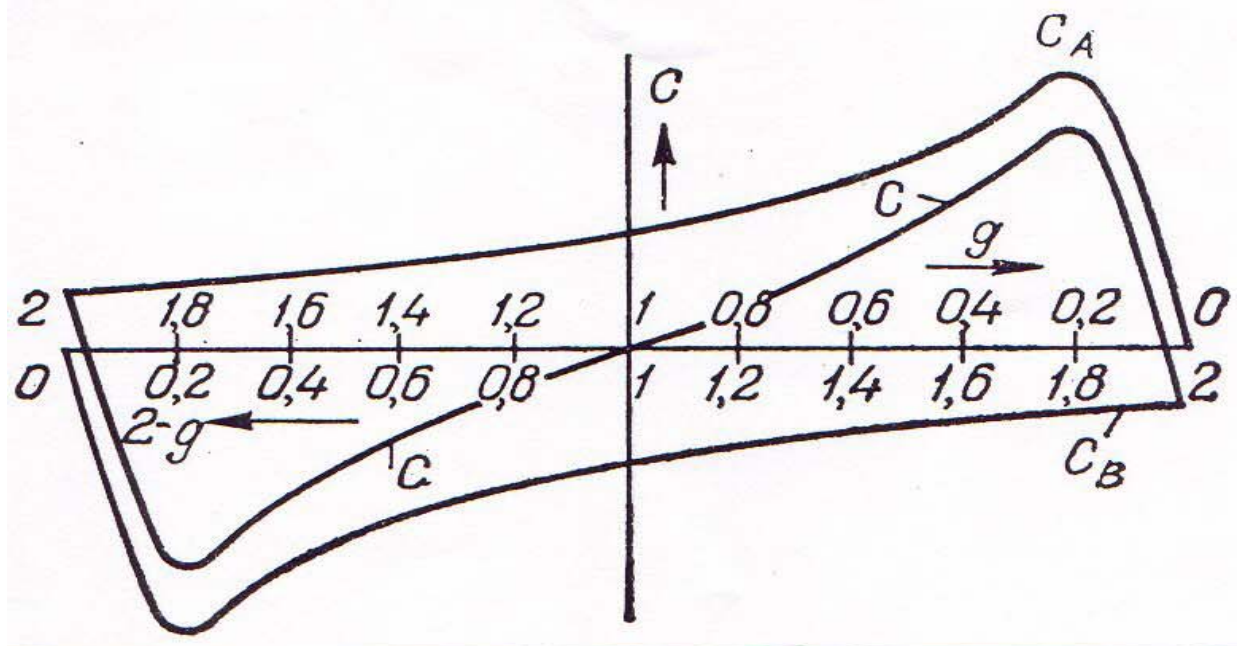


Figura 9 – Torque da Máquina de Indução Monofásica