

TESE

52

an Geraldo de Andrade

T = 52
Anchad

COMPARAÇÃO ENTRE MOTORES MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS E POSSIBILIDADES DO USO DE CONVERSORES DE FASES NA ELETRIFICAÇÃO RURAL

Dissertação Apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá, como Parte das Exigências do Curso de Engenharia Elétrica, para o Grau de «Magister Scientiae».

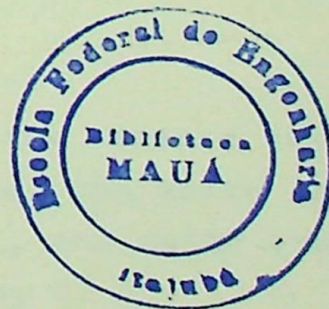
Itajubá
1973

Ivan Geraldo de Andrade

BIM

COMPARAÇÃO ENTRE MOTORES MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS
E POSSIBILIDADES DO USO DE CONVERSORES DE
FASES NA ELETRIFICAÇÃO RURAL

Dissertação Apresentada à Escola
Federal de Engenharia de Itajubá,
como Parte das Exigências do Cur-
so de Engenharia Elétrica, para
o Grau de "Magister Scientiae".



Itajubá
1973

Class. 621.313.13:621.314.25 (043.2)

Cutt. A 543c

Tombo 52

a minha mãe, com imensa gratidão;
a minha esposa, com muito carinho;
a meus filhos, com muita esperança
no seu futuro.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja apresentar sinceros agradecimentos a todas as pessoas e instituições que, de qualquer forma tenham colaborado na realização deste trabalho.

- À Escola Federal de Engenharia de Itapubã
- À Escola Superior de Agricultura de Lavras
- Ao Conselho Nacional de Pesquisas
- Ao Professor Amadeu C. Caminha
- Aos Professores orientadores Antonio Eduardo Hermeto e Álvaro Pereira Rizzi.
- Aos Professores Fernando Constanti, José Carlos de Oliveira e Ademir Carnevalli Guimarães.
- À senhorita Terezinha de Lourdes Rezende.

Agradece finalmente a todos que direta ou indiretamente cooperaram neste trabalho.

CONTEÚDO

SUMÁRIO	iv
SUMMARY	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. A SELEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS PARA A FAZENDA	4
2.1. Características Desejáveis de um Motor Elétrico ...	4
2.2. Influência do Sistema Distribuidor	5
2.3. Influência das Cargas na Seleção de Motores	5
2.4. O Crescimento da Eletrificação Rural e a Seleção de Motores	6
3. REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1. Motores Monofásicos	14
3.2. Motores Trifásicos	27
3.3. Comparação de Motores Trifásicos e Monofásicos	30
3.3.1. Características de Desempenho	30
3.3.2. Custo Inicial das Instalações	43
3.4. Conversores de Fases	50
3.4.1. Tipos de Conversores de Fases	51
3.4.2. Características dos Conversores de Fases ...	58
3.4.3. Comparação dos Custos de Instalações com Conversores de Fases	68
4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	70
5. LITERATURA CITADA	75
6. APÊNDICE	80
6.1. A Eletrificação Rural no Brasil	80
6.2. Conversores de Fases com Autotransformador	85

SUMÁRIO

A seleção de motores para aplicações agrícolas é complicada devido aos diversos fatores a considerá-los. São variáveis para utilização no meio rural tres tipos de instalações: motor trifásico alimentado por linha trifásica, motor monofásico e, a combinação conversor de fases motor trifásico, alimentados pela linha monofásica.

No presente estudo foi feita uma revisão de literatura com a finalidade de se obter as características dos diversos tipos de instalações e fazer a sua comparação, considerando-se o seu custo inicial e as condições da eletrificação rural brasileira.

Concluiu-se que a demanda de potência nas fazendas brasileiras deverá crescer nos próximos anos. A utilização da combinação conversor de fases-motor trifásico é uma solução viável para o problema da utilização de motores de maior porte nas regiões eletrificadas com linhas monofásicas. Os conversores de fases tem um elevado fator de potência e o tipo com regulagem automática de simetria é o mais desejável. A combinação conversor simples-motor trifásico é o tipo de instalação de menor custo, mas não se presta para acionamento de cargas variáveis. A combinação conversor com transformador motor trifásico é o tipo de maior custo.

Dentre os motores monofásicos, o motor de capacitor de dois valores, em linhas gerais, é o que apresenta melhores características, com um alto conjugado de partida, boa capacidade de aceleração das cargas, alta confiabilidade e alto fator de potência. Os motores monofásicos especiais de grande porte, com baixa corrente de partida, podem ser utilizados em aplicações que exijam baixo conjugado de partida.

O motor trifásico é o tipo de instalação mais desejável, devido as suas boas características e menor custo.

As características das cargas devem ser bem conhecidas para se fazer uma boa seleção de motores.

Uma sinótese da eletrificação rural no Brasil e a determinação dos parâmetros dos conversores de fases, são apresentados no apêndice.

000000000000000000

SUMMARY

The selection of motors for agricultural applications is complicated due to the different factors to consider. These are three types of arrangements to be used in rural areas: three phase motor supplied by three phase power, single phase motor and a phase converter - three phase motor combination.

In this study, a usearch on the available literature was done, in order to obtain the characteristics of the different types of installation, and make a comparision, taking in account the initial cost an the characteristics of rural electrification in Brazil.

It was concluded that the power demand in the brazilian farms should increase in the future. The use of the phase - three phase motor combination, is a viable solution ' for the problem of using large three phase motors in regions served by single phase lines. The phase converters have a large power factor and that with automatic numely regulation is the phase motor combination is the type of installation ' are present. The converter with transformer - three phase motor combination, has the higher cost.

The single phase motors, among the two capacitor motor, is the one that has the best characteristics, with a high starting torque, good capacity for the acceleration of loads, high reliability and high power factor. Large power single phase motors, with law starting currents way be employed, when small starting torques may be used.

Three phase motors are always prefered, because '

of their better characteristics and easier installation. In order to make a good choice of electric motors, characteristics of load must be known.

A synopsis of rural electrification in Brasil and the determination of the converter parameters of phase converters are given in the appendix.

0000000000

1. INTRODUÇÃO

Acompanhando o grande progresso experimentado pelo país, a eletrificação rural brasileira tem crescido enormemente nos últimos anos. A mecanização e a automação de diversos trabalhos agrícolas tem exigido o uso cada vez maior de motores elétricos, suprimindo a falta do homem que, em muitas regiões, deixou o campo e foi usufruir o maior conforto das cidades. O motor elétrico tem-se tornado uma peça indispensável ao progresso da agropecuária brasileira.

O sistema cooperativo foi o preferido para a implantação definitiva da eletrificação rural no país. Este sistema oferece uma série de vantagens permitindo, principalmente, o atendimento de pequenos e grandes proprietários.*

Dois tipos de sistemas distribuidores são usados para levar energia ao campo: o sistema trifásico e o monofásico. Este, adotado principalmente pela ERMIG - Eletrificação Rural de Minas Gerais S. A. - distribui energia monofásica a dois condutores (fase e neutro), com transformador abaixador em cada propriedade. Atualmente, a maioria dos motores elétricos monofásicos instalados pela ERMIG está na faixa de 5 a 7 1/2 c.v., mas acredita-se que, à medida que os proprietários rurais aumentarem o uso da energia elétrica nas suas propriedades, a tendência será a de usar motores maiores principalmente nos sistemas de bombeamento de água para irrigação.

* Outros detalhes serão apresentados no apêndice.

Sabe-se que os motores monofásicos comuns de potências mais elevadas podem causar perturbações no sistema de distribuição devido às suas altas correntes de partida. O recente advento de grandes motores monofásicos de capacitores de 2 valores (capacitor de partida e de marcha) e dos conversores de fases, que permitem o funcionamento dos motores trifásicos em linhas monofásicas, traz alternativas satisfatórias para os consumidores rurais que desejarem instalações acima de 5 e 7 1/2 c.v.

Outra alternativa seria a introdução do sistema trifásico substituindo o monofásico nas regiões que demandarem maiores potências. Estas opções, naturalmente, só podem ser feitas conhecendo-se as diversas características de desempenho dos tipos de motores disponíveis, bem como o custo inicial de sua instalação.

No presente trabalho, procurou-se obter, através de uma boa revisão de literatura, as características dos diversos tipos de instalações, que poderão ser utilizadas no meio agrícola, bem como fazer uma comparação do seu custo inicial. O bjetiva-se levar subsídios a todos os que se interessam pela eletrificação rural e, em particular, aos técnicos em engenharia agrônômica ainda pouco familiarizados com as máquinas elétricas usadas no meio rural.

Devido à existência de poucos trabalhos sobre o tema na literatura brasileira, procurou-se principalmente colher dados da experiência de técnicos norte-americanos, já bastante amadurecidos no assunto. Muitos outros trabalhos encontrados na literatura mundial, principalmente soviéticos, não puderam ser aproveitados devido à dificuldade de tradução.

Mesmo com as suas limitações, acredita-se que o presente trabalho contribuirá de algum modo para um desenvolvimento ainda maior da eletrificação rural brasileira.

o0o0o0o0o0o

2. SELEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS PARA A FAZENDA

2.1. Características desejáveis de um motor elétrico.

Os principais fatores a serem considerados para a seleção de motores elétricos são aqueles relacionados com suas características. As mais importantes são: características de partida, margem de sobrecarga, eficiência a plena carga e fator de potência a plena carga.

Nas características de partida são importantes a corrente e o conjugado. É desejável que se tenha uma baixa corrente de partida e um alto conjugado. A alta corrente de partida além de onerar o custo de instalação pode causar quedas de tensão indesejáveis na linha de alimentação.

Aconselha-se uma larga margem de sobrecarga ou, em outras palavras, um elevado conjugado máximo. Isto é importante porque pode limitar a potência do motor para acionamento de uma determinada carga. Se o motor tem um pequeno conjugado máximo, pode ser necessário recorrer a um motor maior.

Considerando-se a eficiência a plena carga como um fator de seleção de motores, é importante notar sua influência sobre o custo operacional. Se este for alto para grandes motores, um motor com alto rendimento fará uma considerável economia durante um determinado período de tempo.

Os motores devem funcionar com um alto fator de potência. A corrente drenada por motores com baixo fator de potência poderá ser suficientemente alta para prejudicar o funci

onamento de outros equipamentos ligados à linha ou afetar o custo da mesma, que terá que ter condutores superdimensionados.

2.2. Influência do sistema distribuidor.

Pode-se ter disponível, na fazenda, energia monofásica ou trifásica.

Em locais que tenham somente energia monofásica pode-se dispor de dois tipos de instalações para fornecer potência. O primeiro tipo é o motor monofásico, disponível nas suas diversas versões. O segundo tipo é a combinação conversor de fases - motor trifásico. A seleção destes dois tipos de instalações é geralmente feita pelos norte-americanos, considerando-se a diferença do custo inicial das duas instalações e as características de desempenho desejadas.

Embora os motores monofásicos sejam largamente usados nas fazendas, nas mais diversas aplicações, pode ser, às vezes, necessário recorrer aos conversores de fases para se obterem certas características de desempenho que não podem ser obtidas com os motores monofásicos, devido às normas da concessionária, distribuidora de energia.

Se a energia trifásica é disponível na fazenda, a escolha indubitavelmente deve recair sobre o motor trifásico devido ao seu baixo preço e boas características de desempenho.

2.3. Influência das cargas na seleção de motores.

São disponíveis para o uso nas fazendas os mais variados tipos de máquinas e equipamentos que podem ser acionados

por motores elétricos. A seleção dos motores para acionar estas cargas deve ser feita, segundo ARRUDAS (1), observando - se:

- a) características mecânicas da máquina a ser aci
nada.
- b) sua maior ou menor inércia, implicando numa mai
or ou menor facilidade para ser levada do repou
so até a velocidade nominal, implicando nas ca-
racterísticas do conjugado de partida do motor.
- c) o ciclo de carga que atenderia, principalmente
se dependesse da alimentação direta do operador
como, por exemplo, no caso de picadeiras de for
ragens, onde a sua grande inércia e a flutuação
características de carga exigem elevados conju-
gados de partida e máximo.

2.4. O crescimento da eletrificação rural e a seleção de moto- res.

Na fase de implantação da eletrificação rural no ' Brasil, não houve grandes problemas na seleção de motores. Na eletrificação rural trifásica havia grande disponibilidade de motores trifásicos nas mais variadas gamas de potência. Na e
letrificação monofásica, duas indústrias brasileiras de moto-
res se dispuseram a fabricar os motores monofásicos de potênci
as acima de 1 c.v., ainda inexistentes no mercado, naquela épo
ca. Os responsáveis pela eletrificação monofásica sabiam que
a demanda inicial de potência não seria muito alta, sendo pre
dominantes as faixas de 5 e 7 1/2 c.v.

O movimento de aquisição de motores pela ERMIG - Eletrificação Rural de Minas Gerais S. A. - até 1970 é apresentado no quadro 1.

Observa-se que, realmente, a maioria dos motores adquiridos situa-se nas faixas de 5 e 7 1/2 c.v.

QUADRO 1 - Aquisição de Motores Elétricos pela ERMIG até 1970.

Motor c. v.	Quantidade	%
3	450	11,8
5	1270	33,2
7,5	1556	40,6
10	551	14,4
-	3827	100,0

Fonte: ARRUDAS (1)

O quadro 2 mostra a distribuição de motores monofásicos numa pesquisa em 105 propriedades eletrificadas no estado de Minas Gerais.

QUADRO 2 - Distribuição de Motores Monofásicos em 105 Propriedades Eletrificadas no Estado de Minas Gerais.

Potência	Nº de Motores	% do Total
0,16 a 0,75 c.v.	295	24,32
1	29	2,39
1,5	6	0,50
2,0	18	1,48
3,0	83	3,84
5,0	185	15,25
7,5	320	26,38
10	59	4,86

Fonte: MARTINS (24)

Os resultados desta pesquisa confirmaram as previsões da concessionária de energia elétrica quanto à demanda de potência na eletrificação rural.

Este fato também aconteceu entre os norte-americanos. Vários autores entre os quais HOFFMANN (16), CRAWFORD .. (10) e HUBER (18), salientam que, na eletrificação monofásica norte-americana, durante muitos anos, os motores de 7 1/2 HP satisfizeram aos consumidores rurais daquele país. Entretanto, com o crescimento das atividades agrícolas, a demanda de potência também cresceu enormemente. Motores convencionais de até 15 HP foram utilizados nas linhas monofásicas. Em virtude de perturbações nas linhas de distribuição, causadas por estes motores, apareceram outros tipos com menores correntes de partida, e conversores de fases, que permitem o funcionamento de motores trifásicos nas linhas monofásicas.

No Brasil, certamente, fato semelhante deverá ocorrer. As fazendas brasileiras deverão acompanhar o grande crescimento industrial do país, e fatalmente, como aconteceu com os norte-americanos, a demanda de potência de cada propriedade deverá crescer enormemente.

ARRUDAS (1) estudando a evolução da eletrificação rural em Minas Gerais, apresenta dados de seu crescimento. Em apenas dois anos, no período 1968-1970, numa pesquisa em 97 estabelecimentos rurais, o aumento do número de motores foi de .. 37%.

O aumento do consumo por consumidor em KW/h, segundo o mesmo autor, foi de 60% no período 1966-1970. No quadro 3, mostra-se a evolução anual e mensal do consumo naquele período.

QUADRO 3 - Evolução Anual e Mensal do Consumo de Energia Elétrica na Eletrificação Rural em Minas Gerais no Período 1966 a 1970.

Exercício	Consumo Médio em KW/h	
	Mensal	Anual
1966	111	1330
1967	124	1485
1968	138	1654
1969	163	1960
1970	178	2135

Fonte: ARRUDAS (1)

O governo brasileiro tem dado grandes incentivos às atividades agrícolas, visando ao aumento da produção e da produtividade e, conseqüentemente, ao aumento do poder aquisitivo do homem do campo. Isto resultará numa maior utilização da eletricidade nas fazendas, e o uso de equipamentos para seagem e manipulação de grãos, irrigação e drenagem e outros que exigem maiores potências deverá generalizar-se por todas as regiões produtoras do país.

A seleção de motores de maiores potências deverá ser feita com cuidados especiais, principalmente os monofásicos, devido às suas altas correntes de partida. Nos critérios de seleção anteriormente indicados, referiu-se à disponibilidade nos Estados Unidos, de diversos tipos de motores monofásicos com baixa corrente de partida e conversores de fases que ainda não foram utilizados na eletrificação rural brasileira. Com o aumento da demanda de potência, estes poderão ser alternativas a serem adotadas na eletrificação monofásica.

Para se fazer uma seleção adequada de motores é imprescindível o conhecimento das características dos diversos tipos de equipamentos, do seu custo inicial de instalação e selecioná-los segundo o tipo de sistema distribuidor disponível. Na revisão de literatura, a seguir, serão apresentadas as diversas características dos motores e conversores de fases adaptáveis aos trabalhos agrícolas, visando a sua seleção, segundo os sistemas de distribuição utilizados na eletrificação rural.

o0o0o0o0o0o0o0o0o

3. REVISÃO DE LITERATURA

As características de funcionamento dos motores elétricos são avaliadas pelas suas características de desempenho. Estas características são geralmente relações entre conjugado e velocidade de rotação, corrente e velocidade de rotação, conjugado e corrente, conjugado e potência de entrada e conjugado e fator de potência.

VIDRINE (34) faz as considerações a seguir sobre a avaliação das características, segundo estas relações:

A relação conjugado-velocidade de rotação é geralmente dada para toda gama de velocidades do motor, mostrando as seguintes características da máquina: conjugado com rotor travado, conjugado-máximo e conjugado mínimo. Estes termos são definidos como se segue pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2).

- Conjugado com rotor bloqueado: Mínimo conjugado medido, que o motor desenvolve em repouso para qualquer posição angular do rotor, à tensão e frequência nominais.
- Conjugado mínimo: Menor conjugado desenvolvido pelo motor, entre o repouso e a velocidade de rotação correspondente ao conjugado máximo, sob tensão e frequência nominais.
- Conjugado máximo: Maior conjugado que o motor pode desenvolver sob tensão e frequência nominais.

A partir destas características, pode-se, imediatamente, saber se um motor pode ou não acionar uma determinada carga.

A relação corrente-velocidade de rotação também é geralmente dada através de toda gama de velocidade do motor. A corrente com rotor bloqueado é o "valor eficaz máximo de corrente, medido em regime permanente, absorvida pelo motor em repouso, para todas as posições angulares de seu rotor, sob tensão e frequência nominais" segundo definição da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2).

A relação corrente-velocidade de rotação mostra a influência do motor sobre a linha, durante a partida.

As outras características de desempenho são geralmente dadas somente para a região de funcionamento estável. Destas relações pode-se determinar as características de funcionamento do motor.

A relação conjugado-corrente determina a dimensão dos condutores que irão alimentar o motor. Conjugado-potência de entrada determina o custo operacional do motor para qualquer carga. Conjugado-eficiência determina a região de funcionamento mais eficiente. Conjugado-fator de potência fornece o fator de potência do motor para qualquer carga.

A seleção de motores é frequentemente feita baseando-se no conjugado com rotor bloqueado, conjugado máximo e corrente com rotor bloqueado.

Três tipos de instalações para acionamento de equi-

pamentos agrícolas são disponíveis na eletrificação rural norte americana: motor monofásico, motor trifásico e a combinação conversor de fases-motor trifásico.

Os conversores de fases segundo vários autores entre os quais SODERHOLM (32), CHHABRA et alii (8), CRAWFORD (10) e BROOKS et alii (5) estão sendo largamente utilizados nos Estados Unidos. Quando as linhas trifásicas não podem ser estendidas economicamente, segundo CHARITY et alii (6), o conversor de fases é uma boa solução.

As características destes três tipos de instalações, principalmente dos conversores de fases, ainda pouco conhecidos no país, serão apresentadas a seguir.

o0o0o0o0o0o0o

3.1. MOTORES MONOFÁSICOS

Segundo VIDRINE (34), tres tipos de motores monofásicos, adequados para acionamento de equipamentos agrícolas, são disponíveis no mercado norte-americano: motor a capacitores, de repulsão-indução e motor de indução de partida a repulsão. Os motores a capacitores são disponíveis em duas formas, chamados de motor de capacitor de partida (indução em marcha) e motor de capacitor de dois valores. O autor salienta que estes tipos de motores tem características de desempenho favoráveis e, geralmente, preços equivalentes, conforme revelado pelas listas de preços dos fabricantes. Os motores a capacitores são fabricados em potência de até 20 HP e os outros dois tipos com potência máxima de 7 1/2 HP.

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2) define aqueles tipos de motores como se segue:

- Motor de capacitor de partida: motor de capacitor no qual o enrolamento auxiliar de partida e o capacitor ligados em série, permanecem no circuito somente durante a partida.
- Motor de capacitor de dois valores: motor de capacitor usando valores diferentes de capacitância para a partida e para o funcionamento normal.
- Motor de indução de partida a repulsão: motor de repulsão no qual os segmentos do comutador são curto-circuitados ou ligados de outra forma, a uma velocidade de rotação apropriada, a fim de formar o equivalente a um enrolamento de gaiola.

Na eletrificação rural monofásica brasileira, segundo ARRUDAS (1), o motor monofásico escolhido após consideração de vários fatores foi o motor de partida a capacitância e indução em marcha. O autor enfatiza que aquele tipo de motor foi o que mais satisfizesse aos requerimentos técnico-econômicos preconizados pela ERMIG - Eletrificação Rural de Minas Gerais S. A., empresa pioneira na eletrificação rural no Brasil.

Era preferido na eletrificação rural norte-americana o motor de repulsão-indução que agora, segundo HEMPKER (15), está sendo substituído pelo motor de capacitor de dois valores. Ele atribui esta troca à sua simplicidade de construção, menor custo de manutenção, mínima interferência em rádio e televisão e baixo nível de ruído. Os resultados encontrados por STERE .. (33), na comparação de motores indução-repulsão e de capacitores de dois valores, indicaram que as características destes últimos foram superiores às aquelas encontradas para os motores repulsão-indução.

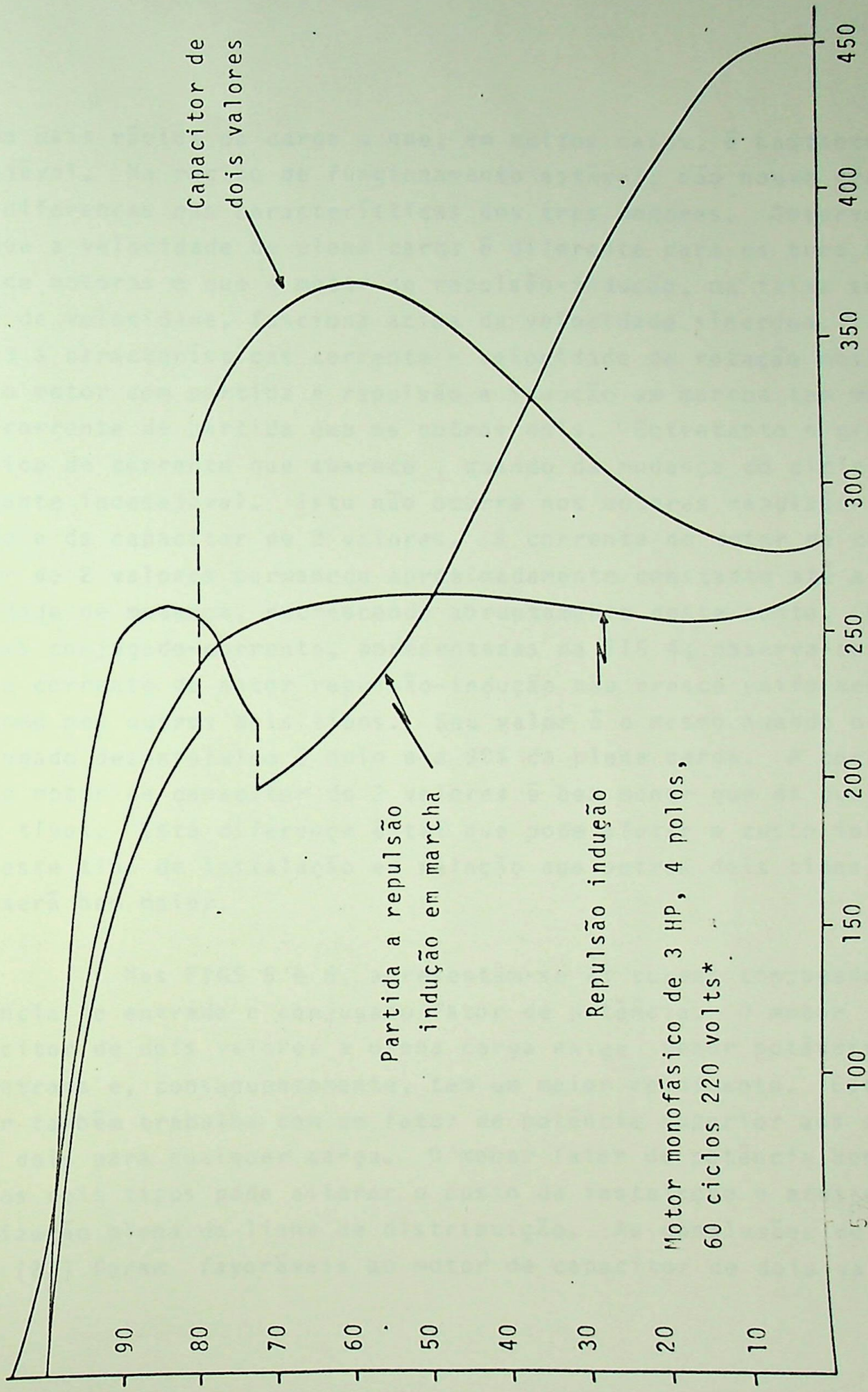
Como o motor de capacitor de dois valores ainda não ganhou popularidade no país, será narrado aqui o seu princípio de funcionamento que é descrito por HEMPKER (15) como segue:

"No diagrama da FIG. 1, quando o motor é alimentado pela linha, haverá fluxo de corrente simultaneamente através do enrolamento principal, dos capacitores de marcha em série com o enrolamento auxiliar e através dos contatos normalmente fechados. Isto faz com que seja energizada a bobina do relé normalmente aberto que, conseqüentemente, fecha os seus contatos colocando, no circuito, os capacitores de partida. A bobina do relé normalmente fechado opera através da metade do enrolamento auxiliar. Quando o motor acelera, a tensão nos terminais da bobina aumenta, devido à variação do ângulo de fase entre os enrolamentos.

Atingida uma determinada tensão, o relê normalmente fechado opera, abrindo seus contatos, retirando os capacitores de partida do circuito. Este ponto é conhecido como velocidade de mudança e caracteriza-se por uma queda abrupta do conjugado na curva conjugado - velocidade de rotação. Enquanto o motor estiver funcionando na região estável, a bobina do relê normalmente fechado permanece energizada, não permitindo a reentrada do capacitor de partida no circuito. Durante o funcionamento normal, o enrolamento principal fica em paralelo com o circuito do enrolamento auxiliar que está em série com os capacitores de marcha.

Durante a partida, os capacitores de partida e de marcha estão em paralelo, propiciando uma maior capacitância e, conseqüentemente, um maior conjugado de partida. Durante o funcionamento, os capacitores de marcha propiciam um adequado conjugado de marcha e melhoria do fator de potência do motor. Os capacitores de partida geralmente são do tipo eletrolítico e os de marcha, do tipo a óleo.

MAROUS (23) estudando os tres tipos de motores estimou as curvas características de cada um, como são apresentadas nas FIGS 2 a 6. Estes resultados são válidos para motores de 3 HP, 4 polos e 220 V. Na FIG 2 são apresentadas as características conjugado - velocidade de rotação. Nota-se que existe uma larga diferença nas características de partida de cada motor. O tipo de partida a repulsão e indução em marcha foi o que apresentou o maior conjugado com rotor bloqueado. Isto é muito favorável quando as cargas apresentam grande inércia na partida. O autor ressalta o fato de que os motores de capacitores de dois valores, até a velocidade de mudança, aumentam o seu conjugado, ao passo que os outros diminuem. Isto permite uma acele-



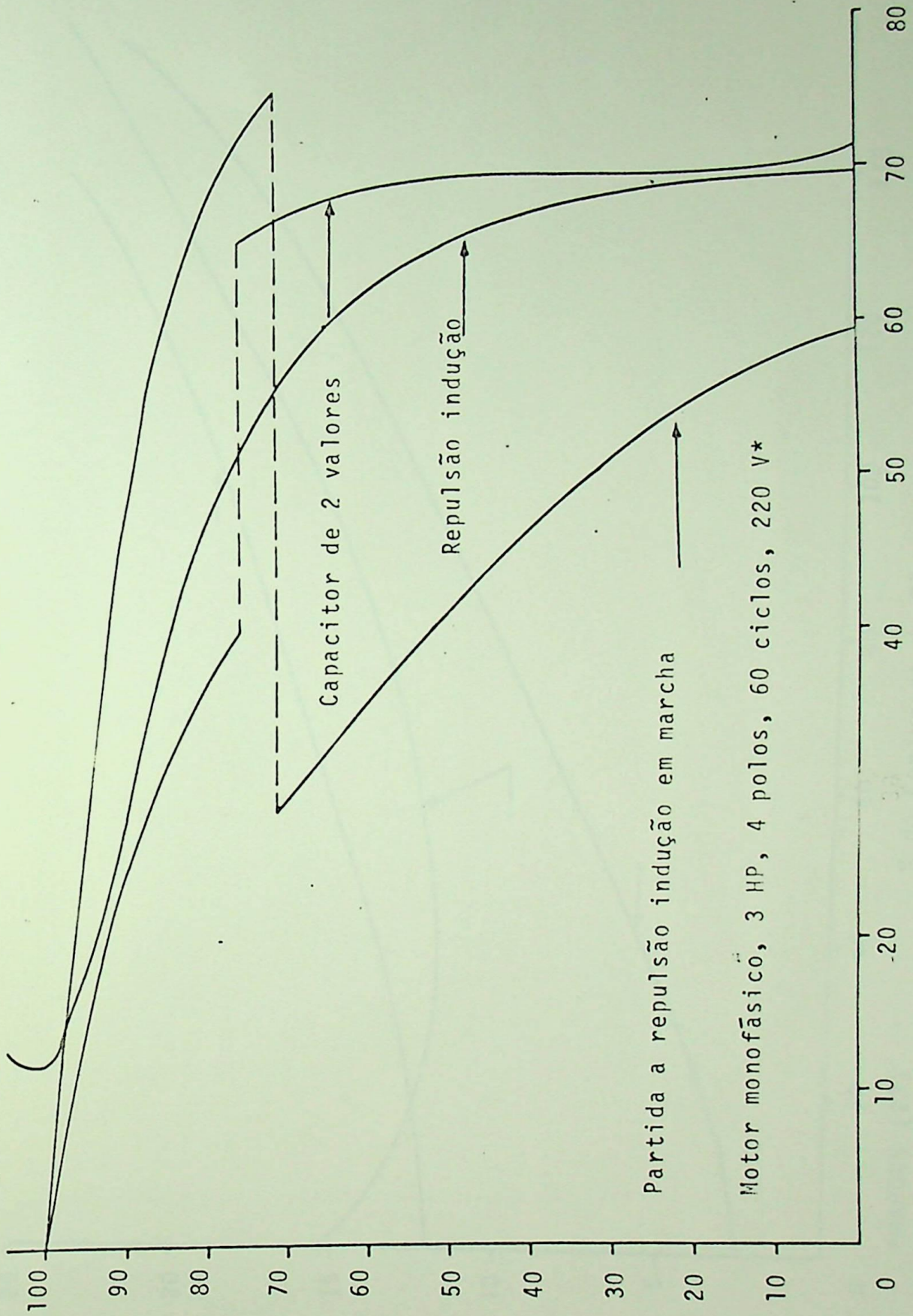
Motor monofásico de 3 HP, 4 polos,
60 ciclos 220 volts*

Comparação Conjuguado-Velocidade para Motores Monofásicos

Figura 2

ração mais rápida da carga o que, em muitos casos, é bastante 'desejável. Na região de funcionamento estável, não houve grandes diferenças nas características dos tres motores. Observa-se que a velocidade de plena carga é diferente para os tres tipos de motores e que o motor de repulsão-indução, na faixa superior de velocidade, funciona acima da velocidade síncrona. Na FIG 3 a características corrente - velocidade de rotação mostra que o motor com partida a repulsão e indução em marcha tem menor corrente de partida que os outros dois. Entretanto o grande pico de corrente que aparece, quando da mudança do ciclo, é bastante indesejável. Isto não ocorre nos motores repulsão-indução e de capacitor de 2 valores. A corrente no motor de capacitor de 2 valores permanece aproximadamente constante até a velocidade de mudança, decrescendo abruptamente neste ponto. Nas curvas conjugado-corrente, apresentadas na FIG 4, observa-se ' que a corrente do motor repulsão-indução não cresce uniformemente como nos outros dois tipos. Seu valor é o mesmo quando o ' conjugado desenvolvido é nulo e a 90% da plena carga. A corrente do motor de capacitor de 2 valores é bem menor que os outros dois tipos. Esta diferença é tal que pode afetar o custo inicial deste tipo de instalação em relação aos outros dois tipos, ' que será bem maior.

Nas FIGS 5 e 6, apresentam-se as curvas conjugado - potência de entrada e conjugado fator de potência. O motor de capacitor de dois valores a plena carga exige menor potência ' de entrada e, conseqüentemente, tem um maior rendimento. Este motor também trabalha com um fator de potência superior aos outros dois para qualquer carga. O menor fator de potência dos ' outros dois tipos pode alterar o custo da instalação e afetar a utilização plena da linha de distribuição. As conclusões de MA ROUS (23) foram favoráveis ao motor de capacitor de dois valo-



Partida a repulsão indução em marcha

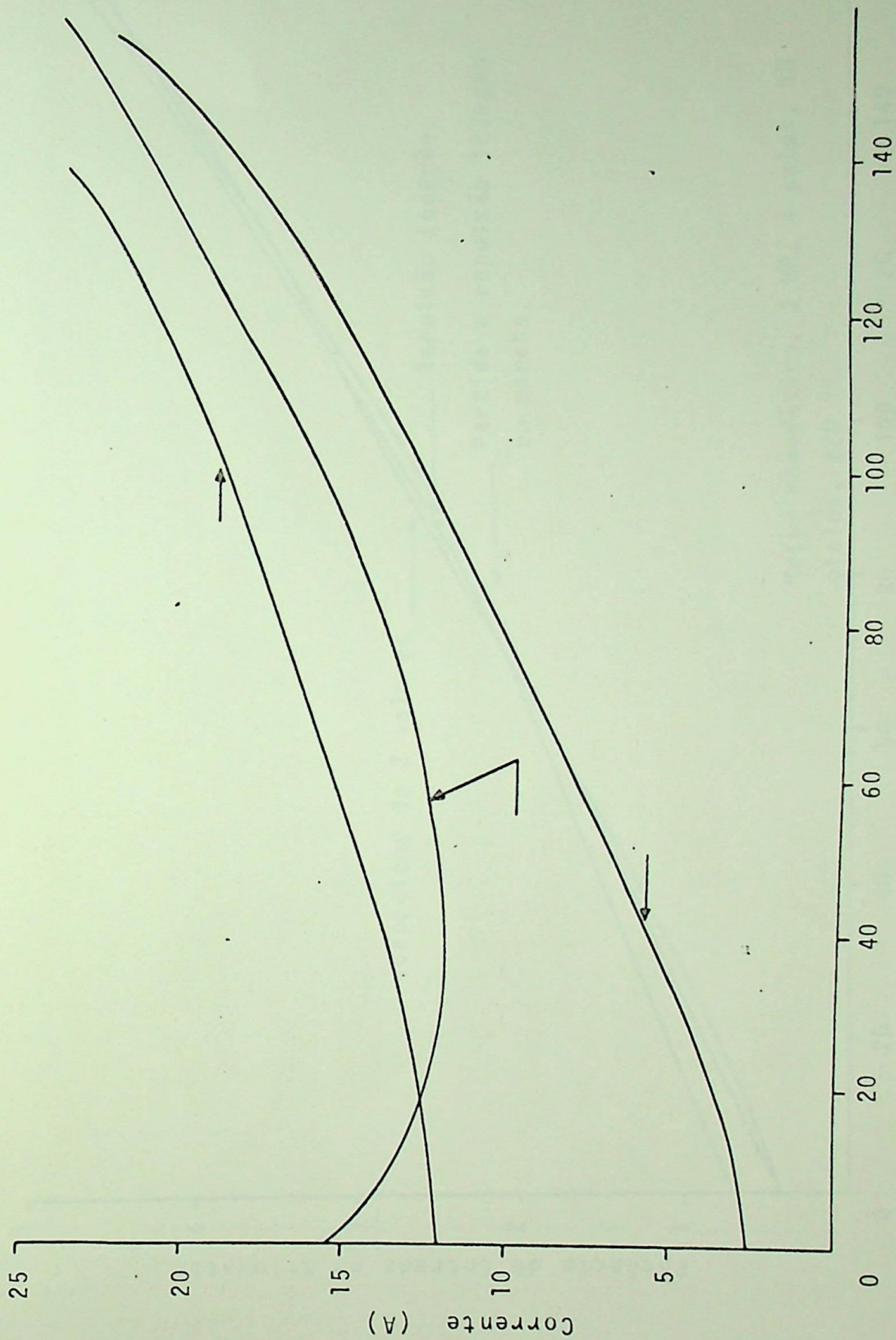
Motor monofásico, 3 HP, 4 polos, 60 ciclos, 220 V*

* MAROUS (23)

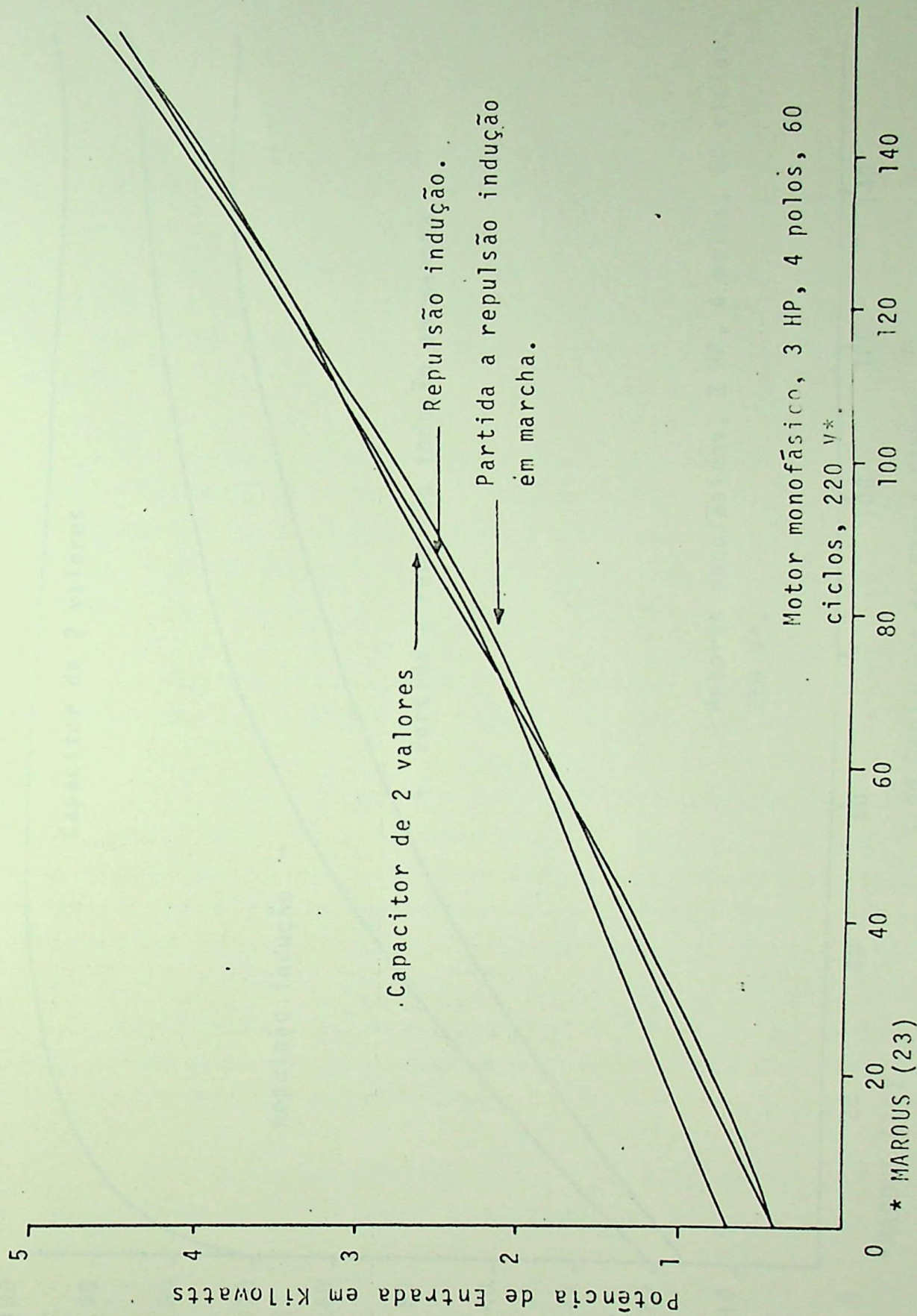
Corrente (A)

Comparação Corrente-Velocidade para Motores Monofásicos

Figura 3

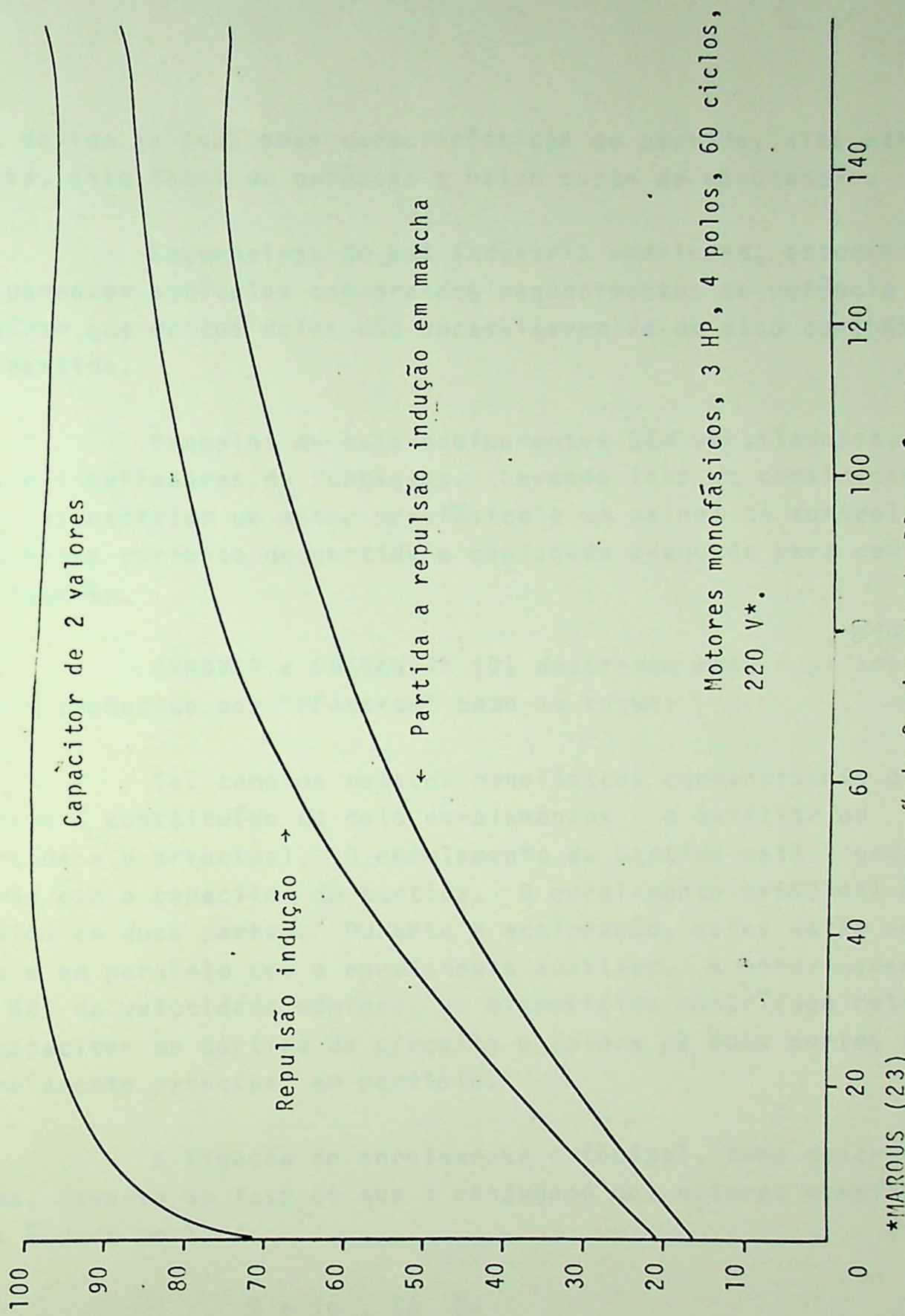


*MARROUS (23)
 % do Conjugado de Plena Carga
 Comparação Conjugado-Corrente para Motores Monofásicos
 Figura 4



Comparação Conjugado-Potência de Entrada p/ Motores Monofásicos

Figura 5



Motores monofásicos, 3 HP, 4 polos, 60 ciclos, 220 V*.

*MAROUS (23)

% do Conjugado de Plena Carga

Comparação Conjugado-Fator de Potência Para Motores Monofásicos

Figura 6

res devido às suas boas características de partida, alta eficiência, alto fator de potência e baixo custo de manutenção.

Engenheiros de uma indústria americana, estudando e equipamentos agrícolas com grandes requerimentos de potência concluíram que muitos deles não necessitavam de um alto conjugado de partida.

Exemplos de tais equipamentos são ventiladores, bombas e insufladores de forragens. Levando isto em consideração, foi desenvolvido um motor monofásico e um painel de controle, com baixa corrente de partida e conjugado adequado para certas aplicações.

CONOVER e SHANKWITE (9) descrevem este equipamento, que é conhecido por "MEactron" como se segue:

Tal como os motores monofásicos convencionais o MEactron é constituído de dois enrolamentos - o auxiliar ou de partida e o principal. O enrolamento de partida está ligado em série com o capacitor de partida. O enrolamento principal é dividido em duas partes. Durante a aceleração, estes estão em série e em paralelo com o enrolamento auxiliar. Aproximadamente 92% da velocidade nominal, um dispositivo centrífugo retira o capacitor de partida do circuito e coloca as duas partes do enrolamento principal em paralelo.

A ligação do enrolamento principal, como descrito a cima, deve-se ao fato de que o conjugado dos motores monofásicos é dado por:

$$T = I_a \cdot I_p \frac{N_a}{N_p}$$

Onde:

T = conjugado do motor.

I_a = corrente no enrolamento auxiliar.

I_p = corrente no enrolamento principal.

N_a = espiras do enrolamento auxiliar.

N_p = espiras do enrolamento principal.

E a corrente total drenada pelo motor sendo
 $I_t = \sqrt{I_p^2 + I_a^2}$, para que esta seja reduzida e, mantido o mesmo conjugado, segundo as fórmulas acima precisa-se manter o produto I_a . I_p e reduzir a soma (I_a² + I_p²). Para isto devemos ter I_a e I_p aproximadamente iguais. Esta igualdade é conseguida ligando-se o enrolamento principal em série durante a partida e em paralelo, durante o funcionamento. Isto resulta numa diminuição da corrente I_t, mas, devido à alteração na relação $\frac{N_a}{N_p}$, o conjugado também fica reduzido. O conjugado de partida, segundo os autores, será cerca de 60 a 100% do conjugado de plena carga.

O quadro 4 mostra uma comparação das correntes de partida do "MEactron" com as correntes admissíveis pelas normas americanas.

QUADRO 4 - Correntes de Partida do MEactron Comparadas com as Normas da NEMA.

Potência	NEMA (A)	MEactron (A)
15	390	150
20	520	200
25	650	250
30	780	290
40	1040	390

Fonte: CONOVER e SHANKWITE (9).

Os autores ressaltam o fato de que este equipamento tem inúmeras vantagens em relação ao trator, para acionamento de cargas estacionárias e a vantagem de menor custo em relação aos conversores de fases.

CRIST (12), estudando motores semelhantes ao descrito acima, concluiu que as características que fazem este tipo de motor bastante desejáveis são seu alto fator de potência numa larga diversificação de cargas, sua alta eficiência e boa margem de sobrecarga.

o0o0o0o0o0o0o0o

3.2. MOTORES TRIFÁSICOS

Segundo HEMPKER (15), o tipo de motor trifásico mais encontrado nas fazendas norte-americanas é o motor de indução tipo gaiola.

MELLO e MENEZES JUNIOR (25) afirmam que, também nas fazendas brasileiras onde a energia trifásica é disponível, este é o tipo mais usado. Esta preferência é devida, principalmente, a sua simplicidade e disponibilidade no mercado em larga diversificação de modelos e potências.

WOLL (35) afirma que sua fabricação em grande escala faz com que seja disponível a baixo custo.

Os motores polifásicos de indução são classificados em categorias, designadas pelas letras iniciais do alfabeto. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (3) designa as categorias A, B, C, D e F. O significado destas letras é o seguinte:

Categoria A - Conjugado de partida normal, corrente de partida alta, baixo escorregamento.

Categoria B - Conjugado de partida normal, corrente de partida normal, baixo escorregamento.

Categoria C - Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, baixo escorregamento.

Categoria D - Conjugado de partida alto, corrente de partida normal, alto escorregamento.

Categoria F - Conjugado de partida baixo, corrente de partida baixa, baixo escorregamento.

Segundo LIBBY (22), estas diferentes categorias são devidas à construção do rotor. Os motores da categoria A são os mais simples e de menor custo. Os da categoria F são máquinas com potência superior a 30 HP.

O motor trifásico de indução tipo gaiola é o mais simples dos motores disponíveis no mercado. Ele não requer enrolamentos especiais para a partida, como os motores monofásicos, que exigem maiores cuidados de manutenção. Os motores trifásicos também podem funcionar nas linhas monofásicas através de um conversor de fases.

Segundo GALTER (13), os motores trifásicos possuem várias vantagens sobre os monofásicos. Estas são relacionadas abaixo:

1. Maior eficiência.
2. Maior confiabilidade.
3. Maior vida.
4. Maior segurança em ambientes explosivos que os monofásicos de repulsão.
5. Custo inicial menor para motores com potência acima de 1 HP; esta diferença aumenta com a potência.

Segundo estas vantagens, os motores trifásicos são superiores aos monofásicos. O principal obstáculo do uso generalizado nas instalações rurais é a ausência de linhas trifásicas em certas regiões. Sua presença depende da política da concessionária de energia elétrica da região e de algumas circunstâncias particulares.

o0o0o0o0o0o0o0o

3.3. COMPARAÇÃO DE MOTORES MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS

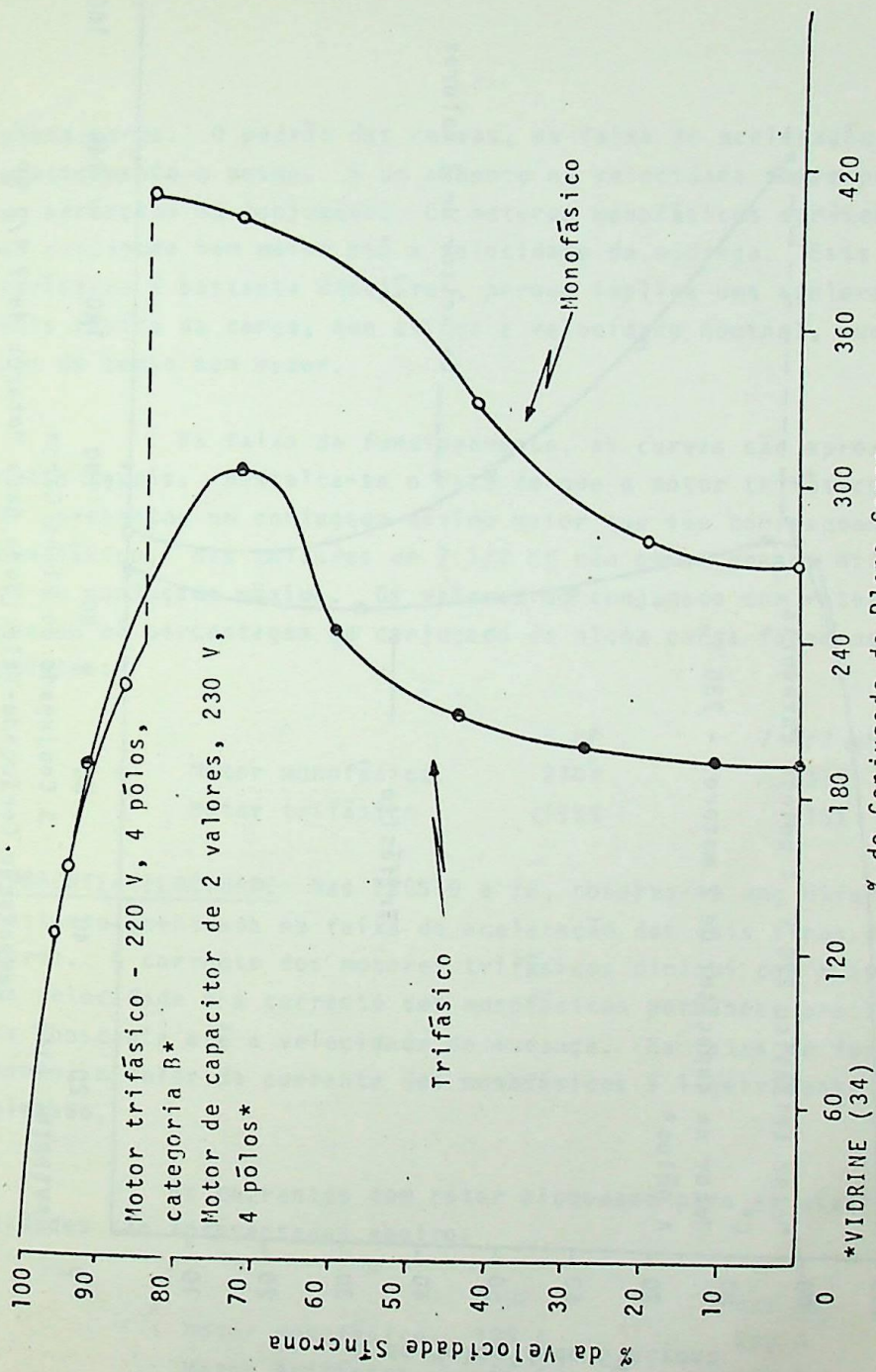
Os motores elétricos monofásicos e trifásicos podem ser comparados, sob diversos aspectos. Para a seleção de motores adequados para aplicações agrícolas, é importante o conhecimento de suas características de desempenho e o custo inicial da instalação. A seguir, a revisão de literatura é orientada para estes dois aspectos da comparação de motores monofásicos e trifásicos, utilizados na eletrificação rural.

3.3.1. CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO

A comparação das características de desempenho de máquinas elétricas é feita através de suas curvas características. As curvas apresentadas a seguir foram obtidas dos resultados encontrados por VIDRINE (34). Elas são válidas para motores monofásicos e trifásicos, de 5 e 7 1/2 HP, como indicado nas figuras. Estas curvas são denominadas: conjugado-velocidade (FIGS 7 e 8); corrente-velocidade (FIGS 9 e 10); conjugado - corrente (FIGS 11 e 12); conjugado-potência de entrada (FIGS 13 e 14); conjugado-rendimento (FIGS 15 e 16); e conjugado - fator de potência (FIGS 17 e 18):

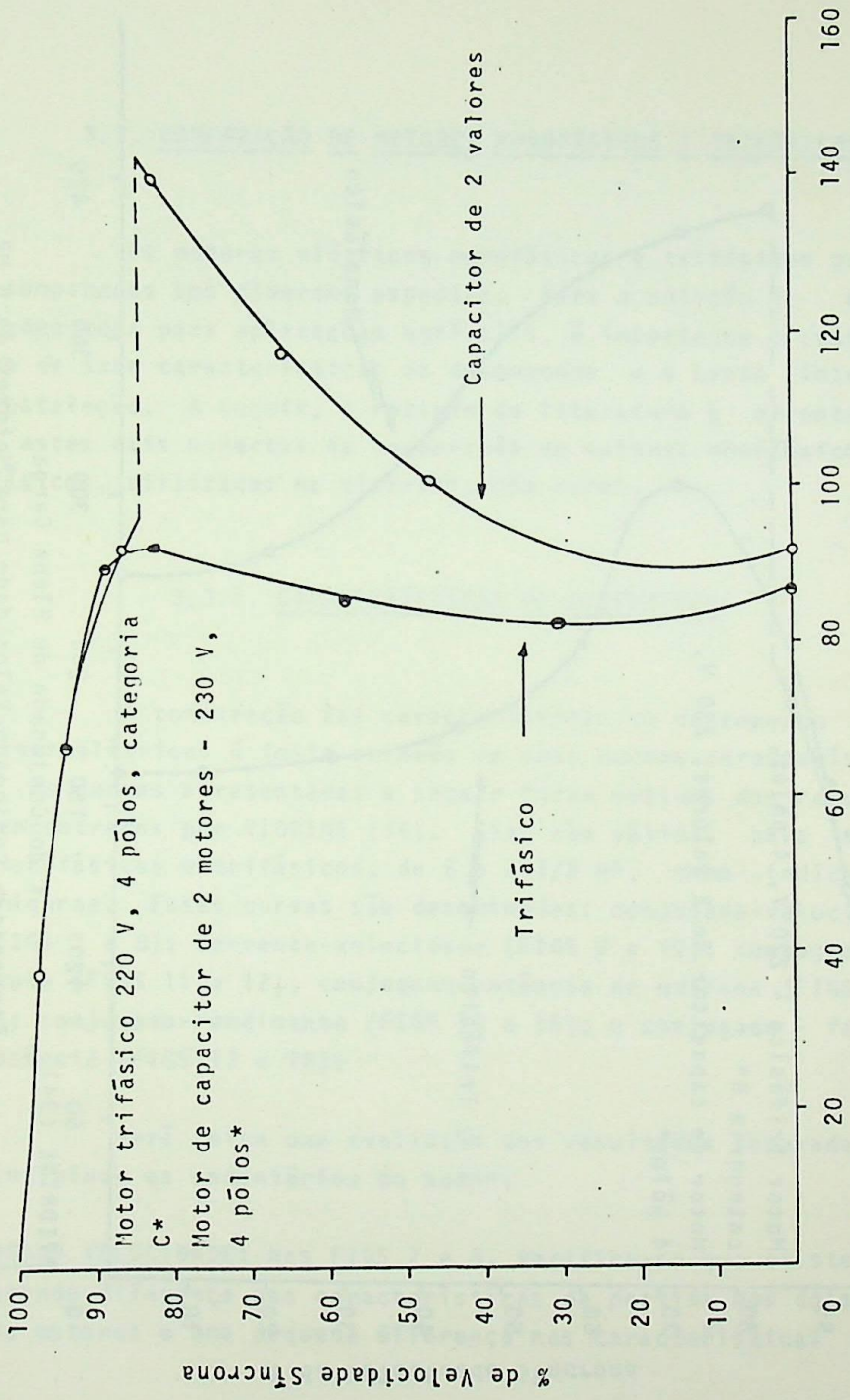
Será feita uma avaliação dos resultados separadamente, incluindo os comentários do autor.

CONJUGADO VELOCIDADE: Nas FIGS 7 e 8, verifica-se que existe uma grande diferença nas características de partida dos dois tipos de motores e uma pequena diferença nas características de



Comparação Conjugado-Velocidade para Motores de 5 HP

Figura 7



Motor trifásico 220 V, 4 pólos, categoria C*

Motor de capacitor de 2 motores - 230 V, 4 pólos*

Capacitor de 2 valores

Trifásico

*VIDRINE (34)

Comparação Conjugado-Velocidade para Motores de 7 1/2 HP

Figura 8

plena carga. O padrão das curvas, na faixa de aceleração, é praticamente o mesmo. A um aumento na velocidade corresponde um acréscimo no conjugado. Os motores monofásicos apresentaram um conjugado bem maior até a velocidade de mudança. Esta característica é bastante desejável, porque implica uma aceleração mais rápida da carga, que atinge a velocidade nominal, num período de tempo bem menor.

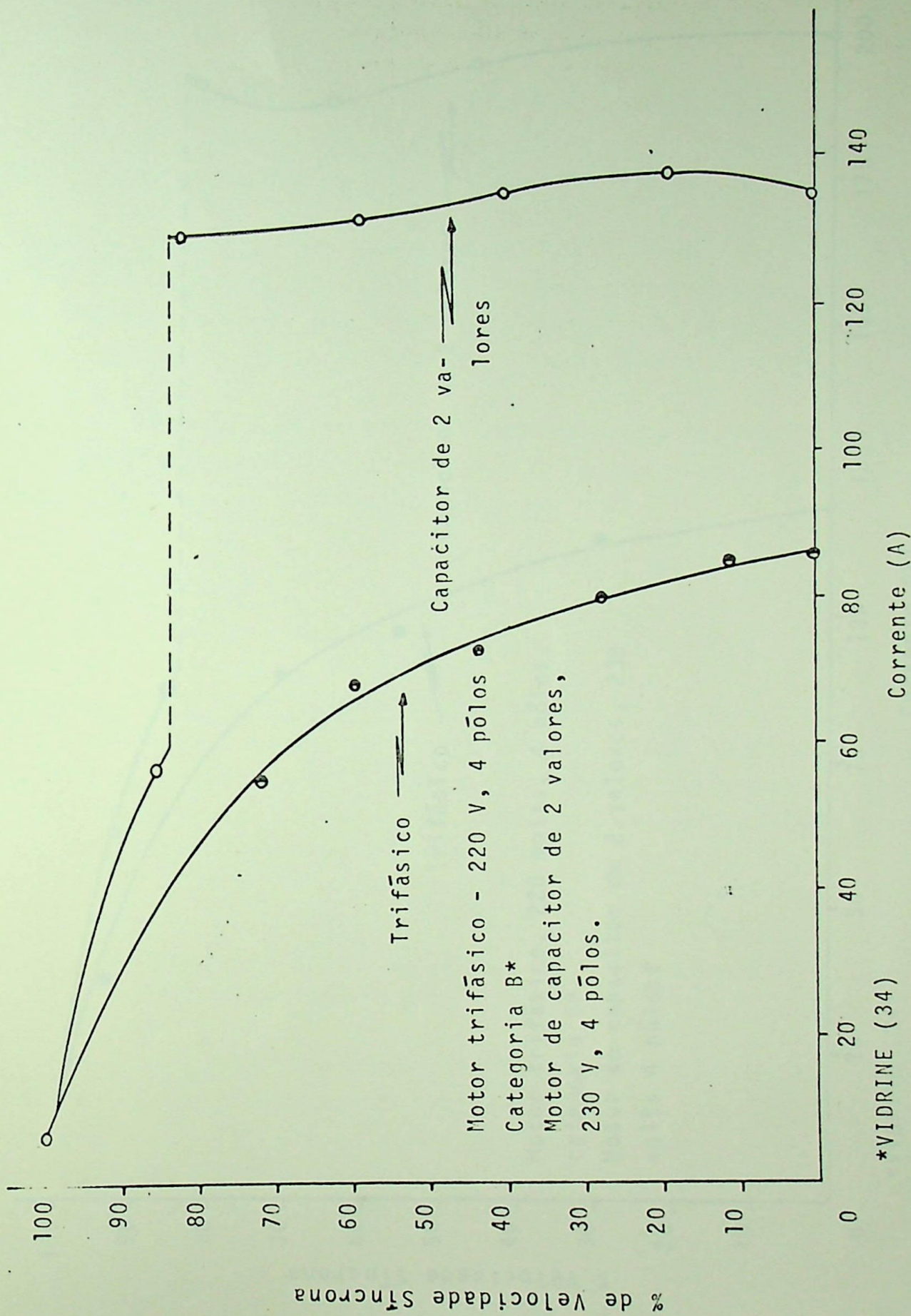
Na faixa de funcionamento, as curvas são aproximadamente iguais. Ressalta-se o fato de que o motor trifásico de 5 HP apresentou um conjugado máximo maior que seu correspondente monofásico. Nas unidades de 7 1/2 Hp não houve grande diferença no conjugado máximo. Os valores do conjugado com rotor bloqueado em percentagem do conjugado de plena carga foram os seguintes:

	5 HP	7 1/2 HP
Motor monofásico	270%	231%
Motor trifásico	195%	215%

CORRENTE-VELOCIDADE: Nas FIGS 9 e 10, observa-se uma diferença bastante acentuada na faixa de aceleração dos dois tipos de motores. A corrente dos motores trifásicos diminui com o aumento da velocidade e a corrente dos monofásicos permanece praticamente constante até a velocidade de mudança. Na faixa de funcionamento, o valor da corrente dos monofásicos é ligeiramente mais elevado.

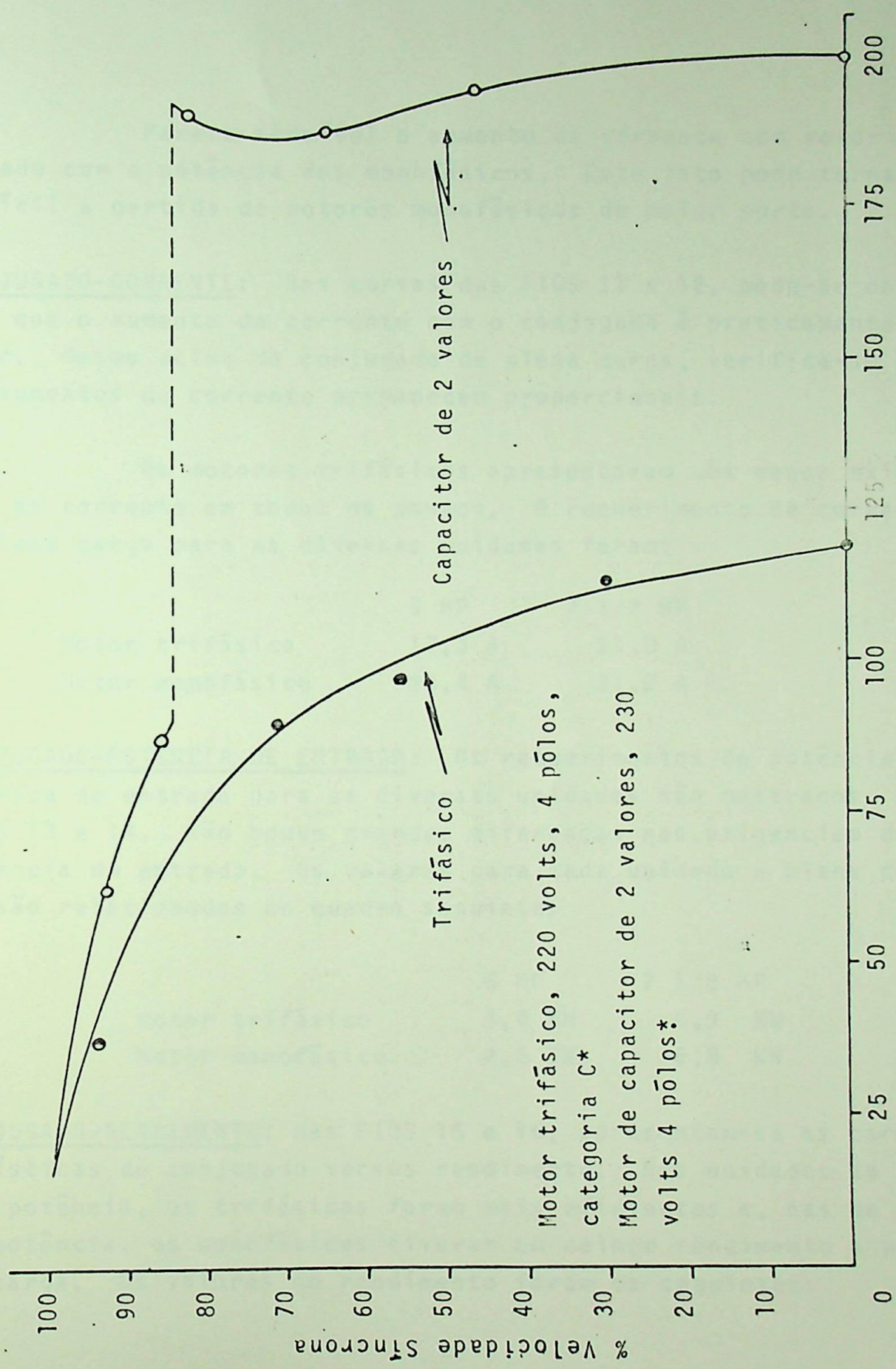
As correntes com rotor bloqueado para as diversas unidades são apresentadas abaixo:

	5 HP	7 1/2 HP
Motor monofásico	135 A	200 A
Motor trifásico	86 A	118 A



Comparação Corrente-Velocidade para Motores de 5 HP

Figura 9



Motor trifásico, 220 volts, 4 pólos, categoria C*
Motor de capacitor de 2 valores, 230 volts 4 pólos*

*VIDRINE (34)

Comparação Corrente-Velocidade para Motores de 7 1/2 HP

Figura 10

Parece sensível o aumento da corrente com rotor bloqueado com a potência dos monofásicos. Este fato pode tornar - difícil a partida de motores monofásicos de maior porte.

CONJUGADO-CORRENTE: Nas curvas das FIGS 11 e 12, pode-se observar que o aumento da corrente com o conjugado é praticamente linear. Mesmo acima do conjugado de plena carga, verifica-se que os aumentos de corrente permanecem proporcionais.

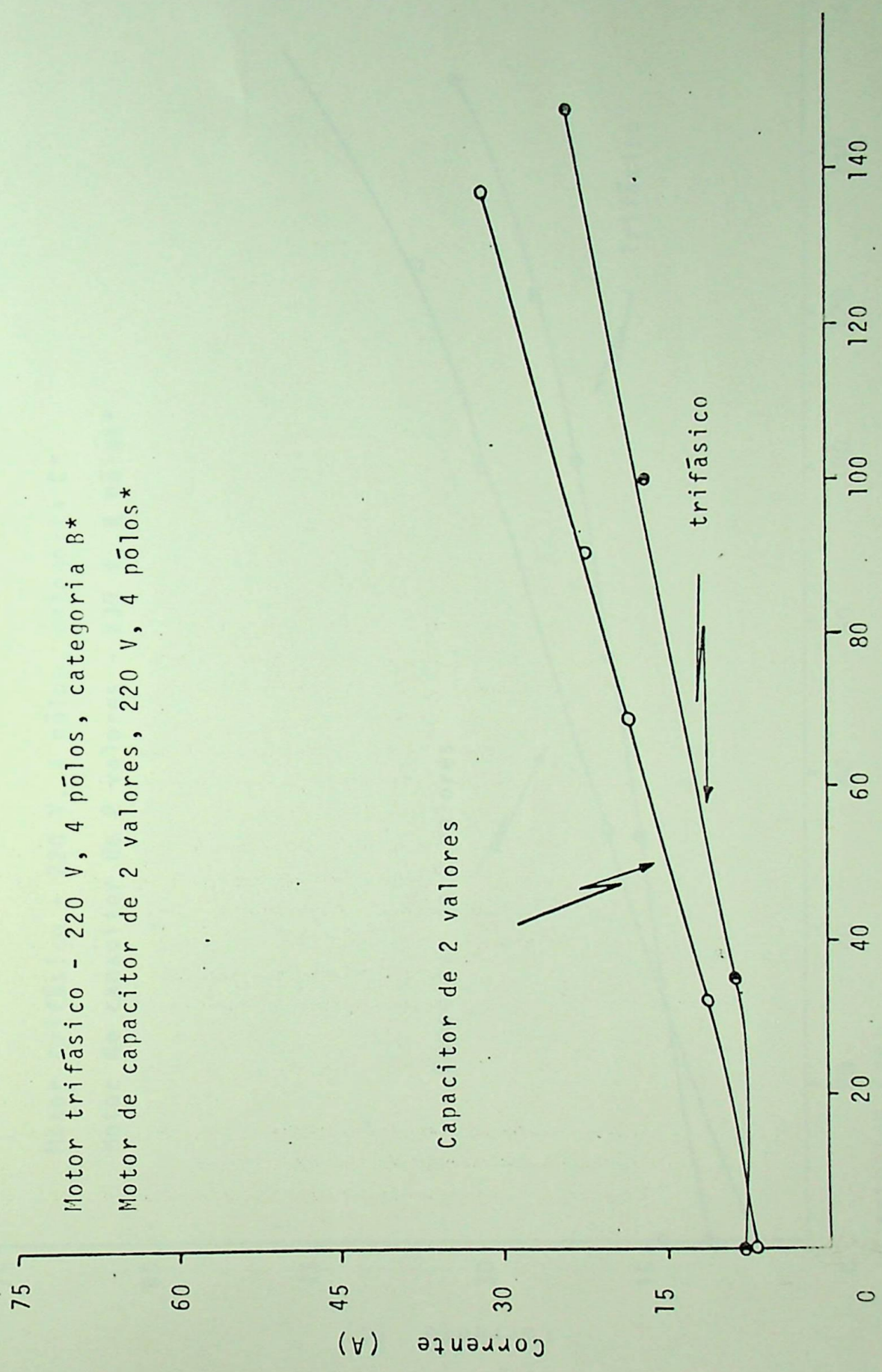
Os motores trifásicos apresentaram uma menor exigência de corrente em todos os pontos. O requerimento de corrente a plena carga para as diversas unidades foram:

	5 HP	7 1/2 HP
Motor trifásico	17,3 A	21,8 A
Motor monofásico	23,4 A	31,2 A

CONJUGADO-POTÊNCIA DE ENTRADA: Os requerimentos de potência elétrica de entrada para as diversas unidades são mostrados nas FIGS 13 e 14. Não houve grandes diferenças nas exigências de potência de entrada. Os valores para cada unidade a plena carga são relacionados no quadro seguinte:

	5 HP	7 1/2 HP
Motor trifásico	4,4 KW	6,9 KW
Motor monofásico	4,5 KW	6,8 KW

CONJUGADO-RENDIMENTO: Nas FIGS 15 e 16, apresentam-se as características do conjugado versus rendimento. Nas unidades de menor potência, os trifásicos foram mais eficientes e, nas de maior potência, os monofásicos tiveram um melhor rendimento a plena carga. Os valores do rendimento foram os seguintes:

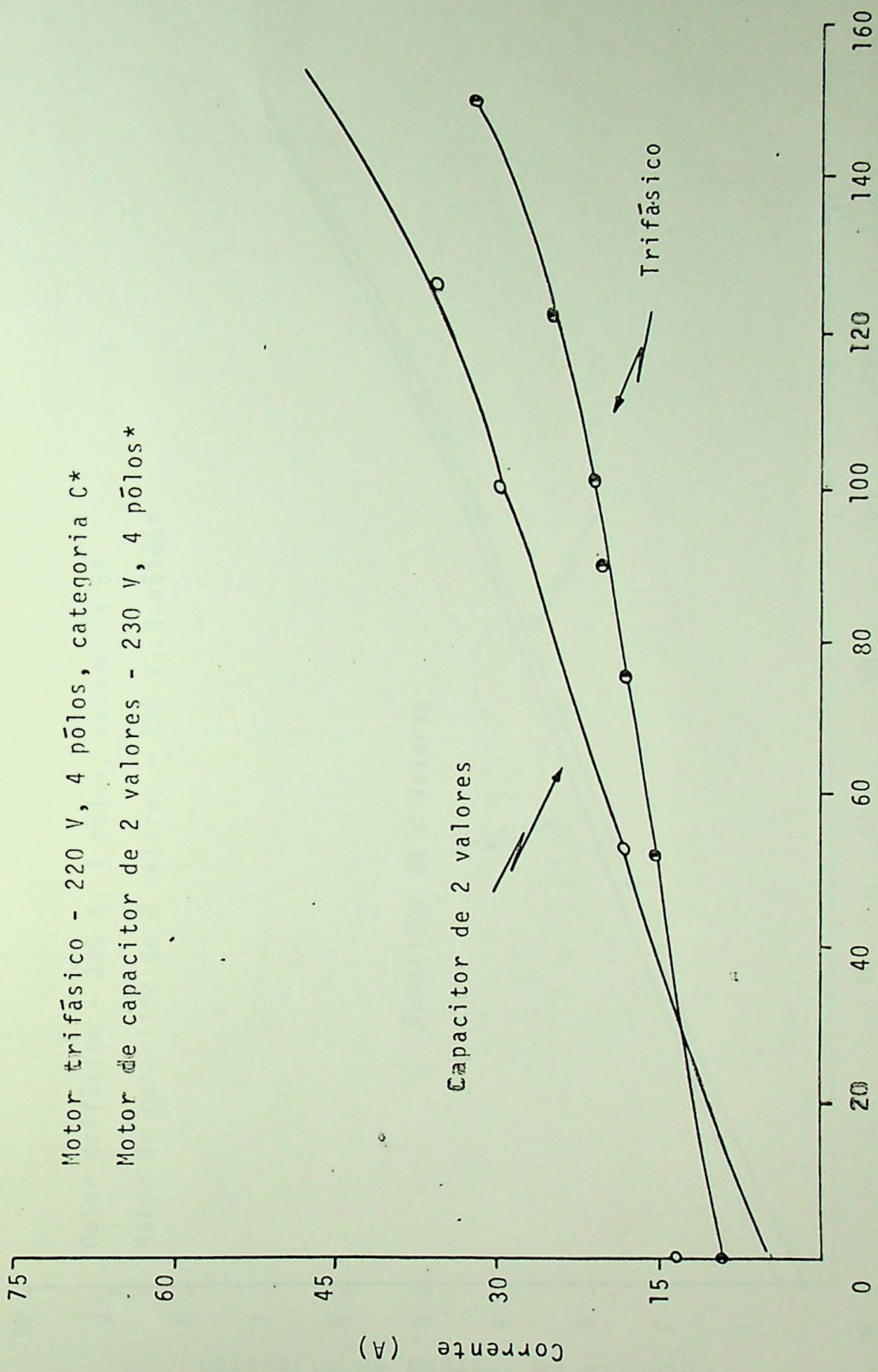


*VIDRINE (34)

% de Conjugado de Plena Carga
 Comparação Conjugado-Corrente para Motores de 5 HP

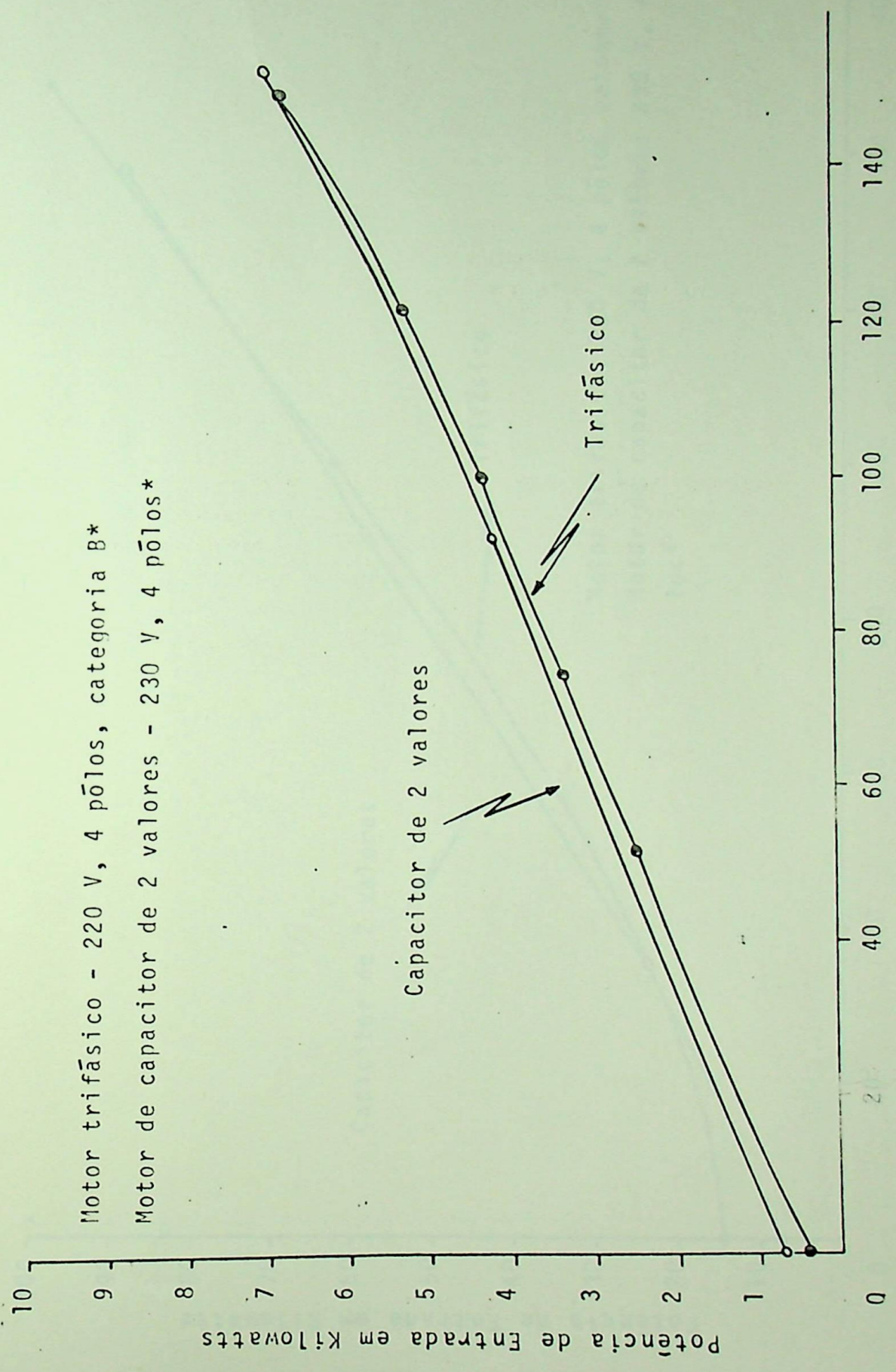
Figura 11

Motor trifásico - 220 V, 4 pólos, categoria C*
Motor de capacitor de 2 valores - 230 V, 4 pólos*



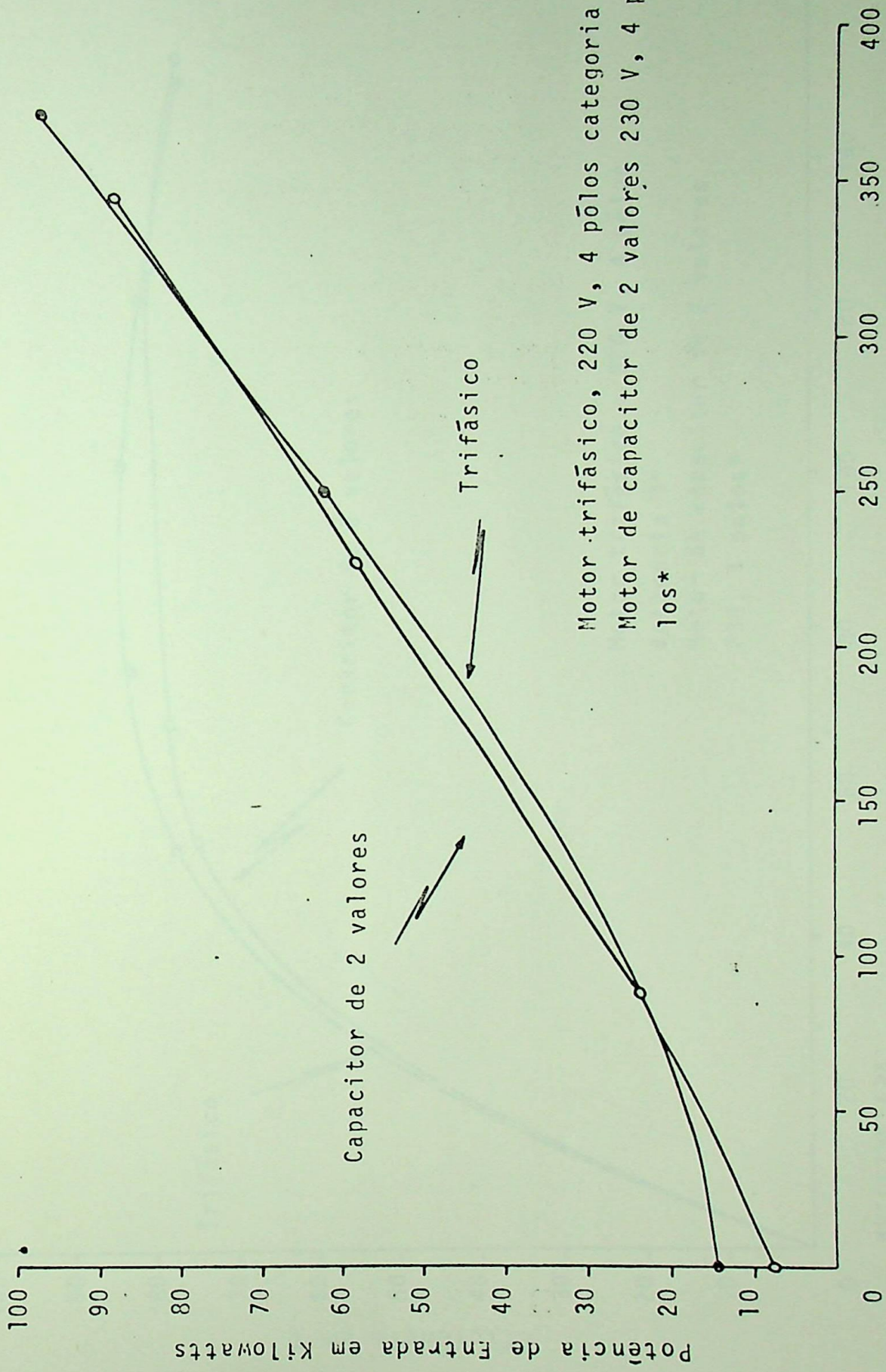
*VIDRINE (34)
Comparação Conjugado-Corrente para Motores de 7 1/2 HP

Figura 12



Motor trifásico - 220 V, 4 pólos, categoria B*
Motor de capacitor de 2 valores - 230 V, 4 pólos*

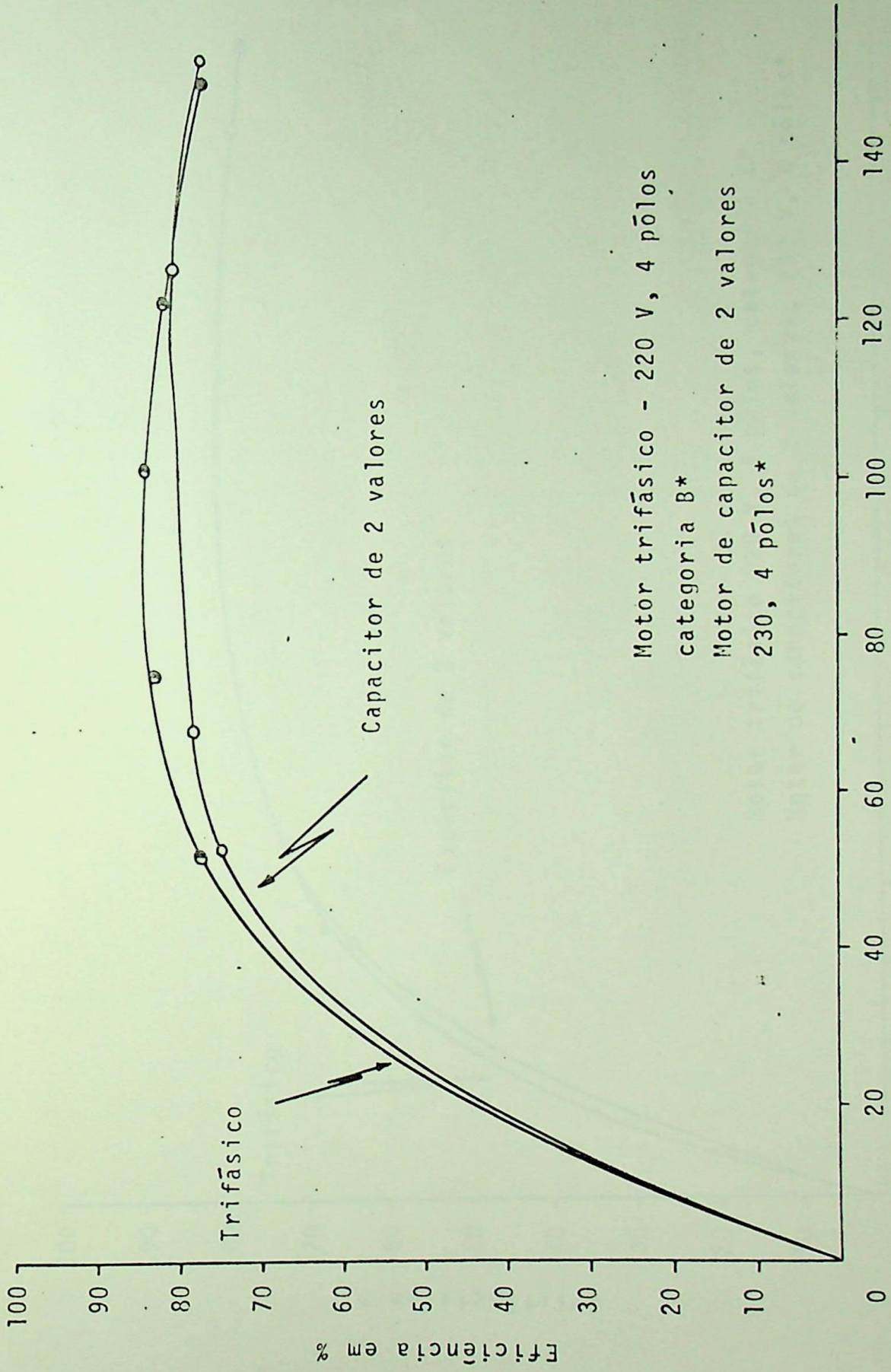
* VIDRINE (34)
Comparação Conjugado-Potência de Entrada para Motores de 5 HP
Figura 13



*VIDRINE (34)

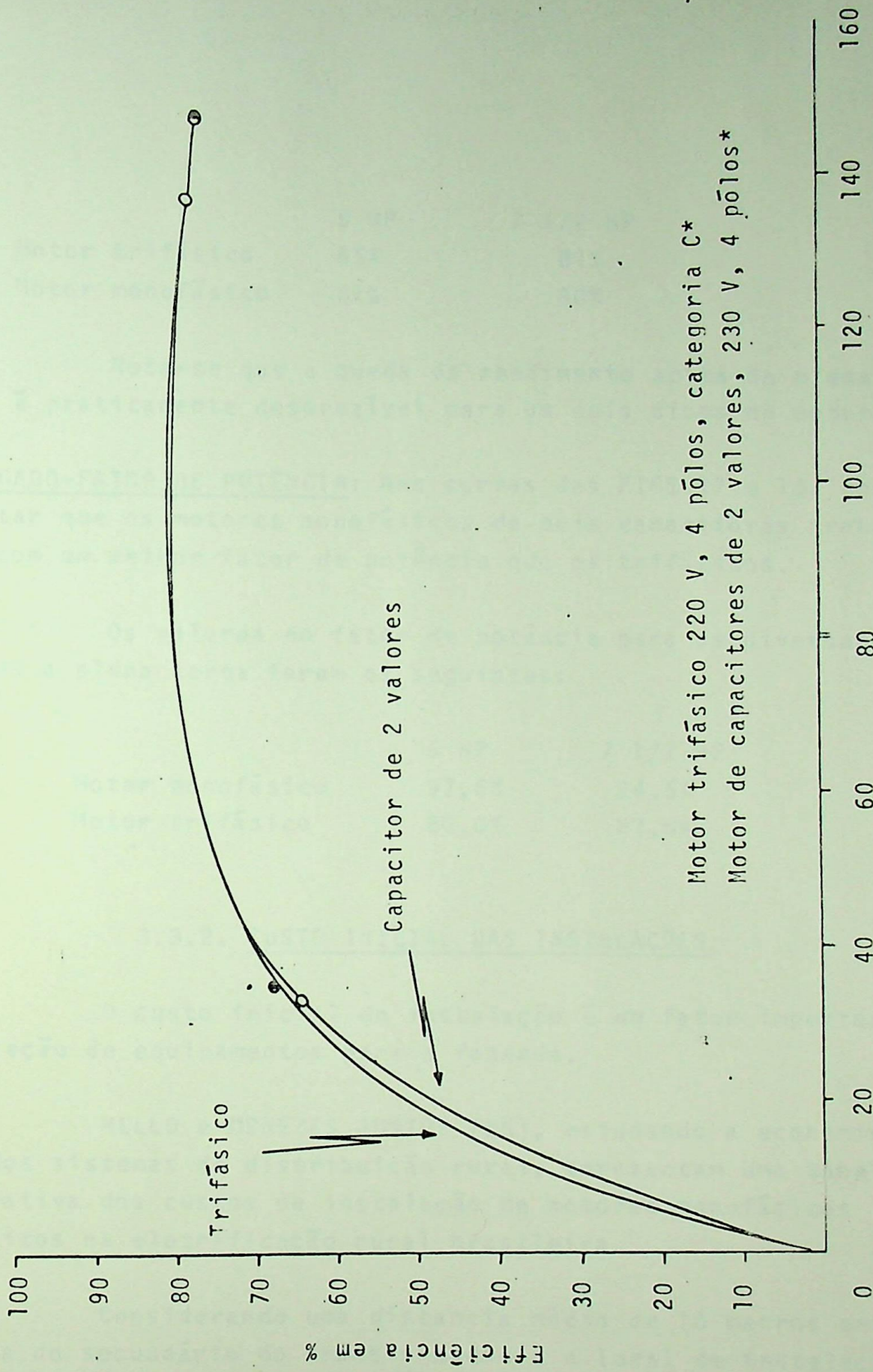
Comparação Conjugado-Potência de Entrada para Motores de 7 1/2 HP

Figura 14



Motor trifásico - 220 V, 4 pólos
categoria B*
Motor de capacitor de 2 valores
230, 4 pólos*

*VIDRINE (34)
% do Conjugado de Plena Carga
Comparação Conjugado-Eficiência para Motores de 5 HP
Figura 15



Motor trifásico 220 V, 4 pólos, categoria C*
 Motor de capacitores de 2 valores, 230 V, 4 pólos*

*VIDRINE (34)
 Comparação Conjugado-Eficiência para Motores de 7 1/2 HP

Figura 16

	5 HP	7 1/2 HP
Motor trifásico	85%	81%
Motor monofásico	81%	80%

Nota-se que a queda do rendimento acima da plena carga é praticamente desprezível para os dois tipos de motores.

CONJUGADO-FATOR DE POTÊNCIA: Nas curvas das FIGS 17 e 18, pode-se notar que os motores monofásicos de dois capacitores trabalham com um melhor fator de potência que os trifásicos.

Os valores do fator de potência para as diversas unidades a plena carga foram os seguintes:

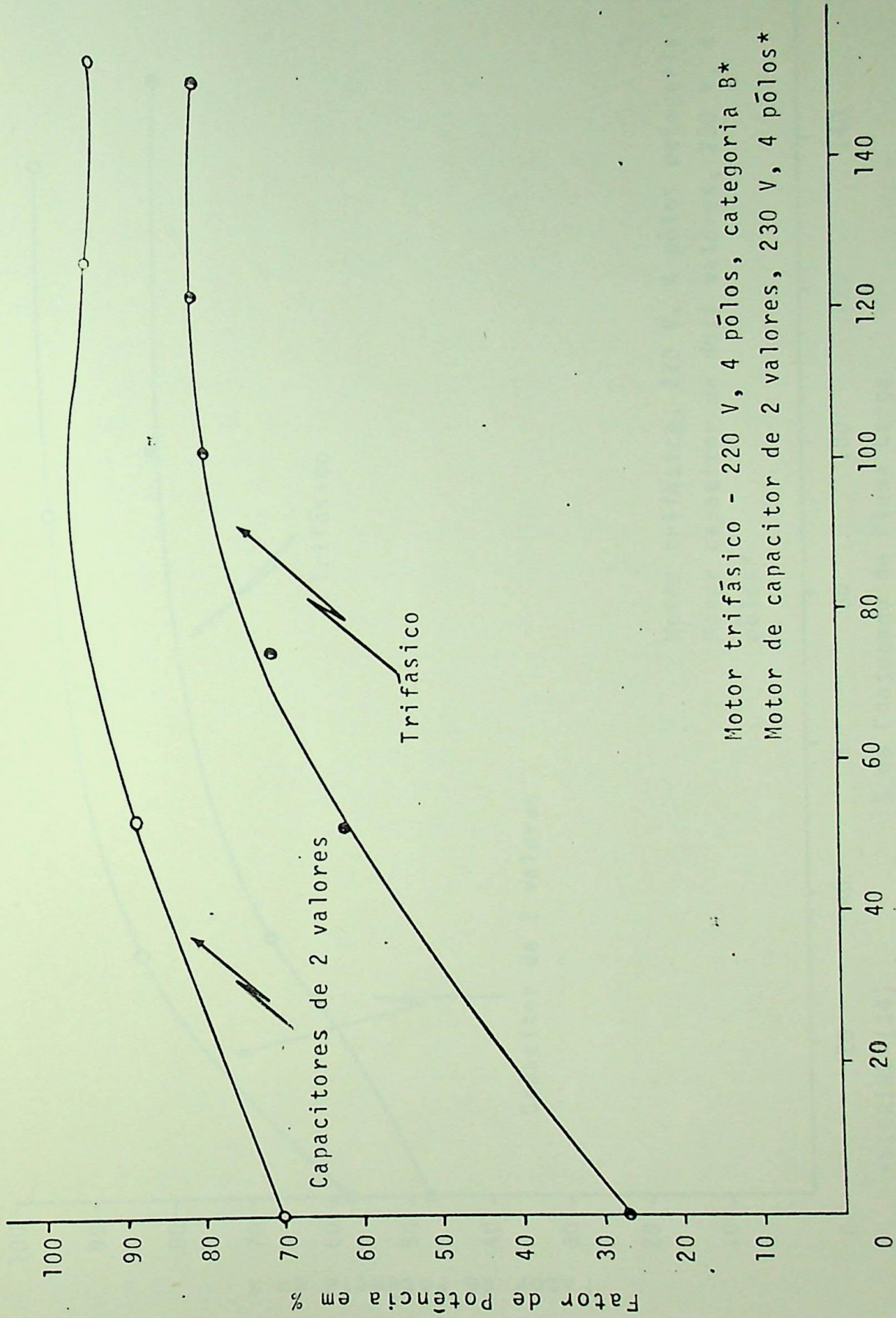
	5 HP	7 1/2 HP
Motor monofásico	97,6%	94,5%
Motor trifásico	80,0%	87,0%

3.3.2. CUSTO INICIAL DAS INSTALAÇÕES

O custo inicial da instalação é um fator importante na seleção de equipamentos para a fazenda.

MELLO e MENEZES JUNIOR (25), estudando a economicidade dos sistemas de distribuição rural, apresentam uma tabela comparativa dos custos de instalação de motores monofásicos e trifásicos na eletrificação rural brasileira.

Considerando uma distância média de 10 metros entre a saída do secundário do transformador e o local de instalação do motor, os autores prepararam um programa para computador, de

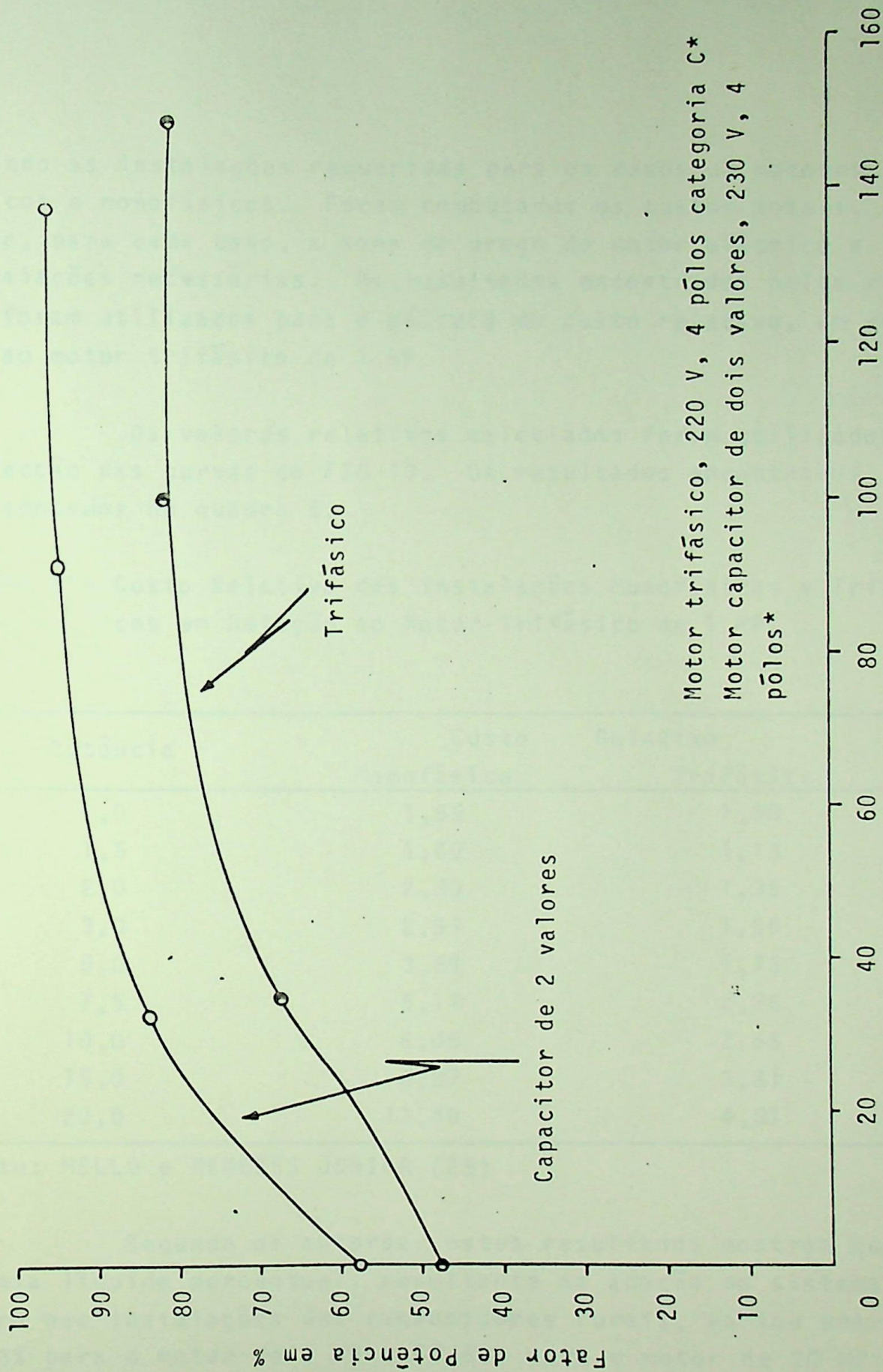


Motor trifásico - 220 V, 4 pólos, categoria B*
Motor de capacitor de 2 valores, 230 V, 4 pólos*

*VIDRINE (34)

Comparação Conjugado-Fator de Potência para Motores de 5 HP

Figura 17



Motor trifásico, 220 V, 4 pólos categoria C*
 Motor capacitor de dois valores, 230 V, 4 pólos*

*VIDRINE (34) % do Conjugado de Plena Carga

Comparação Conjugado-Fator de Potência para Motores de 7 1/2 HP

Figura 18

finindo as instalações requeridas para os casos de motores trifásicos e monofásicos. Foram computados os custos totais, envolvendo, para cada caso, a soma do preço do motor elétrico e das instalações necessárias. Os resultados encontrados pelos autores foram utilizados para o cálculo do custo relativo, em relação ao motor trifásico de 1 HP.

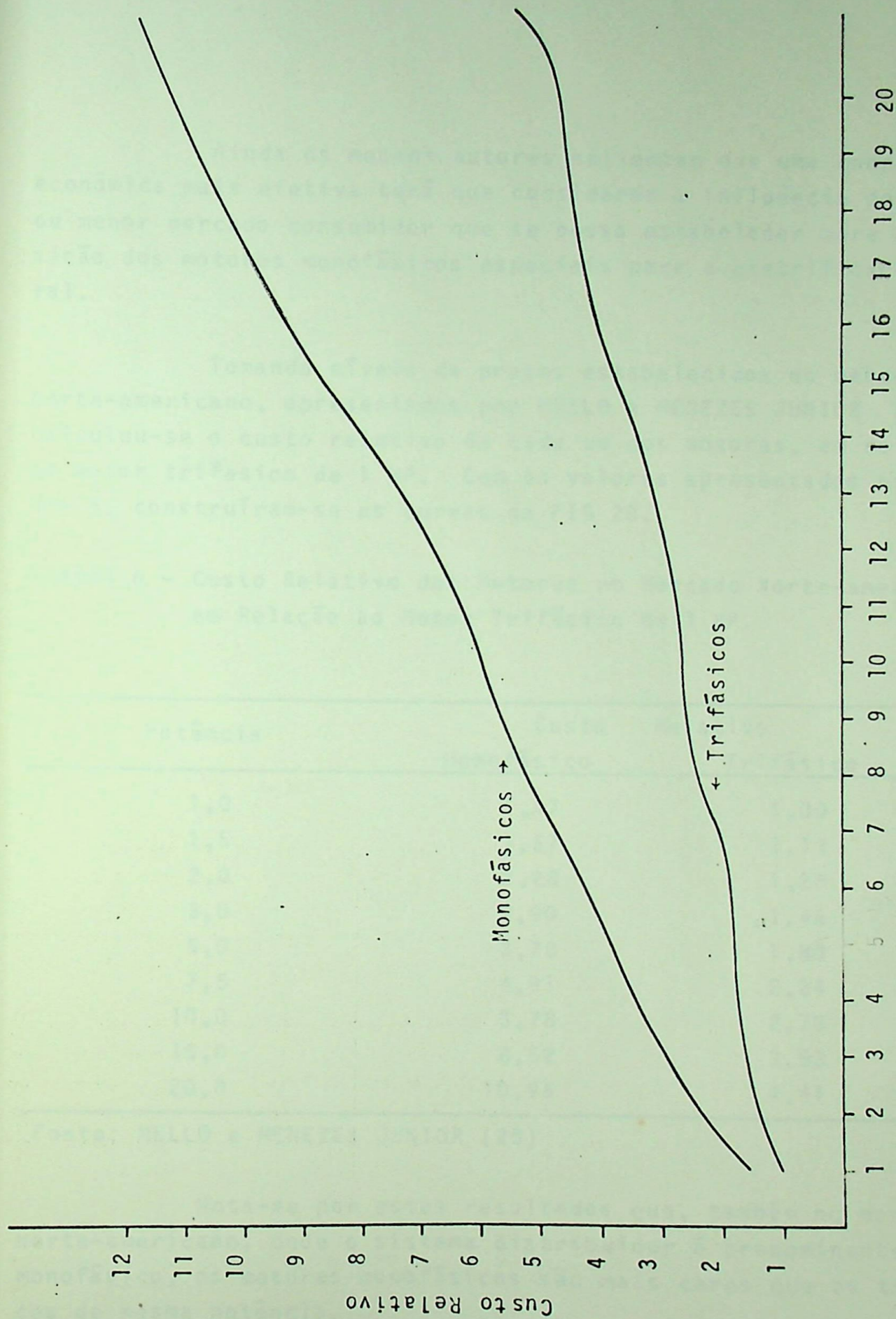
Os valores relativos calculados foram utilizados na confecção das curvas da FIG 19. Os resultados encontrados são apresentados no quadro 5.

QUADRO 5 - Custo Relativo das Instalações Monofásicas e Trifásicas em Relação ao Motor Trifásico de 1 HP.

Potência	Custo Relativo	
	Monofásico	Trifásico
1,0	1,55	1,00
1,5	1,69	1,13
2,0	2,30	1,35
3,0	2,97	1,56
5,0	3,89	1,75
7,5	5,11	2,26
10,0	6,05	2,65
15,0	8,87	3,81
20,0	11,40	4,81

Fonte: MELLO e MENEZES JUNIOR (25)

Segundo os autores, estes resultados mostram que a economia líquida percentual, resultante na adoção do sistema trifásico nas instalações dos consumidores rurais, variou entre ... 35,83% para o motor de 1 HP e 57,81% para o motor de 20 HP.



Comparação do Custo Relativo das Instalações Monofásicas e Trifásicas
 no Brasil
 Figura 19

Ainda os mesmos autores salientam que uma comparação econômica mais efetiva terá que considerar a influência do maior ou menor mercado consumidor que se possa estabelecer para a aquisição dos motores monofásicos especiais para a eletrificação rural.

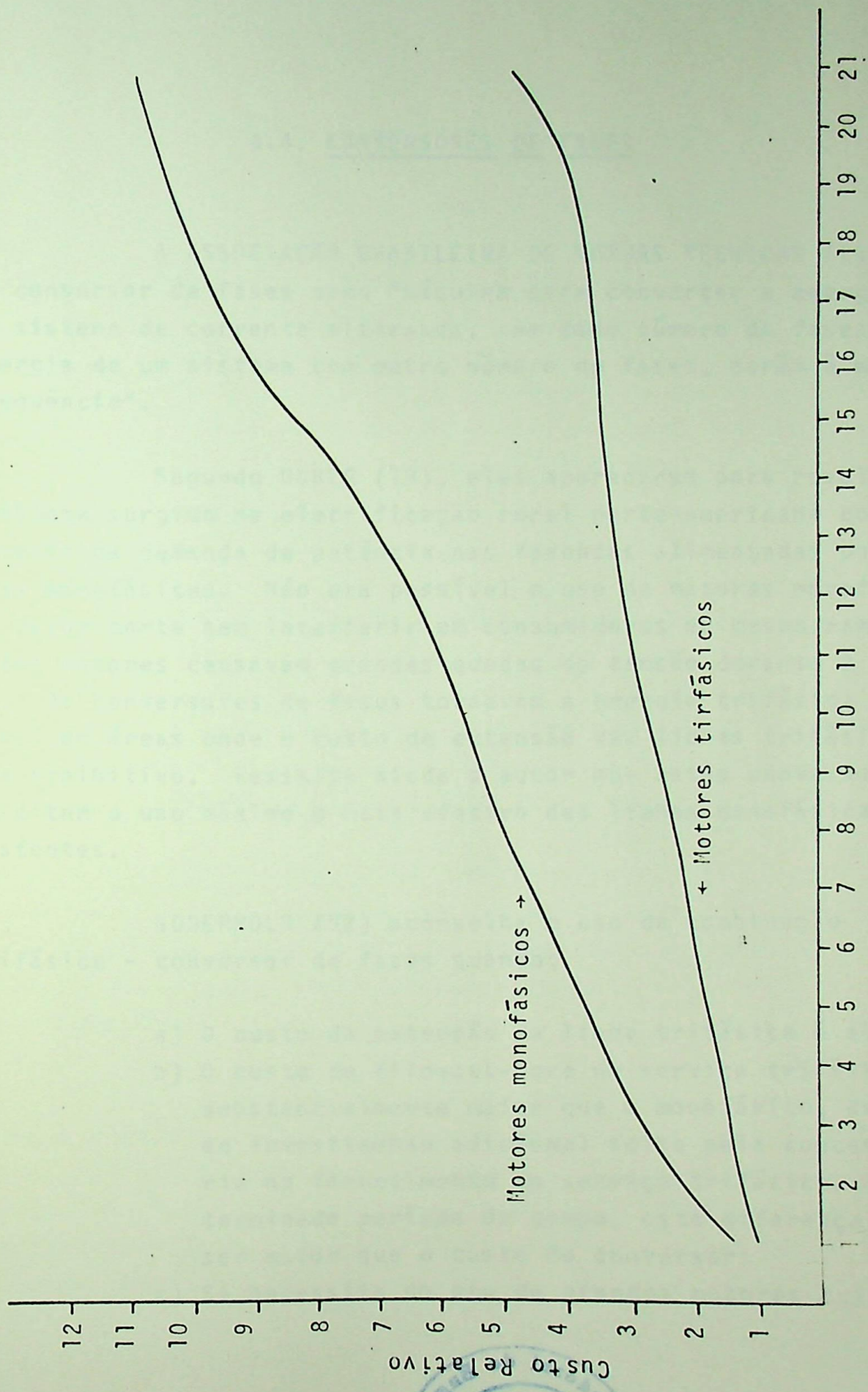
Tomando níveis de preços estabelecidos no mercado norte-americano, apresentados por MELLO e MENEZES JUNIOR (25), calculou-se o custo relativo de cada um dos motores, em relação ao motor trifásico de 1 HP. Com os valores apresentados no quadro 6, construíram-se as curvas da FIG 20.

QUADRO 6 - Custo Relativo dos Motores no Mercado Norte-americano em Relação ao Motor Trifásico de 1 HP.

Potência	Custo Relativo	
	Monofásico	Trifásico
1,0	1,47	1,00
1,5	1,67	1,13
2,0	2,28	1,28
3,0	2,90	1,46
5,0	3,78	1,80
7,5	4,91	2,24
10,0	5,78	2,79
15,0	8,52	3,53
20,0	10,95	4,41

Fonte: MELLO e MENEZES JUNIOR (25)

Nota-se por estes resultados que, também no mercado norte-americano, onde o sistema distribuidor é predominantemente monofásico, os motores monofásicos são mais caros que os trifásicos de mesma potência.



Comparação do Custo Relativo de Motores no Mercado Norte-americano
Figura 20



3.4. CONVERSORES DE FASES

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2) define conversor de fases como "máquina para converter a energia de um sistema de corrente alternada, com dado número de fases, em energia de um sistema com outro número de fases, porém à mesma frequência".

Segundo HUBER (19), eles apareceram para resolver o problema surgido na eletrificação rural norte-americana com o aumento da demanda de potência nas fazendas alimentadas por linhas monofásicas. Não era possível o uso de motores monofásicos de maior porte sem interferir em consumidores do mesmo ramal. Estes motores causavam grandes quedas de tensão durante a partida. Os conversores de fases tornavam a energia trifásica disponível em áreas onde o custo de extensão das linhas trifásicas era proibitivo. Ressalta ainda o autor que estes conversores permitem o uso máximo e mais efetivo das linhas monofásicas existentes.

SODERHOLM (32) aconselha o uso da combinação motor trifásico - conversor de fases quando:

- a) O custo da extensão da linha trifásica é alto;
- b) O custo do Kilowatt-hora do serviço trifásico é substancialmente maior que o monofásico, devido ao investimento adicional feito pela concessionária no fornecimento do serviço trifásico. Num determinado período de tempo, esta diferença pode ser maior que o custo do conversor;
- c) Se necessita do uso de grandes motores cujas cor

- rentes de partida sejam incompatíveis com o serviço monofásico;
- d) Se necessita temporariamente do serviço trifásico, até que linhas trifásicas sejam instaladas;
 - e) Se compram equipamentos para a fazenda com motores trifásicos de difícil substituição pelo equivalente monofásico;
 - f) Se necessita de vários motores e o custo total dos mesmos, quando monofásicos, é maior que os trifásicos correspondentes mais o conversor de fases.

3.4.1. TIPOS DE CONVERSORES DE FASES

Atualmente, são disponíveis nos Estados Unidos dois tipos de conversor de fases - estáticos e rotativos ou eletromecânicos. SODERHOLM (32) descreve estes dois tipos como segue:

CONVERSORES ESTÁTICOS: Estes conversores não têm partes móveis, a não ser contatos de relê que operam durante o ciclo de partida. Dois tipos são disponíveis para aplicações agrícolas. O tipo somente a capacitores, ou conversor simples, e o tipo capacitor au transformador.

O conversor somente a capacitores é o tipo mais simples e consiste essencialmente de um banco de capacitores e de relês. A FIG 21 mostra o diagrama de dois conversores a capacitores. Em 21a, dois terminais do motor trifásico estão conectados diretamente a linha monofásica (através de chave e sistema de proteção na instalação completa). O terceiro terminal é conec

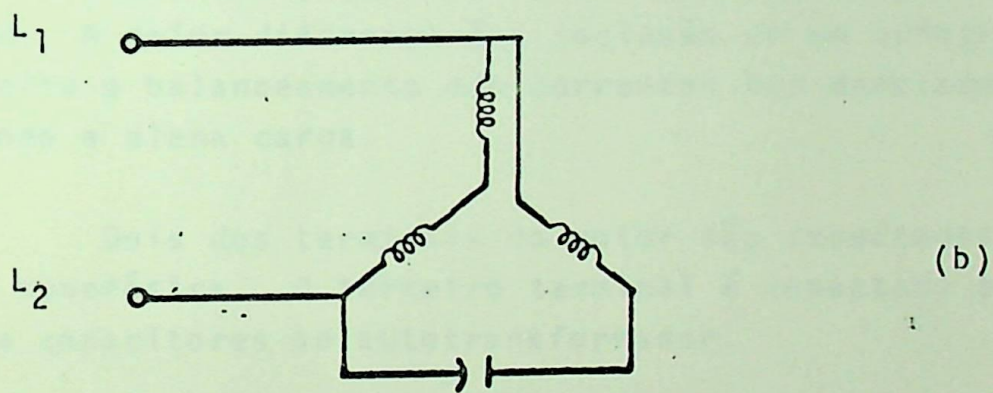
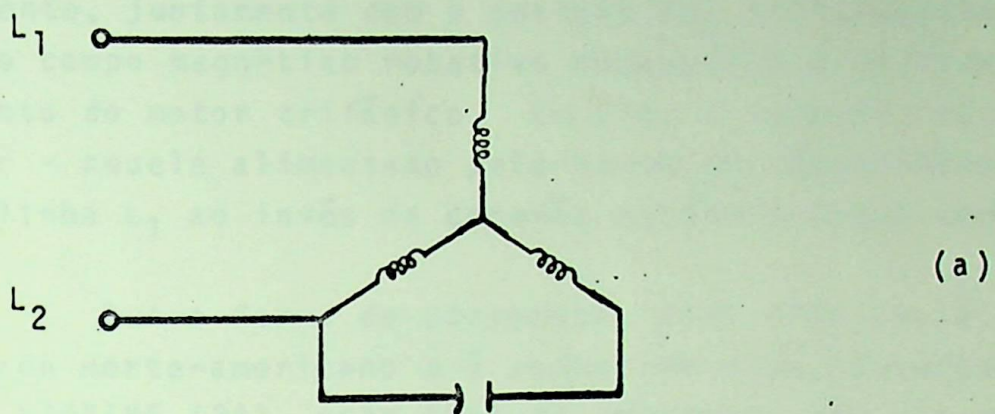


Diagrama Simplificado de Conversores a Capacitores

Figura 21

tado a um dos condutores da linha monofásica através do banco de capacitores do conversor. O banco de capacitores provoca um defasamento de tensão para o terceiro enrolamento do motor. Este defasamento, juntamente com a posição dos enrolamentos do motor, produz o campo magnético rotativo necessário à partida e ao funcionamento do motor trifásico. Em 21b, o terceiro enrolamento do motor - aquele alimentado pelo banco de capacitores - é conectado à linha L_1 ao invés da conexão no ponto comum como em 21a.

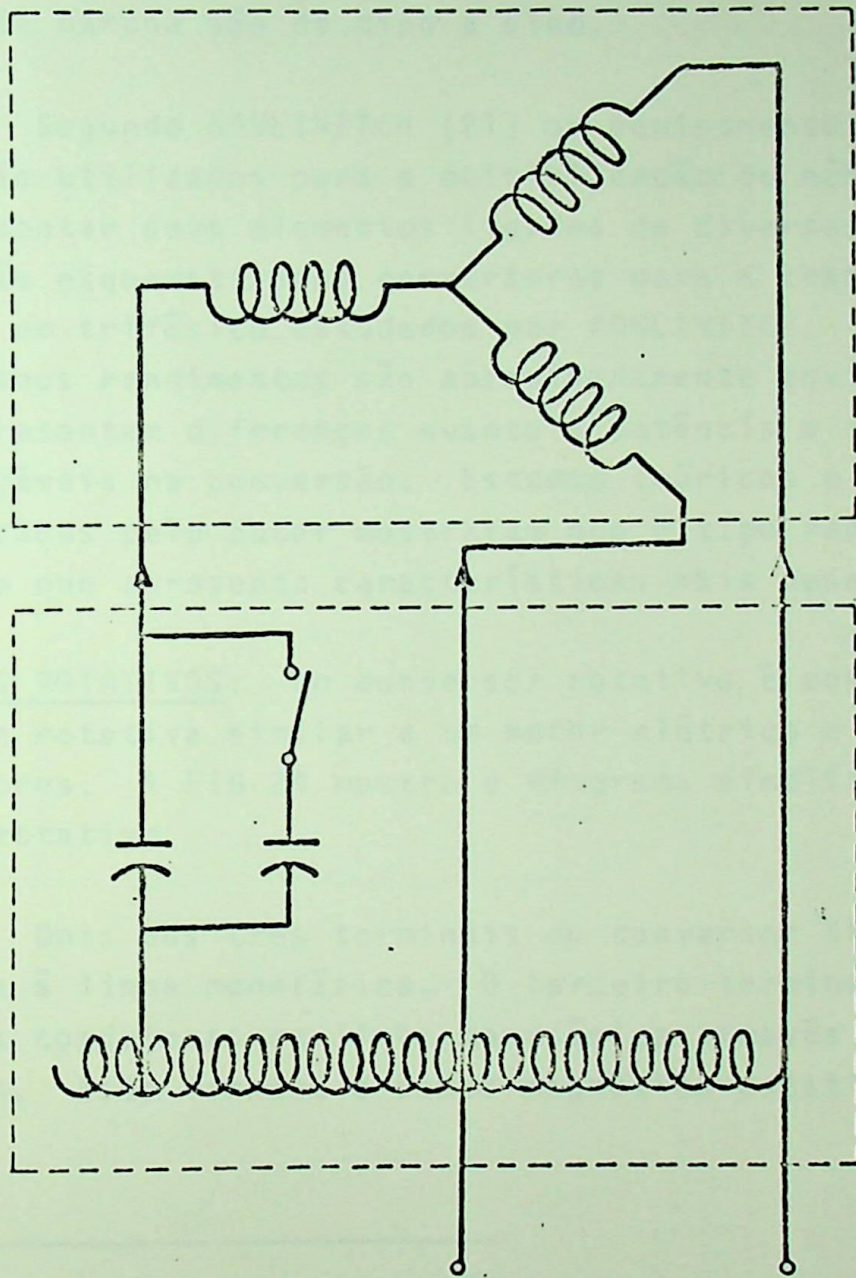
Outra forma de conversor, tipo simples, é disponível no mercado norte-americano e é conhecido como conversor H-A-S. Segundo VIDRINE (34), este tipo de conversor não usa as conexões normais do motor trifásico, como os outros tipos e tem um funcionamento todo peculiar.

Na FIG 22, temos um conversor tipo capacitor-autotransformador. A maior diferença é a inclusão de um autotransformador que permite o balanceamento das correntes nos enrolamentos do motor quando a plena carga.

Dois dos terminais do motor são conectados diretamente à linha monofásica. O terceiro terminal é conectado através do banco de capacitores ao autotransformador.

Os "taps" do autotransformador possibilitam o ajuste da tensão aplicada ao banco de capacitores. Isto permite o balanceamento das correntes nos enrolamentos do motor para uma dada carga.

Para melhorar o conjugado de partida dos conversores estáticos, capacitores adicionais são conectados no circuito de partida. Capacitores eletrolíticos são os geralmente usados por-



Conversor com Autotransformador
FIGURA 22

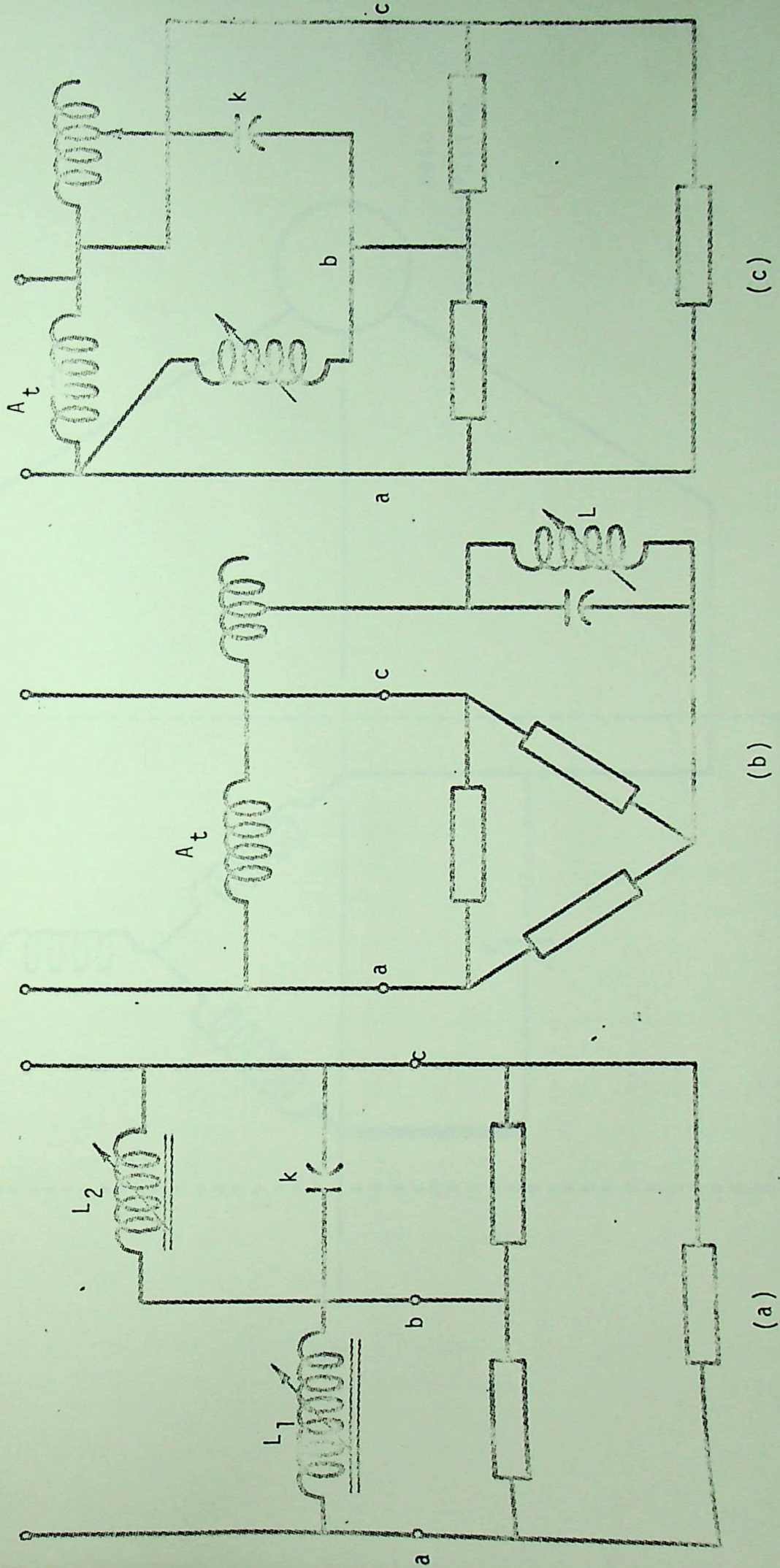
que, para uma determinada capacitância, eles são menores e mais baratos. Entretanto eles não podem permanecer ligados por muito tempo devido ao sobreaquecimento. Como as partidas são rápidas e não muito frequentes, eles são adequados para isto. Os capacitores de marcha são do tipo a óleo.

Segundo KOULINITCH (21) os equipamentos estáticos ' de conversão utilizados para a multiplicação do número de fases podem apresentar seus elementos ligados de diversas formas. Na FIG 23 estão esquematizados conversores para a transformação do monofásico em trifásico estudados por KOULINITCH. O autor concluiu que seus rendimentos são aproximadamente equivalentes, ' mas que apresentam diferenças quanto a potência e certas qualidades desejáveis na conversão. Estudos teóricos e experimen- ' tais realizados pelo autor mostraram que o tipo representado na FIG 23a é o que apresenta características mais desejáveis.*

CONVERSORES ROTATIVOS: Um conversor rotativo é constituído de uma unidade rotativa similar a um motor elétrico e de um banco de capacitores. A FIG 24 mostra o diagrama simplificado de um conversor rotativo.

Dois dos tres terminais do conversor são conectados diretamente à linha monofásica. O terceiro terminal é conectado a um dos condutores de linha monofásica através do banco de capacitores. Este fornece o campo magnético rotativo necessári

* No apêndice serão apresentadas as expressões que permitem ' calcular as grandezas relativas dos elementos ativos dos diversos equipamentos estáticos de conversão do monofásico em trifásico.



Convertidores de Fases Estáticos Segundo KOUÏNITCH (21)

FIGURA 23

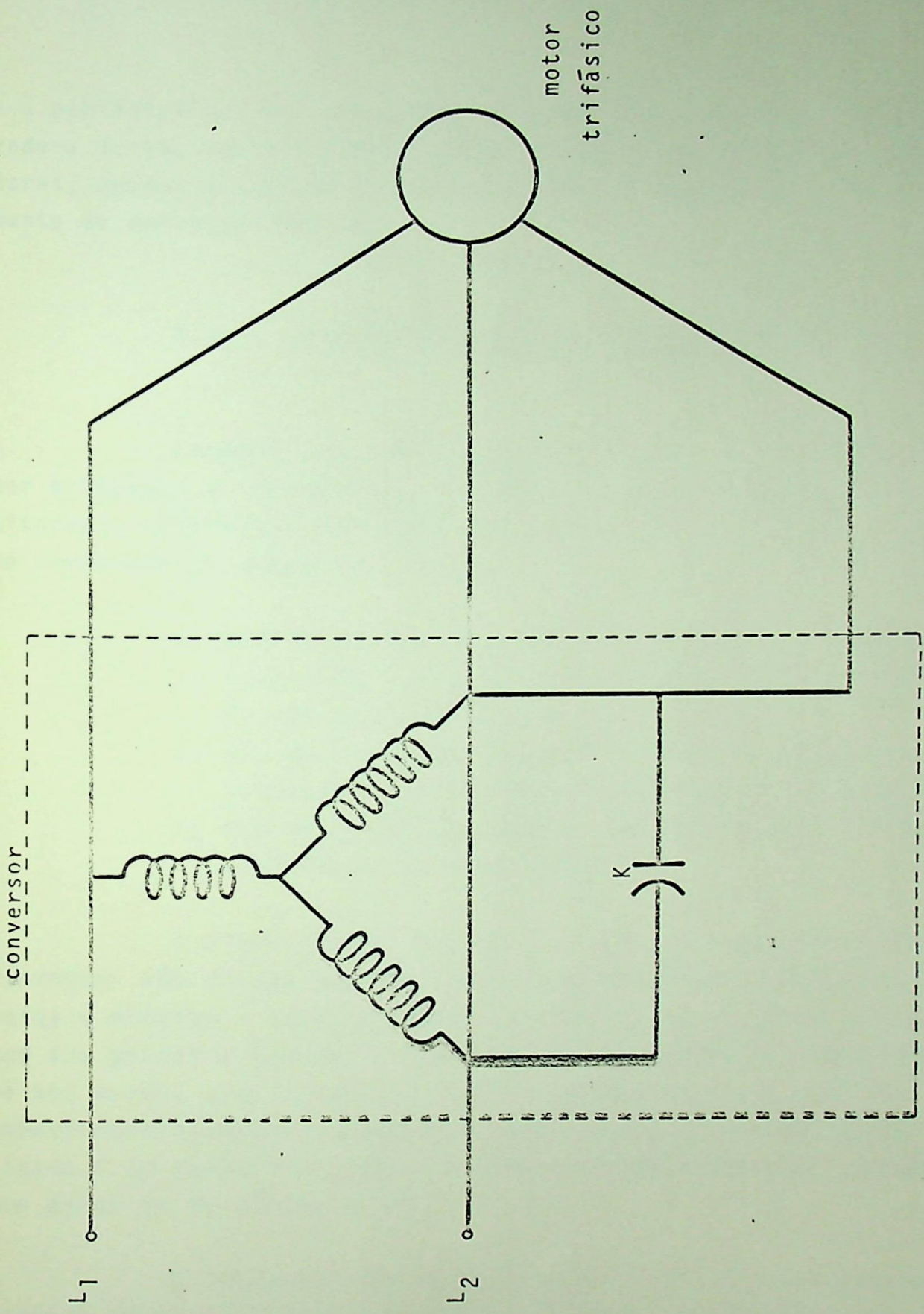


Diagrama Simplificado do Conversor Rotativo
FIGURA 24

o à partida e ao funcionamento do conversor rotativo. A ação geradora deste, em combinação com o defasamento dado pelos capacitores, produz a tensão da terceira fase, necessária ao funcionamento do motor trifásico.

3.4.2. CARACTERÍSTICAS DOS CONVERSORES DE FASES

Fazendo uma análise matemática de uma combinação motor trifásico e conversores de fases simples, (somente com capacitores), HABERMANN (14) concluiu que somente se poderia obter do conversor as seguintes saídas:

- a) 60% da potência nominal trifásica, se requerido o conjugado com motor bloqueado especificado pelas normas americanas;
- b) 60% da potência nominal trifásica, se requerido o conjugado máximo especificado pelas normas;
- c) 60% da potência nominal trifásica para um aumento admissível de temperatura.

O autor também ressalta o fato de que este tipo de conversor não produz tensões inteiramente balanceadas, a plena carga e encurta a vida do motor trifásico, se o mesmo trabalha com sua potencia nominal. Somente $2/3$ da potência nominal poderá ser usada, sem prejudicar a vida do motor o que implica num superdimensionamento do mesmo; assim um motor trifásico de 3 HP, ligado a um conversor simples, somente pode trabalhar acionando uma carga de no máximo 2 HP.

O conversor de fases simples é o tipo mais barato e segundo HOGAN (17) tem certa versatilidade, permitindo um balan-

ceamento razoável das correntes nas fases para uma determinada carga. Este balanceamento é feito adicionando-se ou removendo-se capacitores do circuito.

A operação satisfatória deste sistema de conversão limita-se a cargas de natureza constante e de baixo conjugado de partida segundo indica GALTER (13).

Para funcionamento com correntes aproximadamente iguais a eficiência deste sistema é ligeiramente menor que um motor trifásico alimentado normalmente pela linha trifásica.

Segundo SODERHOLM (32) a corrente drenada por motores funcionando com conversores simples aumenta rapidamente com o aumento da carga. Cuidados devem ser tomados sempre que a carga do motor atinja mais que 75% de sua potência nominal.

Segundo HUBER (18), o motivo do desbalanceamento de correntes que existe no conversor tipo simples é devido ao defasamento conseguido apenas com capacitores, que é aproximadamente de 90° , ao passo que seria necessário 120° de defasamento para se obter o trifásico equilibrado. Daí a necessidade de se limitar em 75% ou menos a potência do motor para manter as correntes nas fases nos limites nominais. Um desbalanceamento de aproximadamente 3,5% entre a fase de maior tensão e a média da tensão das tres fases que alimenta o motor, resulta num aumento de 15% da temperatura normal de funcionamento do motor. Embora permaneça o desbalanceamento, o motor trabalhando com correntes menores não sofrerá qualquer dano porque o aquecimento é proporcional à corrente em cada fase.

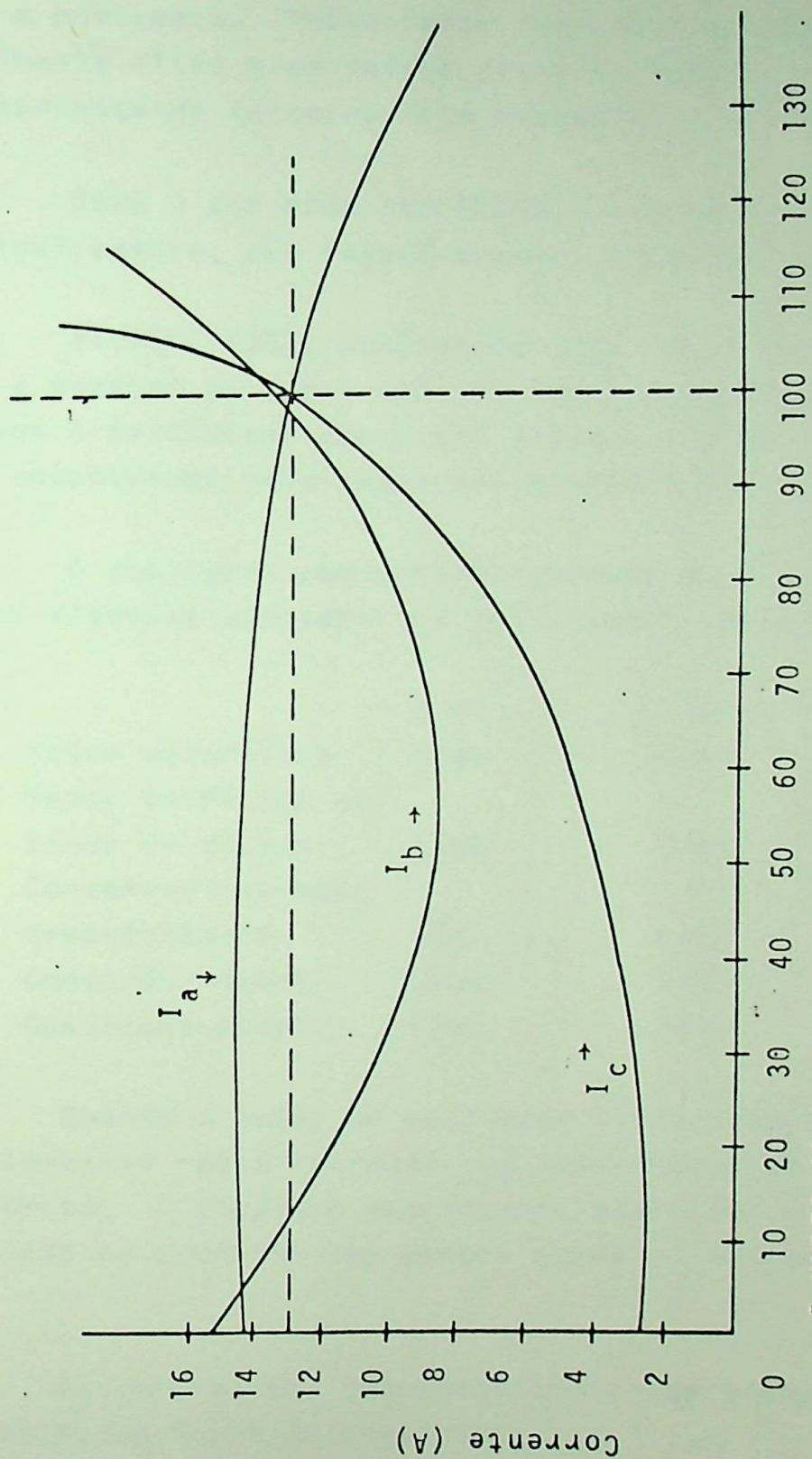
A grande capacitância requerida para o funcionamento do motor trifásico em linhas monofásicas resulta num melhor

fator de potência da linha monofásica. O fator de potência é a medida do defasamento no tempo entre a corrente e a tensão e tem valor unitário quando ambos estão em fase. Tecnicamente o fator de potência é igual ao cosseno do ângulo entre corrente e tensão.

Normalmente, o fator de potência de um motor é consideravelmente mais baixo na partida que durante o funcionamento. Com o uso do conversor de fases ocorre uma grande melhora no fator de potência durante a partida. Isto resulta numa diminuição das correntes de partida porque, quanto maior for o fator de potência, menor será a corrente requerida durante a partida.

O conversor de fases tipo capacitor-autotransformador é um conversor simples, melhorado. Basicamente o projeto é o mesmo. Um autotransformador é adicionado ao circuito em série com os capacitores de funcionamento. Segundo HOGAN (17), o sistema de conversão de fases com autotransformador, melhora a eficiência e o desempenho do motor trifásico, em relação ao tipo com capacitores somente. Isto é devido ao melhor balanceamento que se pode conseguir. As perdas que ocorrem neste tipo de sistema são as devidas aos enrolamentos, ao núcleo do autotransformador e à sequência negativa, quando funciona desbalanceado. Este sistema é mais versátil, porque permite um balanceamento de correntes numa maior faixa de cargas. As perdas aumentam com o desbalanceamento de correntes numa maior faixa de cargas. As perdas aumentam com o desbalanceamento, porque o rendimento do motor diminui nesta condição.

Segundo HUBER (18) o desbalanceamento das correntes de um motor trifásico varia com a carga, conforme as curvas da FIG 25. O maior desbalanceamento ocorre quando o motor está i



* HUBER (18)

Potência Nominal em HP

Características das Correntes no Conversor Tipo Capacitor Auto-Transformador, com Ajuste do Capacitor para Funcionamento a Plena Carga

Figura 25

niciando o movimento. Neste ponto duas das correntes das fases são igualmente altas e em muitos casos excedem a corrente nominal. A corrente da terceira fase encontra-se no mínimo.

Como a corrente nas fases ultrapassa o valor nominal apenas ligeiramente, não haverá superaquecimento do motor.

VIDRINE (35), utilizando tres tipos de conversores de fases e motores de 5 e 7 1/2 HP, fez a comparação de motores monofásicos e trifásicos com e sem conversores de fases. Os resultados encontrados pelo autor são sintetizados a seguir:

O conjugado com rotor bloqueado em % do de plena carga para as diversas unidades são relacionados abaixo:

	5 HP	7 1/2 HP
Motor monofásico	270%	231%
Motór trifásico na linha trifásica	195%	215%
Conversor com auto transformador	175%	169%
Conversor H-A-S	160%	143%
Conversor simples	137%	145%

Quando o valor do conjugado ultrapassa o de plena carga, observa-se que a corrente nos conversores de fases aumenta rapidamente. O tipo com autotransformador foi o que teve menos acréscimo na corrente nos pontos acima do conjugado de plena carga.

Os valores das correntes com rotor bloqueado para as diversas unidades foram as seguintes:

	5 HP	7 1/2 HP
Conversores com autotransformador ...	81 A	104 A
Conversores simples	83 A	104 A
Motor trifásico na linha trifásica ..	86 A	118 A
Conversor H-A-S	103 A	133 A
Motor monofásico	135 A	200 A

Na comparação do fator de potência das diversas unidades, observou-se que os conversores de fases trabalham com fator de potência quase unitário. Durante a partida, os valores do F.P. dos conversores foram bem superiores aos das outras unidades. Este fato, segundo HUBER (18), traz diversas vantagens: (1) a corrente de partida é substancialmente reduzida, o que elimina grandes quedas de tensão durante a partida; (2) a diminuição dos kilovolt amperes do motor durante a partida acarreta uma diminuição do custo das instalações; (3) o alto fator de potência, além de diminuir os distúrbios devidos a partida, ajuda a equalizar kilovolt amperes e watts.

KOULINITCH (21), estudando os diferentes sistemas estáticos de conversão de fases, dá ênfase aos dispositivos a reatância saturada com equilibragem automática de fases. O autor também analisa as causas da alteração das formas de curvas e especifica as características construtivas e de exploração industrial de conversores mono-trifásicos até uma potência de 20 KVA. As principais considerações e resultados encontrados pelo autor serão resumidas a seguir:

A conversão do número de fases por equipamentos unicamente reativos (indutivos ou capacitivos) é um problema puramente linear. A análise teórica foi feita por diversos autores que, embora seguindo caminhos diferentes, chegaram ao mesmo resultado.

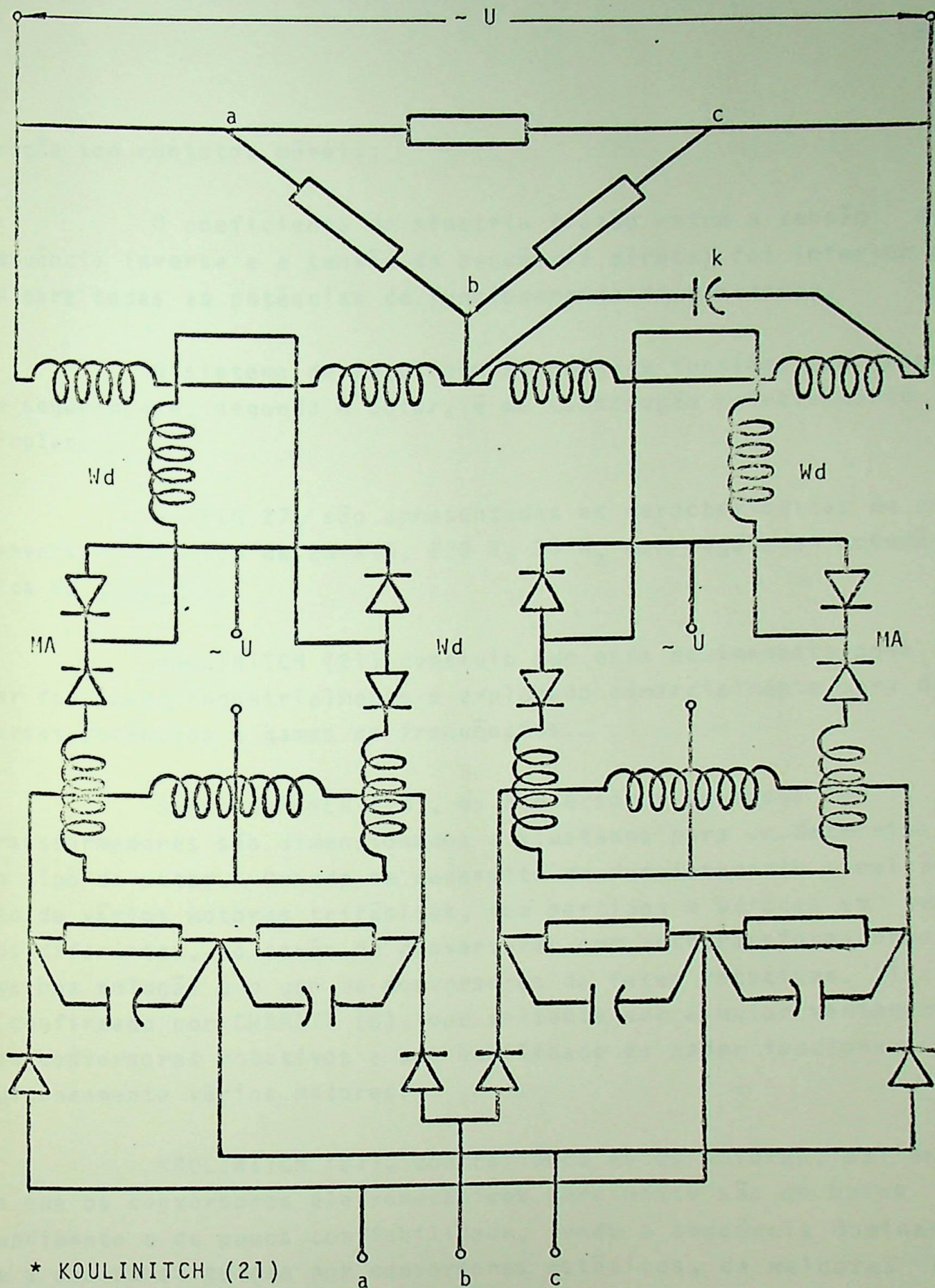
A maior dificuldade, em princípio, para a conversão recíproca de sistemas equilibrados e desequilibrados por transformadores é que estes não modificam as características de distribuição ou de consumo de potência instantânea no correr do tempo. O problema pode ser resolvido acumulando-se energia de forma eletromagnética (núcleo de ferro) ou de forma eletrostática (capacitores). O problema a resolver, para elaboração do sistema estático de conversão capaz de converter o sistema monofásico (desequilibrado) em um sistema polifásico (equilibrado) e vice-versa, é a escolha do método de regulagem dos elementos que compõem o equipamento.

Atualmente dispõe-se de diversos modelos de estabilizadores de simetria. Pelo fato de não ser possível agir sobre a fonte de alimentação ou sobre a carga, todos os métodos consistem em se agir sobre os diversos órgãos ativos (executivos) do sistema de conversão (reatâncias e resistências puras).

Dentre as muitas experiências realizadas por KOULINITCH (21), apresenta-se na FIG 26 o esquema completo de um conversor estático com estabilização de simetria por reatâncias saturadas.

Neste sistema, foi adotado uma variante do conversor com transformador. A estabilização de simetria é feita automaticamente e o regulador é composto de amplificador magnético e semicondutores. A saturação magnética é conseguida por corrente contínua, obtida através da retificação da tensão monofásica de entrada.

Esta saturação é controlada pelo regulador que reage quando aparece a sequência negativa no amplificador magnético. O emprego de reatâncias saturadas no conversor permitiu sua cons-



* KOULINITCH (21)

Circuito do Conversor de Fases Com Estabilizador de Simetria*

FIGURA 26

trução sem contatos móveis.

O coeficiente de simetria (razão entre a tensão de sequência inversa e a tensão da sequência direta) foi inferior a 2% para todas as potências de funcionamento do conversor.

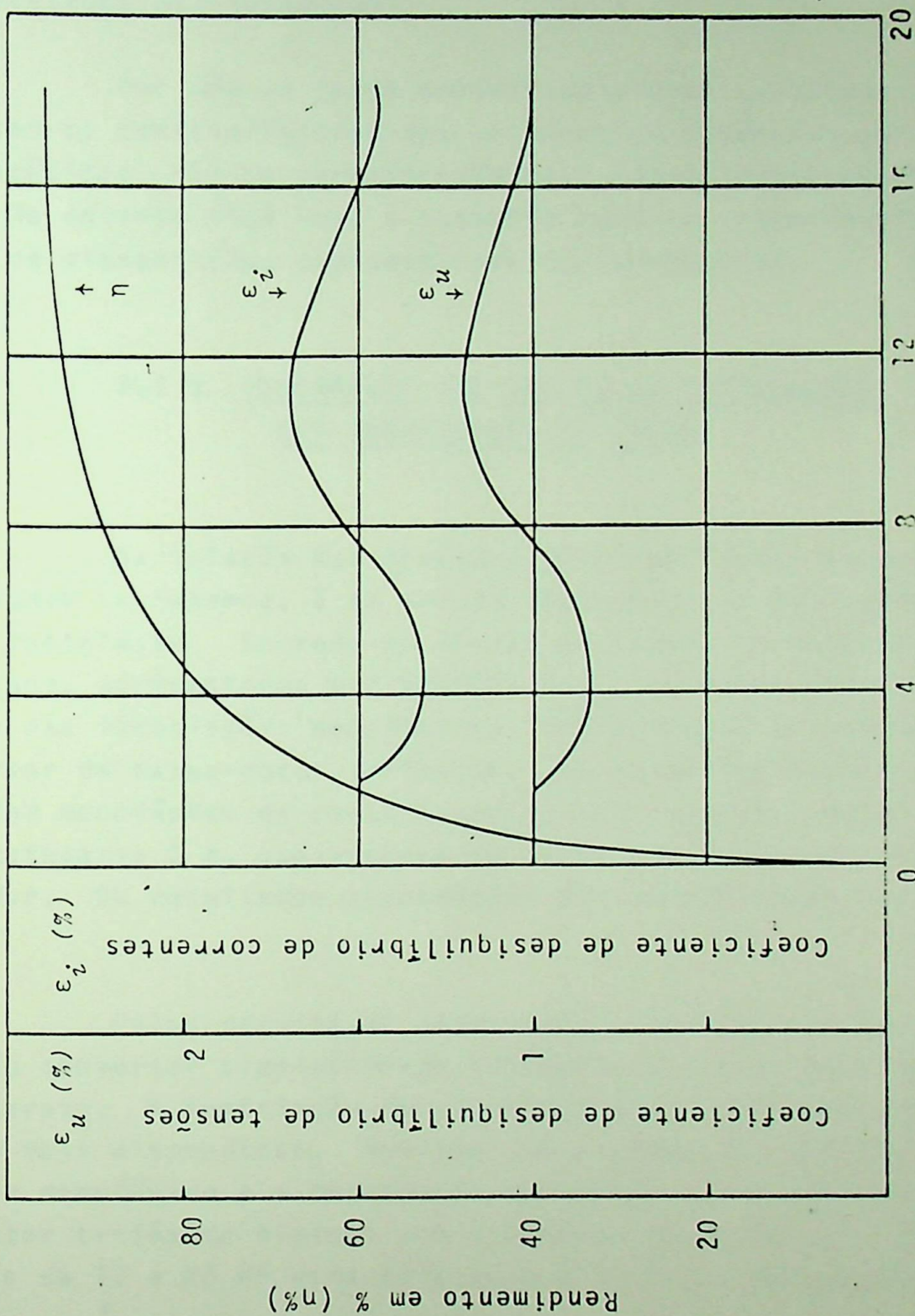
O sistema de regulação automática funciona com grande segurança e, segundo o autor, é de construção relativamente simples.

Na FIG 27, são apresentadas as características de um conversor estático de 20 KVA, 220 V, 50 Hz com regulação automática de simetria.

KOULINITCH (21) concluiu que este equipamento pode ser fabricado industrialmente e explorado comercialmente para diversas potências e gamas de frequências.

Segundo HUBER (18), os conversores de fases com transformadores são dimensionados e ajustados para um determinado tipo de motor. Quando se necessita do funcionamento simultâneo de vários motores trifásicos, com partidas e paradas em tempos diferentes, ao invés de conversores com autotransformadores, uma boa solução é o uso de conversores de fases rotativas. Isto é confirmado por CHARITY (6), que salienta ser a maior vantagem dos conversores rotativos a sua habilidade de poder funcionar simultaneamente vários motores.

KOULINITCH (21), contrariando estes autores, salienta que os conversores eletromecânicos geralmente são de baixo rendimento e de pouca confiabilidade, sendo a tendência dominante a sua substituição por conversores estáticos, de melhores ca



* KOULINITCH (21)

Potência em KVA

Características do Conversor Estático de Potência de

20 KVA*

Figura 27

racterísticas de exploração.

Por não se terem encontrado outros trabalhos que necessessem as características dos conversores rotativos em relação aos estáticos, não se apresentarão aqui outros detalhes dos mesmos. No entanto fica aqui a sugestão para um outro possível trabalho de dissertação, com pesquisas em laboratório.

3.4.3. COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE INSTALAÇÕES COM CONVERSORES DE FASES

Na Seleção dos diversos tipos de fontes de potência utilizadas na fazenda, é de grande importância o seu custo inicial de instalação. Tomando os níveis de preços no mercado norte-americano, apresentados por VIDRINE (35), calculou-se o custo relativo das instalações monofásicas, trifásicas e da combinação conversor de fases-motor trifásico. Foram utilizados os preços do motor monofásico de capacitores de dois valores, motor trifásico categoria B e, conversores de fases simples e com autotransformador. Os resultados encontrados são apresentados no quadro 7.

Pelos resultados encontrados, verifica-se que a combinação conversor simples-motor trifásico é o tipo de instalação mais barato. A instalação de conversor com autotransformador é o tipo mais dispendioso. Nota-se que a diferença do custo entre o motor monofásico e a combinação conversor com autotransformador-motor trifásico diminui com o aumento da potência. Para potências de 15 e 20 HP esta diferença é de 11% e 8% respectivamente.

QUADRO 7 - Custo Relativo dos Diversos Tipos de Instalações em Relação ao Motor Trifásico de 3 HP.

Potência HP	C u s t o R e l a t i v o					
	Monofásico	Trifásico	Conv. Simples	Conv. autot	Com. motor/conv.	
					Conv S	Conv Autot
3	1,64	1,00	0,71	2,07	1,71	3,07
5	2,73	1,19	0,85	2,57	2,05	3,76
7,5	3,92	1,67	1,49	3,23	3,16	4,23
10	5,10	2,08	2,30	3,97	4,39	6,06
15	6,77	2,51	3,24	5,02	5,75	7,54
20	8,47	3,08	-	6,08	-	9,17

Fonte: VIDRINE (35)

O custo dos conversores com regulagem automática de simetria não foi encontrado na literatura pesquisada. Segundo KOULINITCH (21), o custo deste conversor é competitivo e pode ser explorado comercialmente.

o0o0o0o0o0o0o0o

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Dois tipos de sistema distribuidor de energia elétrica servem as fazendas brasileiras: o sistema trifásico e o sistema monofásico. Os dois sistemas vêm atendendo perfeitamente as atuais necessidades do meio rural. O sistema monofásico, com potência instalada situada predominantemente na faixa de 5 e 7 1/2 c.v. vem satisfazendo plenamente aos usuários da eletrificação rural.

A comparação de motores monofásicos e trifásicos mostra que quando se dispõe de energia trifásica na fazenda o tipo mais indicado é o motor trifásico, devido seu menor custo e boas características de desempenho. Dentre os monofásicos, o motor de capacitores de 2 valores é o mais desejável. Tem um alto conjugado de partida e máximo, e grande capacidade para acelerar rapidamente a carga. A alta corrente de partida é o grande inconveniente que impede a utilização de motores monofásicos com alto conjugado de partida na eletrificação monofásica.

Com o provável aumento da demanda de potências, como aconteceu com os norte-americanos, tres alternativas poderão ser cogitadas para a instalação de motores de maior porte em regiões eletrificadas com linhas monofásicas: a transformação das linhas monofásicas em trifásicas, o uso da combinação conversor de fases - motor trifásico e uso de motores de baixa corrente de partida.

A adoção do sistema trifásico implica um planejamento adequado a fim de não prejudicar os pequenos consumidores ligados no mesmo ramal de distribuição, pertencente à cooperativa regional de eletrificação rural. Naturalmente, os consumidores

maiores têm um maior poder aquisitivo e podem fazer investimentos mais elevados que os pequenos, na transformação da linha monofásica em trifásica. Se a maioria dos consumidores almeja a adoção do trifásico, o problema é de mais fácil solução; mas, se acontecer o contrário, a solução naturalmente fica mais difícil de ser alcançada.

A combinação conversor de fases - motor trifásico, bastante utilizada pelos norte-americanos, pode resolver, pelo menos temporariamente o problema da utilização de motores de maior porte nas linhas monofásicas. Este tipo de instalação permite a partida de motores de maior potência com correntes bem menores que os monofásicos correspondentes. Os conversores de fases utilizados pelos norte-americanos são indicados para cargas mais ou menos constantes.

Os conversores do tipo simples, embora sejam o tipo de instalação mais barato, não se prestam para o acionamento de máquinas com grande variação de carga. O motor trifásico a ele acoplado não poderá funcionar com cargas superiores a $\frac{2}{3}$ de sua potência nominal, sem perigos de sobreaquecimento. Também são inadequados para o acionamento de cargas com alto conjugado de partida.

O conversor com autotransformador é o tipo mais caro. No entanto suas características são melhores que as do tipo simples, tendo um conjugado máximo bastante desejável. Como o tipo anterior, este conversor é projetado para determinada carga e, com a variação desta, o desbalanceamento das correntes nas fases fatalmente ocorrerá.

O conversor com regulagem automática de simetria, dependendo do seu custo, talvez seja o tipo mais desejável para

funcionamento com motores de maior porte.

Quando o sistema trifásico pode ser disponível no futuro, deve-se considerar o fato de que pode-se adotar a combinação conversor de fases-motor trifásico e, posteriormente, com a chegada do trifásico, o conversor pode ser vendido como equipamento usado. O motor pode ser utilizado diretamente na linha trifásica.

Os motores monofásicos de baixa corrente de partida podem ser utilizados para acionamento de cargas que exijam baixo conjugado de partida.

Pelas características das diversas instalações, observa-se que, para uma seleção adequada dos motores, devem-se conhecer também as características da carga a ser acionada. É importante, principalmente, conhecer suas exigências de conjugado de partida e máximo e a variação de seu conjugado durante o funcionamento. Do conhecimento destes parâmetros depende uma acertada escolha do motor elétrico.

Naturalmente, o fator limitante na seleção de motores é o custo inicial de instalação. A escolha final deverá ser feita considerando-se ambos os itens:

- técnicos e
- econômicos.

As principais conclusões do presente estudo podem ser relacionadas em itens que são apresentados a seguir:

a) Pode-se ter tres tipos de fontes de potência mecânica originadas da energia elétrica: o motor trifásico, o mo-

tor monofásico e a combinação conversor de fases - motor trifásico.

b) Dentre os motores monofásicos, o de capacitor de dois valores é o que apresenta desempenho mais favorável, devido às suas boas características de partida, alta eficiência, alto fator de potência e baixo custo de manutenção.

c) O motor trifásico é o tipo de fonte de potência mais desejável devido às suas boas características, confiabilidade e menor custo em relação ao monofásico, correspondente, acima de 1 HP. Seu uso é limitado pela existência de energia trifásica na fazenda. Os motores monofásicos de capacitor de 2 valores têm características equivalentes. Superam os trifásicos na capacidade de aceleração de cargas e no melhor fator de potência; o sensível aumento de sua corrente de partida com a potência, porém, pode dificultar a partida de motores de maior porte.

d) A demanda de potência na eletrificação rural brasileira deverá crescer nos próximos anos. Deverá ser encontrada uma solução que permita a utilização de motores de maior porte nas regiões em que, atualmente, as linhas de distribuição são monofásicas. Três alternativas se apresentam para o problema: - transformação em trifásico, uso de conversores de fases e uso de motores monofásicos de baixa corrente de partida.

e) Pelos preços no mercado norte-americano, o custo dos conversores de fases deverá ser competitivo com o custo da transformação monofásico-trifásico na eletrificação rural brasileira, devido ao grande desenvolvimento industrial do país. Os motores monofásicos de baixa corrente de partida somente são indicados para cargas que exijam baixo conjugado de partida.

f) A não ser que tenham balanceamento automático de simetria, os conversores de fases devem ser apropriados para uma determinada carga a fim de que se tenha correntes balanceadas no motor trifásico. O tipo simples só deve ser utilizado em aplica

ções simples, que requeiram baixo conjugado de partida e sejam ' relativamente constantes.

g) O conversor com estabilização automática de simetria é o equipamento de conversão com características mais desejáveis. Seu custo de fabricação no país, deverá ser pesquisado.

h) O fator de potência dos conversores de fases é o mais desejável. Seu valor a plena carga é praticamente unitário.

i) A corrente de partida da combinação conversor de fases com autotransformador - motor trifásico utilizada pelos ' norte-americanos, é bem menor que a corrente de partida dos motores monofásicos.

j) O conjugado com rotor bloqueado em % do de plena carga das instalações com conversores de fases é ligeiramente menor que aqueles das instalações com motores trifásicos e monofá-
sicos.

l) O custo das instalações de conversores de fases ' com autotransformador no mercado norte-americano em relação aos motores monofásicos, diminui com o aumento da potência. Esta dirença é relativamente pequena para unidades de maior potência.

m) Em rendimento, os diversos tipos de instalações ' são bastante equivalentes.

n) As características do motor e da carga a ser acionada precisam ser carinhosamente estudadas antes da seleção.

o0o0o0o0o0o0o0o

9. CONOVER, L. E. & SHANWITE, H. S. Large single phase motors with low starting current, 1969 Annual Meeting of ASAE s.l. , June 22, 1969, 6 p. Paper 69 - 364.
10. CRAWFORD, F. M. Trends in power supplier acceptance of phase converters, 60 Annual Meeting of ASAE, Saskatoon, Saskatchewan, June 27/30, 1967, 5 p. Paper 67 - 301.
11. CRIST, R. S. Large Electric motor looks promising, Hoard's Dairyman, 52, Sept, 1958, p. 864.
12. _____ Our experience with 20 horsepower single phase motors, Winter Meeting of ASAE, Chicago, Ill., Dec. 15/18, 4 p. Paper 57 - 610.
13. GALTER, I. B. Operating three-phase motors on single-phase supply, Product Engineering, 25 :134 - 139, April, 1955.
14. HABERMANN, R. Single-phase operation of three-phase motor with simple static phase converter, American Institute of Electrical Engineers Transactions (Power Apparatus and Systems), 73 :833 - 837, Aug. 1954.
15. HEMPKER, W. D. Large electric motors for farm applications, Farm Power, :21 - 22, oct. 1956.
16. HOFFMANN- H. M. Applications experience and company policy on phase converters, 1965 Annual Meeting of ASAE, Georgia, June 20/23, 1965. 7 p. Paper 65 - 317.
17. HOGAN, S. C. Autotransformer betters phase conversion, Electrical World, 134, :120 - 121, Oct. 1965.

18. HUBER, G. H. Operation and application of static and rotary converters, 1968 Winter Meeting of ASAE, Chicago, Ill. Dez. 10/13, 1968, 10 p. Paper 68 - 838.
19. _____ Phase converters, their application and current demand, IEEE Transactions on Industry and General Applications, :280 - 4, July/Aug. 1965.
20. KEMPER, H. S. Operating experiences with three-phase motors on single-phase lines, IEEE Transactions on Industry and General Applications, 2 (6) :443 - 5, Nov./dec., 1966.
21. KOULINITCH, V. A. Systèmes statiques de Conversion du nombre de phases, Revue Générale de L'Electricité, 77 (1) : 101 - 8, Jan. 1968.
22. LIBBY, C. C. Motor selection and application. N. York, MC Graw-Hill Book Co., 1960.
23. MAROUS, S. C. The new integral horsepower capacitor motor for farm service, North-central Section of ASAE, s.1. Jan. 22/23, 1954. Paper s/n.
24. MARTINS, Edmo Soares. Considerações sobre um programa orientado de eletrificação rural no estado de Minas Gerais. In: IV Conferencia Latino-americana de Eletrificação Rural, Belo Horizonte, 1971, 5 v. v. 5, p. 13.01 - 13.13.
25. MELLO, João C. P. & MENEZES Jr., Amauri A. Modelo Computacional para análise da economicidade dos sistemas de distribuição rural considerada a influência das instalações dos consumidores. In: IV Conferência Latino-americana de Eletrificação Rural, Belo Horizonte, 1971, 5 v. v. 4, p. 04.01 - 04.17.

26. CHEGOU A VEZ DA ELETRIFICAÇÃO RURAL. Mundo Elétrico, 12 (135) :8 - 15, dez. 1970.
27. OLIVEIRA, Dagoberto Servulo de, Diferenças conceituais na Eletrificação Rural. O Estado de São Paulo, São Paulo, 3 dez. 1972. p. 89.
28. _____ O campo tem pressa na Eletrificação. O Estado de São Paulo, São Paulo, 10 dez. 1972. p. 96.
29. _____ Problemas pendentes na eletrificação rural. O Estado de São Paulo, São Paulo, 26 nov. 1972. p. 86.
30. PARHAM, John W. Serving large single-phase motors. Agricultural Engineering, 48 (9) :508 - 9, Sept. 1967.
31. PARVIS, W. S. Our experiences with rotating type of phase converters on grain dryers. 1965 Summer Meeting of ASAE. Georgia, June 20/23, 1965, 4 p. Paper 65 - 318.
32. SODERHOLM, L. H. Phase converters for operation of three-phase motors from single-phase power, Washington, U. S. Government Printing Office, 1972, 21 p.
33. STERE, J. B. Adapting eletric motors to farm service. Agricultural Enginnering, 35 (9) :620 - 2, Sept. 1954.
34. VIDRINE, C. Comparison of single phase motors and three phase motors - with and without phase convertes for farm use. Lousiana. Lousiana State University, 1961. 117 p. (M.S. thesis).

35. WOLL, R. F. Cost, availability, delivery date: the case for
buynig stand motors. Power, 101 () :96 - 9, June, 1957.

o0o0o0o0o0o0o0o

6. A P E N D I C E

6.1. A ELETRIFICAÇÃO RURAL NO BRASIL.

Hã apenas alguns anos começou-se a agir plenejadamente para a implantação de uma verdadeira política de eletrificação Rural no Brasil.

Tudo o que se fizera até então fora atender, irregular e afoitamente, à demanda crescente das cidades, improvisando-se soluções e remediando-se os erros mais graves (7). Havia, apenas, a execução de projetos esparsos na área de eletrificação rural, destacando-se alguns estados que emprestavam maior importância ao setor. Entre estes o de Minas Gerais surgia como um dos mais importantes, através dos trabalhos de um organismo especializado - a ERMIG, Eletrificação Rural de Minas Gerais - e São Paulo.

Não havia uma política definida do governo federal, seja en globando os diversos programas, ou estimulando os projetos setoriais. No Programa Estratégico de Desenvolvimento, para o período de 1968/70, o Ministério do Planejamento dedicou já um capítulo especial à eletrificação rural, mas tudo parece estar ainda muito vago no que diz respeito à execução imediata de programas. "O triênio 1968/70 deverá testemunhar o primeiro grande esforço no sentido de definir uma política sistemática de eletrificação rural no país", afirma o referido programa, admitindo assim a inexistência dessa orientação (26).

O Decreto nº 62.655 de 03 de maio de 1968 no seu art. 16, define eletrificação rural (26):

"Entende-se por eletrificação rural a prestação de serviços de energia elétrica aos consumidores rurais individualizados ou integrantes de cooperativas de eletrificação rural, assim caracterizados:

a) Localizarem-se em área rural, ou seja fora do perímetro urbano e suburbano das sedes municipais e dos aglomerados populacionais de mais de 2.500 habitantes, e

b) dedicarem-se às atividades ligadas diretamente à exploração agropecuária, ou seja, o cultivo do solo com culturas permanentes ou temporárias; criação, recriação ou engorda de gados, criação de pequenos animais, silviculturas ou reflorestamento e a extração de produtos vegetais, ou

c) dedicarem-se a quaisquer outras atividades na área rural, desde que a potência posta à sua disposição não ultrapasse de 45 KVA.

Os principais fatores que dificultavam um maior desenvolvimento da eletrificação rural no país eram os seguintes:

- . Dispersão das propriedades rurais, exigindo-se um alto investimento na implantação das linhas de transmissão de energia.
- . Baixa capacidade econômica.
- . Consumo reduzido, não justificando o investimento feito.
- . Baixa rentabilidade financeira para as concessionárias de energia elétrica.
- . Elevado custo operacional das linhas, devido à grande distância entre os consumidores.

- . Baixo índice educacional da população rural.
- . Dificuldades no escoamento da produção, etc.

Dos fatores acima, depreende-se que somente o governo poderia resolver o problema e, conscientizando disso, o go - verno federal implantou uma política de eletrificação no país ' com os objetivos (26).

- melhorar as condições econômicas da população ru ral, decorrente do aumento da produção e da produ tividade, proporcionado pela energia elétrica.
- promoção do bem-estar do homem do campo.

Segundo OLIVEIRA (27), para o poder público, a ele trificação rural poderá se tornar um catalisador de profundas ' transformações em nossa estrutura agrária, revolucionando os a tuais conceitos de propriedade produtiva, de renda agrícola, de produtividade de êxodo rural, de mão de obra agrícola e outros. Considera que a introdução de energia elétrica na vida rural ' sob esse enfoque, equivale à inoculação de um princípio ativo ' no comportamento do homem do campo, capaz de gerar novas formas de vida e de trabalho num contexto de desenvolvimento.

O governo federal optou pelo sistema cooperativo e implantou definitivamente a política de eletrificação rural no país, o que permitiu vários contratos de financiamento a longo prazo com entidades internacionais.

BOCAERT (4) resume os principais benefícios de um serviço de eletrificação rural através de cooperativas, em 11 i tens principais:

a) Permite um atendimento genérico, planejado e organizado.

b) É uma sociedade constituída e dirigida pelos próprios interessados.

c) São sociedades que não visam a lucro e portanto, permitem o fornecimento mais barato dos serviços.

d) Permite aos interessados integralizar toda ou parte de seu capital mediante a prestação de serviços ou fornecimento de materiais diretamente à cooperativa.

e) Todos os sócios custodiam e vigiam as linhas, comunicando com rapidez os defeitos que por acaso forem por eles observados.

f) Realiza a união de esforços de maneira que permite o atendimento de grandes e pequenos.

g) Facilita o problema da passagem das linhas elétricas através das propriedades.

h) Permite a assistência técnica rápida e eficiente.

i) A cooperativa, além da sua atividade principal, preocupa-se também em promover outras atividades sociais, bastante necessárias na zona rural.

j) Não dispersa as atividades dos organismos que tratam do assunto, já que permitem atendimentos coletivos.

k) São sociedades que já provaram em outros países sua eficácia neste setor de atividades.

OLIVEIRA (28) distingue dois tipos de cooperativas na eletrificação rural brasileira, com características diferenciais bem definidas: as cooperativas tuteladas e as cooperativas autônomas. Denomina tutelada aquela cooperativa que é mero segmento da companhia concessionária, confundindo-se o sistema de distribuição de ambas e recaindo sobre a concessionária todos os encargos de administração, operação e manutenção da cooperativa. É o tipo mais usual no país.

Por cooperativa autônoma entende aquela que assume todos os encargos administrativos, financeiros e técnicos relativos a seu funcionamento, tendo um sistema de distribuição au tônomo e diferenciado do sistema da concessionária. Esse tipo de cooperativa é gerido integralmente pelos consumidores que o compõe e tem "status" de permissionária" entre os órgãos executores da política energética brasileira.

No sistema cooperativo, como não poderia deixar de ser, o consumidor arca com todas as despesas necessárias com a construção e operação do sistema. Suas obrigações são o custo efetivo do serviço ou seja o pagamento do material e mão de o bra relativos.

O governo destina às cooperativas de eletrificação rural fincnciamentos específicos para 80% do custo dos sistemas pelo prazo de 10 anos, com 2 anos de carência, a juros de 10% ao ano, sem correção monetária.

Estas condições sofrem pequenas variações nos diver sos estados do país. O mecanismo de implantação dos sistemas rurais e das cooperativas também não é o mesmo para todos os es tados brasileiros. Normalmente condicionam-se aos seguintes fa tores:

- disponibilidade de energia na área.
- divisão das propriedades de modo a obter-se numa boa densidade de carga.
- número suficiente de interessados.
- carga mínima em torno de 10 KVA/Km.

Após o depósito pelos interessados de uma quantia, 'variável nos diversos estados, é feito o levantamento cadastral

agro-elétrico onde se obtêm todas as informações necessárias ao estudo da viabilidade do projeto (29).

Sendo viável, os interessados confirmam sua participação no empreendimento, integralizando parceladamente 20% do total de seus compromissos, e o órgão promotor procede aos trabalhos preliminares de implantação do sistema, compreendendo:

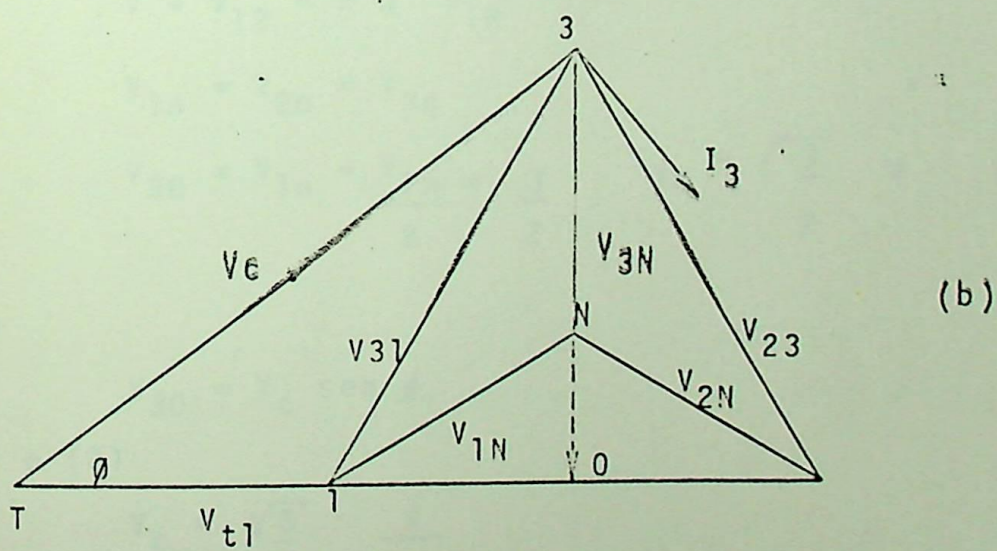
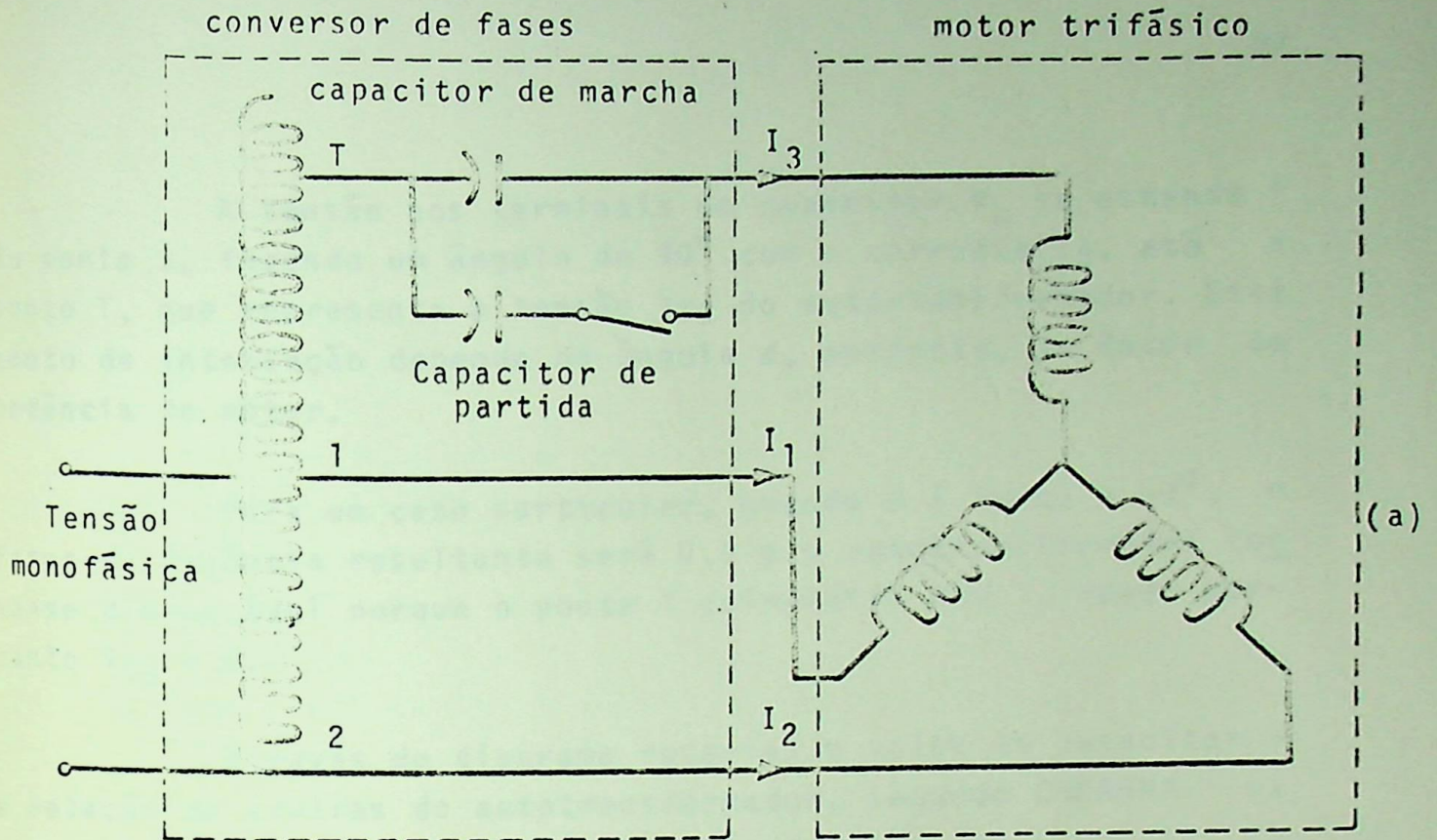
- levantamento topográfico e
- elaboração do projeto executivo.

6.2. O CONVERSOR DE FASES COM AUTOTRANSFORMADOR

Devido aos inconvenientes apresentados pelos conversores de fases tipo simples, será abordado aqui, somente a determinação de parâmetros dos conversores de fases com transformadores.

Na FIG 28, apresenta-se a representação esquemática de um conversor com autotransformador e seu diagrama vetorial para funcionamento a plena carga com um fator de potência ϕ .

A tensão V_{12} representa a tensão da linha monofásica que é aplicada ao autotransformador. As tensões V_{13} e V_{32} são aquelas que precisam ser obtidas para ter o trifásico equilibrado. Como os motores de indução geralmente funcionam com um fator de potência indutivo, portanto não unitário, as correntes normais do motor, representadas por I_1 , I_2 e I_3 , estão defasadas da tensão de um ângulo ϕ . Este representa o fator de potência da carga conectada ao conversor. O ponto 3 precisa ser determinado para que se tenha uma fonte simétrica de tensão.



Diagramas. da Combinação Conversor de Fases Motor Monofásico

A tensão nos terminais do capacitor V_C se estende ' do ponto 3, fazendo um ângulo de 90° com a corrente I_3 , até o ponto T, que representa a tensão V_{T2} do autotransformador. Este ponto de interseção depende do ângulo ϕ , portanto, do fator de potência do motor.

Para um caso particular, quando ϕ é igual a 60° , o fator de potência resultante será 0,5 e o autotransformador torna-se dispensável porque o ponto T coincidirá com 1, sendo portanto $V_{T1} = 0$.

Através do diagrama vetorial o valor do capacitor e a relação de espiras do autotransformador, segundo CHHABRA et alii (8), pode ser determinado como se segue:

Da FIG 28 temos que:

$$V_{no} = V_{n1} \text{ sen } 30 = \frac{V_{1n}}{2}$$

$$V = V_{12} = \sqrt{3} V_{1n}$$

$$V_{1n} = V_{2n} = V_{3n}$$

$$V_{30} = V_{1n} + \frac{V_{1n}}{2} = \frac{3}{2} V_{1n} = \frac{\sqrt{3}}{2} V \quad (1)$$

também

$$V_{30} = V_C \text{ sen } \phi \quad (2)$$

De (1) e (2)

$$V_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{\text{sen } \phi} \quad (3)$$

e a queda de tensão através do capacitor será:

$$V_c = I_3 X_c = I_3 \left(\frac{1}{2\pi f C} \right) \quad e$$

$$C = \left(\frac{I_3}{V_c} \right) \left(\frac{1}{2\pi f} \right) \quad (4)$$

Sob condições balanceadas, as correntes nos três enrolamentos do motor serão iguais:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I$$

onde I é a corrente nominal. Substituindo o valor de V_c de (3) e (4).

$$C = \left(\frac{I}{V} \right) \frac{2 \operatorname{sen} \phi}{\sqrt{3}} \frac{1}{2\pi f} \quad (5)$$

Para $f = 60$ Hz e 4 em MF, resolvendo (5), temos

$$C = 3066 \left(\frac{I}{V} \right) \operatorname{sen} \phi \quad (6)$$

onde V e I são as tensões e correntes nominais do motor e ϕ é o ângulo do fator de potência.

A tensão de saída do autotransformador pode ser escrita em termos da tensão primária.

$$V_{T2} = nV$$

onde n é a relação de espiras do transformador.

De (2) V_{T2} pode também ser expresso como:

$$V_{T2} = \left(\frac{1}{2} V \right) + \frac{\sqrt{3} V}{2 \operatorname{sen} \phi} \cos \phi$$

$$nV = \frac{1}{2} V + \frac{\sqrt{3} V \cot \phi}{2} \quad (7)$$

QUADRO 8 - Cálculo da Potência dos Elementos do Conversor Monofásico - Trifásico da Figura 23*.

Tipo de Circuito	Potência reativa		Tipo de elemento regulador	Potência do elemento regulador	Fator de potência do conversor
	Elemento indutivo	Elemento capacitivo			
Circuito de 2 elementos (FIG 23a)	$Q_{L1} = 0,667 S_n \times \text{sen}(60^\circ - \delta)$	$Q_k = 0,667 S_n \times \text{sen}(60^\circ + \delta)$	Reatância saturada	$Q_{L2} = 0,667 S_n \times \text{sen}(60^\circ + \delta) - S_m \text{sen}(60^\circ + \delta_m)$	$\cos \varphi = \frac{3 \cos \delta}{\sqrt{3 \cos^2 \delta + 1}}$
Circuito de 2 elementos (FIG 23b)			Reatância saturada	$Q_{L2} = 0,5 \left(\frac{S_n}{\text{sen} \delta} - \frac{S_m}{\text{sen} \delta_m} \right)$	$\cos \varphi = \text{sen } 2 \delta$
			Autotransformador	$S_{AT} = \frac{S_n (1,73 \cos \delta - \text{sen} \delta)}{3,46 \text{ sen } \delta}$	
Circuito de 3 elementos (FIG 23c)	$Q_{L1} = \frac{S_n}{u} [0,667 \times \text{sen}(60^\circ + \delta) - \text{sen } \delta]$	$Q_k = 0,667 S_n \times \text{sen}(60^\circ + \delta) \times \frac{1}{u} (1 - u + u^2)$	Autotransformador	$S_{AT} = 0,667 S_n \text{sen}(60^\circ + \delta) \times (1 - u) \sqrt{1 - u + u^2}$ para $u < 1$	$\varphi = \frac{t_g \delta}{3} = \frac{(2 - u) t_g \delta}{3 + 1,73 (1 - u)}$
				$S_{AT} = 0,667 S_n \text{sen}(60^\circ + \delta) \times (1 - \frac{1}{u}) \sqrt{1 - u + u^2}$ para $u > 1$	

* KOUJINITCH (21)

S_n , S_m = potência nominal e potência mínima da carga trifásica sinéfrica

δ = ângulo de defasagem da carga trifásica

φ = ângulo de defasagem da entrada monofásica do conversor

u = razão entre a tensão do braço LC convertido e a fonte de alimentação monofásica

δ_m = defasagem mínima.

