

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 electricista. 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, frequência 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.

η - 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 Frequência Nominal

É a frequência da rede de alimentação do motor, expressa em Hz, no Brasil a frequência padronizada é de 60 Hz. Deve-se salientar que é possível utilizar-se um motor de 50 Hz na frequência 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.

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

η - 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. Imaginando-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

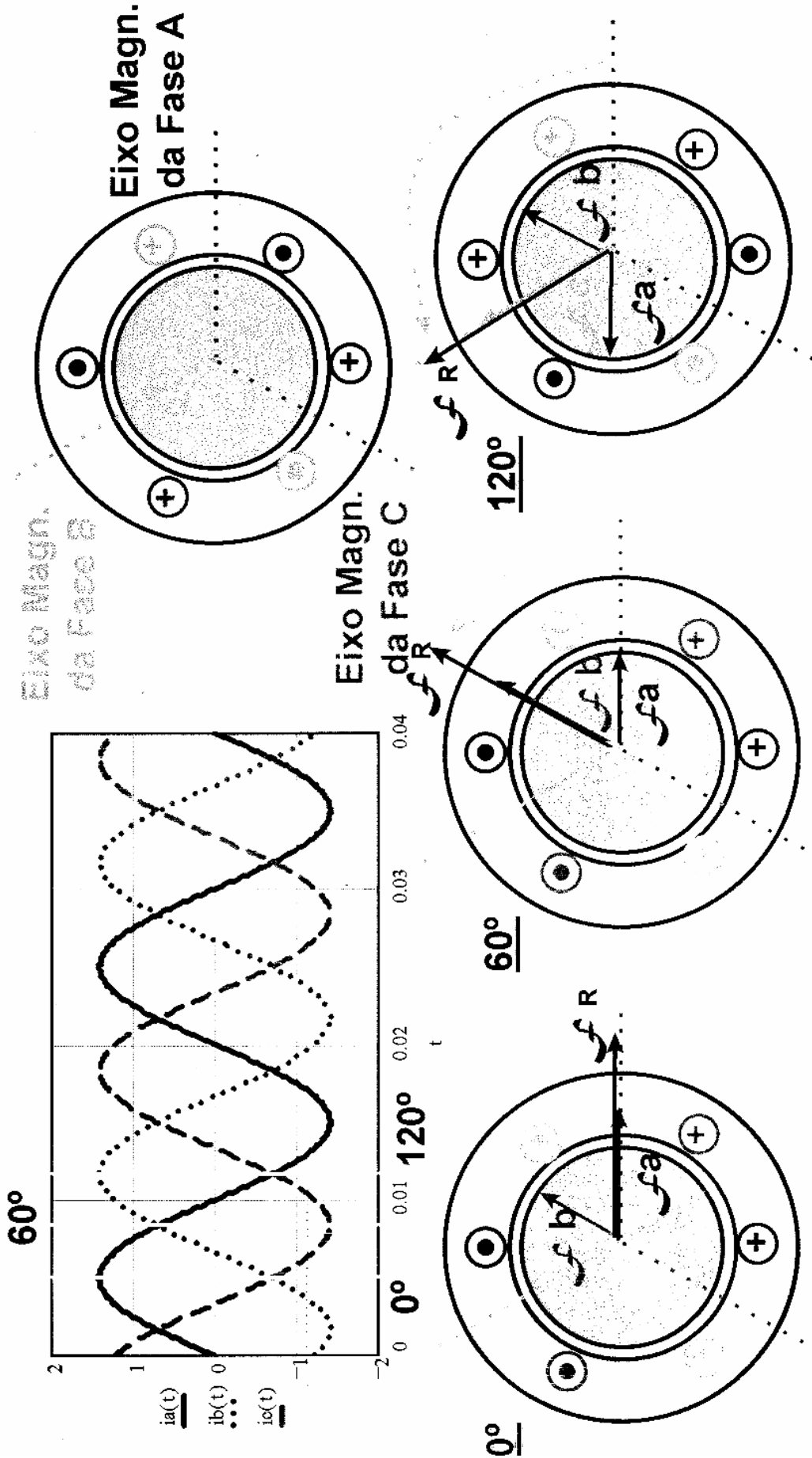


Figura 1 – Criação do Campo Magnético Girante

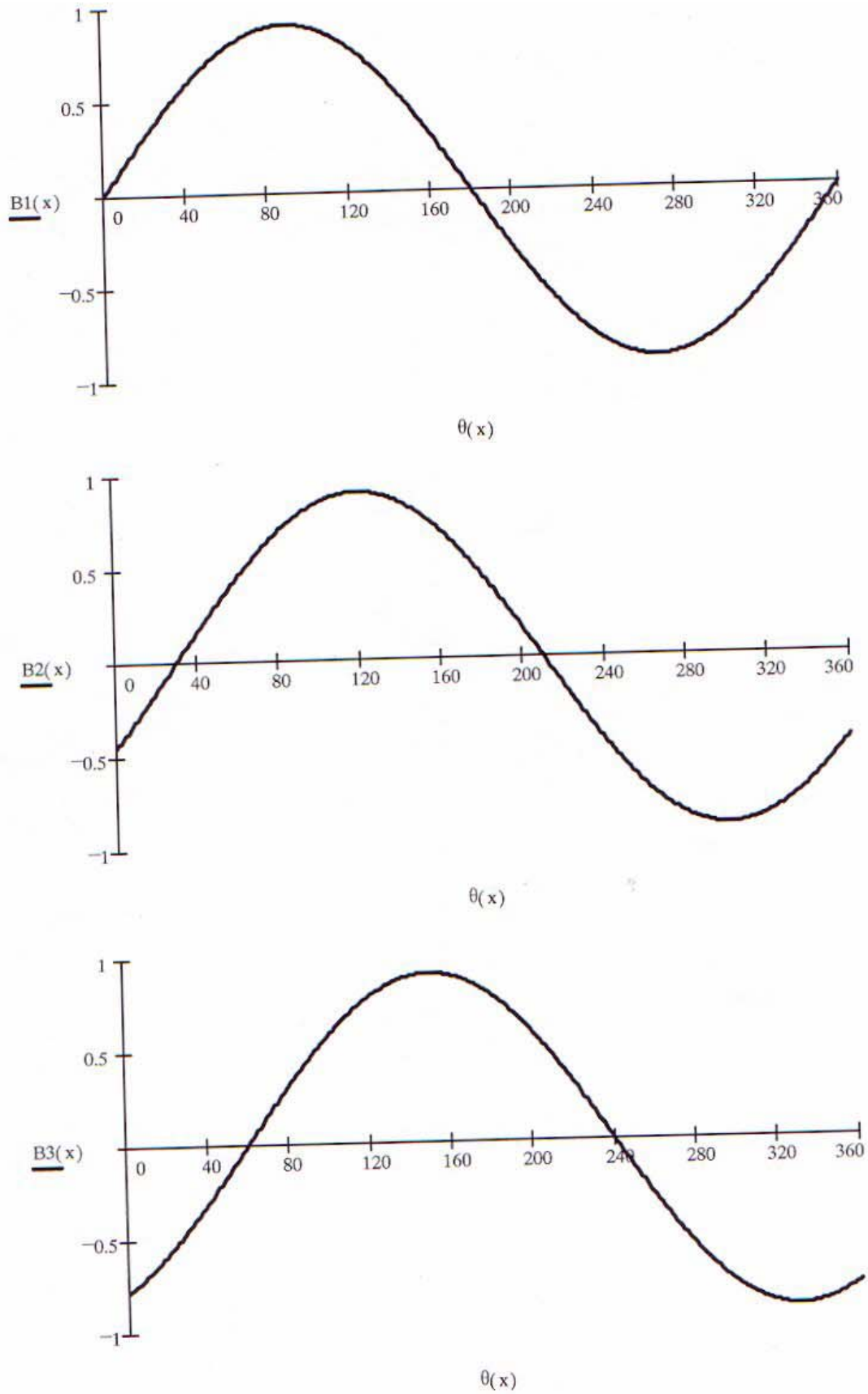


Figura 2 - Onda de indução no entreferro para 3 instantes

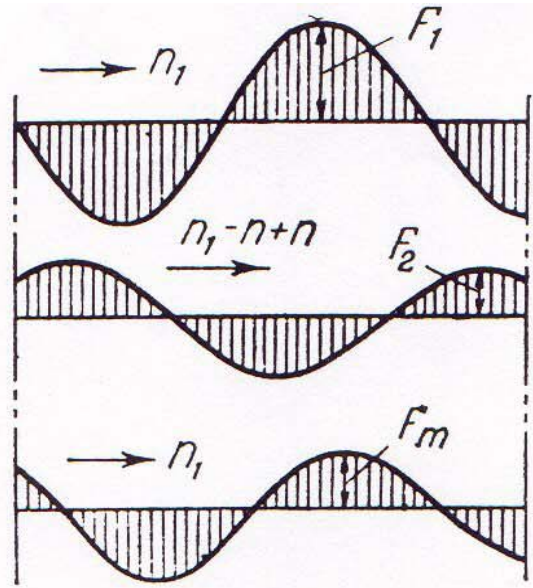


Figura 3 - Campos criados pelo estator e rotor: F_1 - campo do estator, F_2 campo do Rotor, F_m - Campo resultante

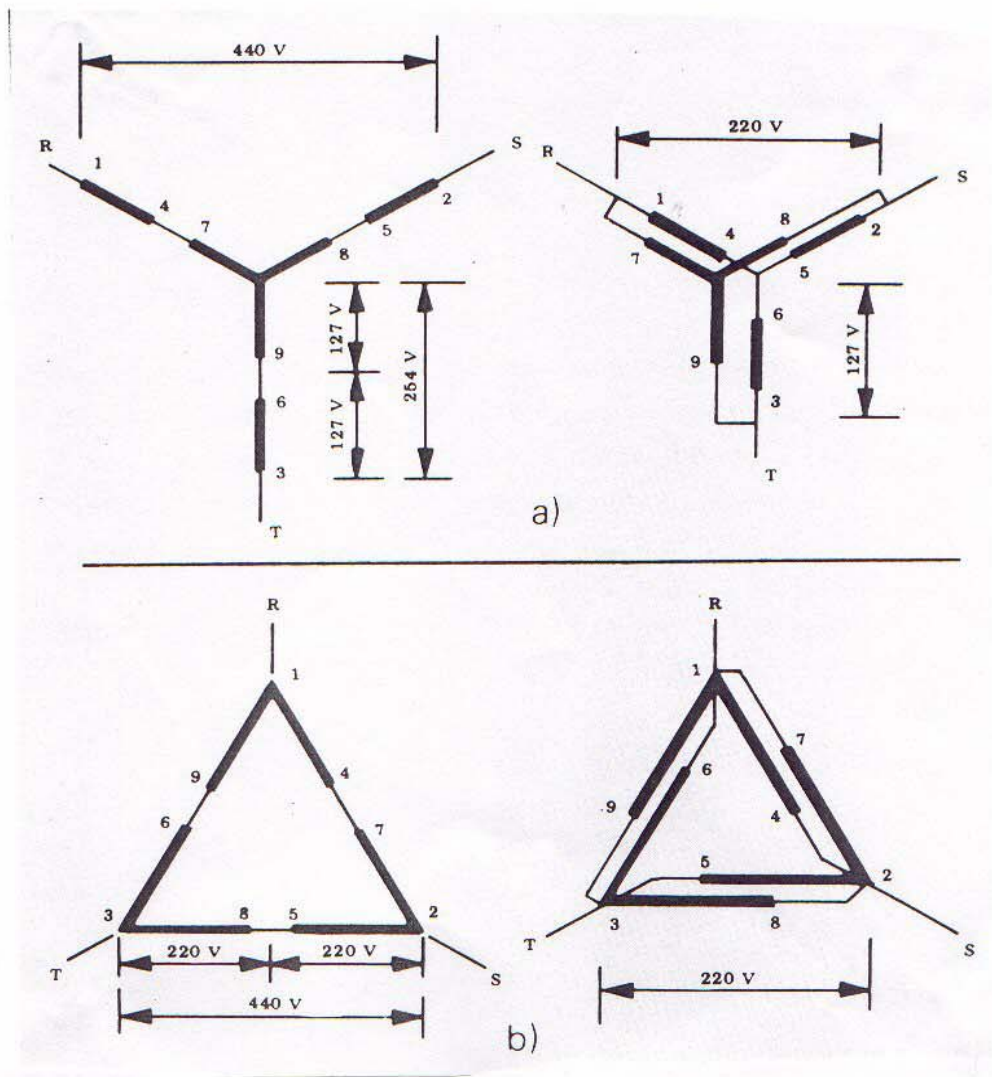


Figura 4 - Conexão Série Paralela do Enrolamento do Estator.

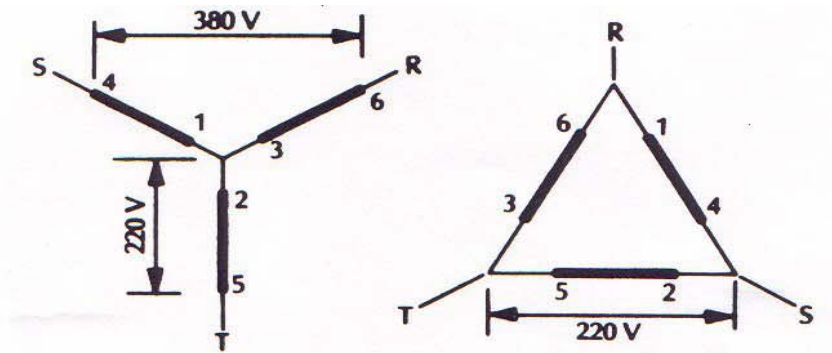


Figura 5 – Conexão Estrela-Triângulo do Enrolamento do Estator

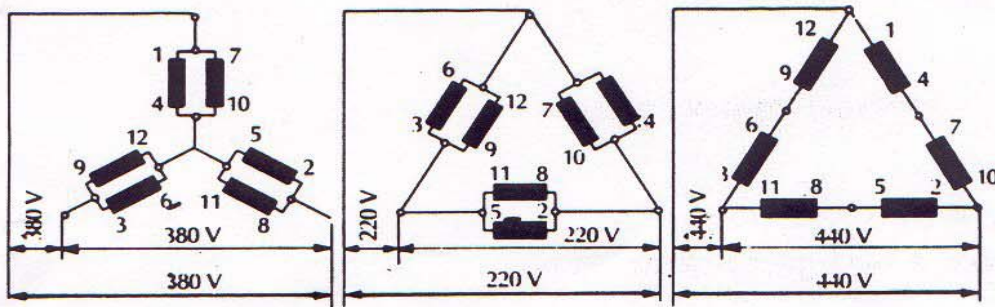


Figura 6 – Conexões Possíveis do Motor com Tripla Tensão Nominal

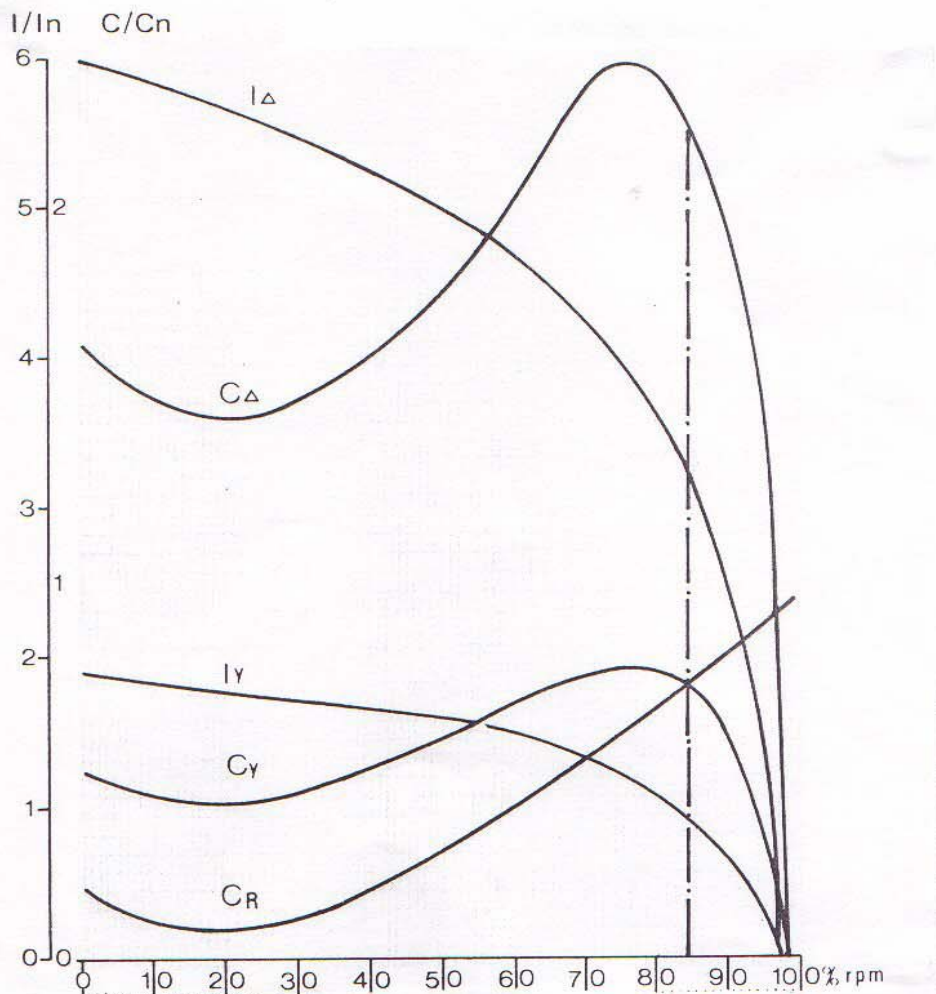


Figura 7 – Curvas Típicas de Torque e Corrente para um Motor Ligado em Triângulo em Regime de Funcionamento Normal e em Estrela na Partida.

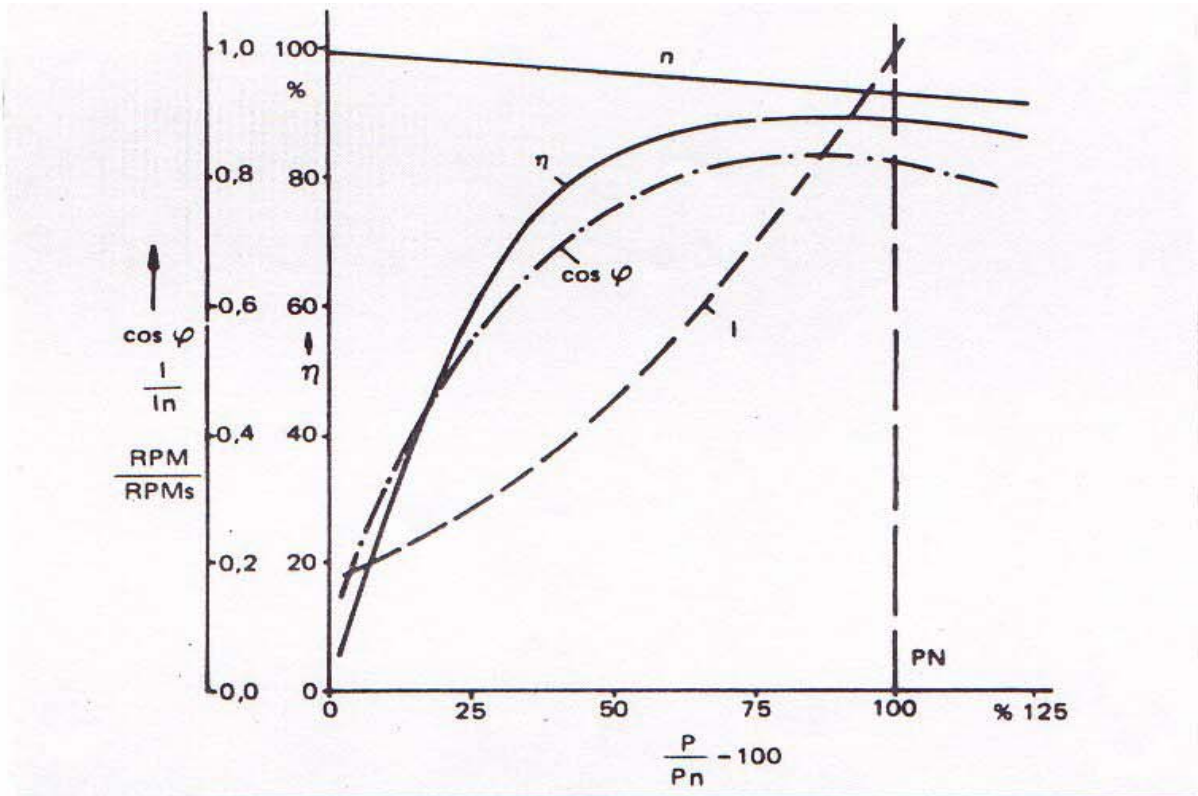


Figura 8 – Curvas Típicas do Motor de Indução

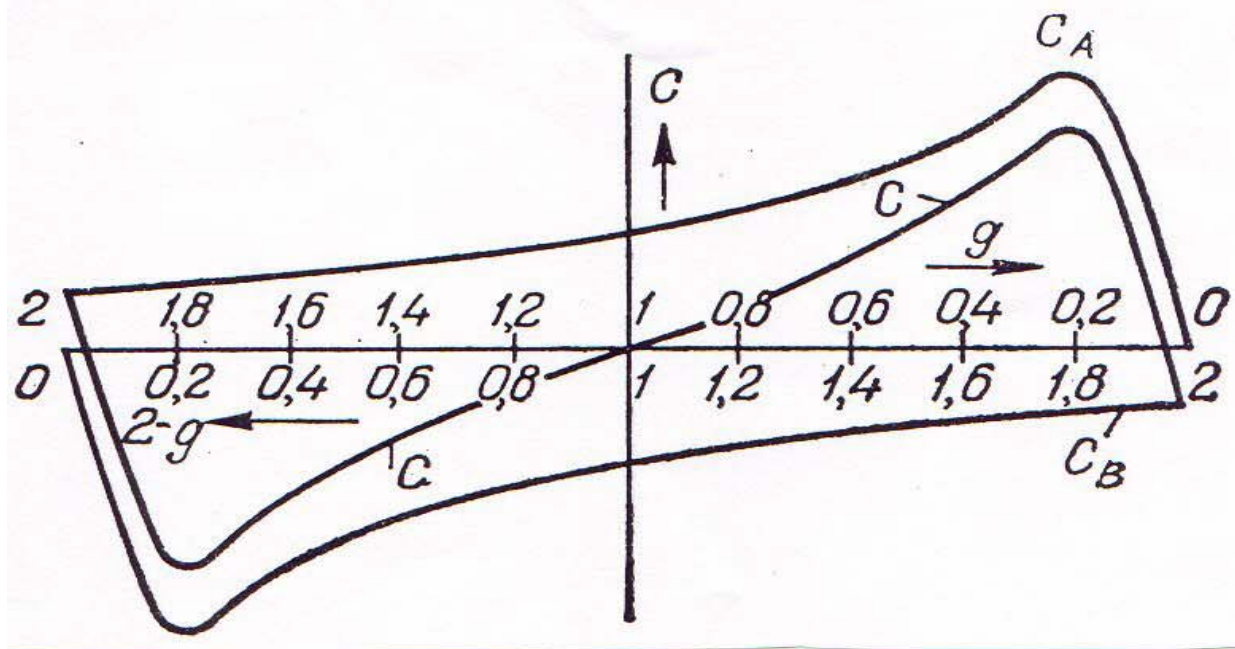


Figura 9 – Torque da Máquina de Indução Monofásica