
Estudos de Dispositivos Elétricos para Conversão de Sistemas Monofásicos em Trifásicos para Acionamento de Motores Trifásicos em Áreas Rurais

RELATÓRIO TÉCNICO DPP/PER nº 621/2001

Autores:

João Clavio Salari Filho - CEPEL

Luciano Moraes de Souza - Fundação Padre Leonel Franca (FPLF)

Joaquim Carlos Silva d' Almeida – Fundação Padre Leonel Franca (FPLF)

Data:

01/11/2001

ÍNDICE

1. OBJETIVO	5
2. INTRODUÇÃO	5
3. CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS RURAIS	6
3.1 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NAS PROPRIEDADES RURAIS	6
a) Força motriz nos equipamentos eletrorrurais	6
b) Fonte de calor	7
c) Iluminação	7
3.2 DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS ELE TRORRURAIS	7
4. SISTEMAS ELÉTRICOS EMPREGADOS NAS REDES ELÉTRICAS RURAIS	7
4.1 SISTEMAS TRIFÁSICOS	7
4.2 SISTEMA BIFÁSICO	7
4.3 SISTEMAS MONOFÁSICOS	8
4.3.1 SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO PELO NEUTRO (MRN)	8
4.3.2 SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO PELA TERRA (MRT)	8
5. ANÁLISE DE PERDAS NOS MOTORES	9
6. DISPOSITIVOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES TRIFÁSICOS ALIMENTADOS POR UM SISTEMA MONOFÁSICO	10
6.1 HISTÓRICO	10
6.2 CONVERSORES ESTÁTICOS	12
6.2.1 A CAPACITORES	12
a) Características	12
b) Aplicação	16
c) Fabricantes	16
d) Custos	16
6.2.2 A AUTOTRANSFORMADORES	18
a) Características	18
b) Aplicação	21
c) Fabricantes	21
d) Custos	21
6.2.3 ELETRÔNICOS (DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES)	22
a) Características	22
b) Aplicação	24
c) Fabricantes	24
d) Custos	24

6.3	CONVERSORES ROTATIVOS	25
a)	Características	25
b)	Aplicação	25
c)	Fabricantes	25
d)	Custos	26
6.4	PESQUISAS DESENVOLVIDAS	26
6.4.1	CONVERTOR ESTÁTICO ELETRÔNICO - INDUTOR VARIÁVEL	26
6.4.2	CONVERSORES ESTÁTICOS ELETRÔNICOS - TOPOLOGIA SIMPLIFICADA	27
6.4.3	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO	28
6.5	IRRIGAÇÃO	29
6.5.1	MOTORES MONOFÁSICOS	29
6.5.2	MOTORES ESPECIAIS	30
6.5.3	CONVERSORES ESTÁTICOS ELETRÔNICOS	30
7.	VIABILIDADE ECONÔMICA DE APLICAÇÃO DOS CONVERSORES	30
7.1	PRIMEIRO CASO	31
7.1.1	CONSIDERAÇÕES	32
7.1.2	OBSERVAÇÕES	32
7.2	SEGUNDO CASO	34
7.2.1	CONSIDERAÇÕES	35
7.2.2	OBSERVAÇÕES	35
8.	CONCLUSÕES	37
9.	ESPECIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	38
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
APÊNDICE A	LISTA DE CONVERSORES INSTALADOS	41
APÊNDICE B	CUSTOS DOS SISTEMAS	44

1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é fornecer informações sobre a utilização de conversores do tipo sistema monofásico para trifásico suprimindo cargas trifásicas, inclusive especiais, em situações onde não existe ou é economicamente inviável a distribuição de energia elétrica através de sistemas trifásicos. É também apresentado, um panorama das tecnologias existentes, pesquisas desenvolvidas sobre o assunto e alternativas.

2. INTRODUÇÃO

A adoção de sistemas monofásicos datam da década de 30 nos Estados Unidos, com o desafio de levar a energia elétrica às áreas rurais com custos reduzidos [1]. No Brasil, os primeiros registros do uso mais intensivo de energia elétrica em zona rural são da década de 40, com o surgimento das primeiras Cooperativas de Eletrificação Rural, no Estado do Rio Grande do Sul [12, 13].

Hoje, a utilização de sistemas monofásicos em áreas rurais é predominante nas empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica da região Sul (CELESC, COPEL, CEEE, RGE, AES-SUL) e também em uma da região Sudeste, a CEMIG, justamente aquelas que possuem os maiores índices de eletrificação rural ou o maior número de consumidores rurais atendidos.

Nessas empresas predomina a utilização de transformadores monofásicos com potências de 5, 10, 15, 25 e 37,5 kVA. Na Tabela 1 apresentam-se o número de consumidores atendidos e a quantidade de transformadores instalados, por potência do transformador, nas concessionárias CEMIG, COPEL, CELESC e RGE [3], onde constata-se que 89,67% dos transformadores instalados são monofásicos.

Tabela 1 – Distribuição da potência dos transformadores monofásicos [3]

Empresa	Número de Consumidores	Monofásico [kVA]					Trifásico [kVA]				
		5	10	15	25	37,5	15	30	45	75	>100
CELESC	186.931	10.323	28.507	7.555	1.679	-	1.066	2.037	1.942	-	-
COPEL	274.000	35.978	46.700	14.116	1.935	-	7.028	6.118	2.187	1.764	-
RGE	188.516	8.872	10.335	3.581	732	-	2.441	2.848	1.709	488	-
CEMIG	492.530	88.002	123.235	66.703	11.602	5.897	7.821	7.807	4.225	3.993	155
Total	1.634.507	143.175	208.867	91.955	15.948	5.897	18.356	18.810	10.063	6.245	155

Os sistemas monofásicos apresentam-se como suficientes para o atendimento às cargas rurais, além de, em relação aos sistemas trifásicos, alcançar em uma redução de custo de investimento de 30 a 40% em função da simplicidade de projeto (eliminação de cruzetas; redução da quantidade de condutores, isoladores, chaves, pára-raios ou descarregadores de chifre e postes associados ao uso de vãos longos) e da conseqüente diminuição da mão-de-obra e rapidez de construção.

Não obstante, surgem ocasiões em que há necessidade de usar motores trifásicos em

algumas propriedades agrícolas, como solução única, como são os casos de acionamento de eletrobombas de grande capacidade para captação de água em poços profundos, irrigação ou quando da utilização de motores elétricos de potências superiores a 12,5CV, visto que, esta potência é a do maior motor monofásico padrão fabricado no Brasil.

É reconhecida a grande vantagem de se utilizar motores trifásicos. A opção por esses motores, justificaria a utilização dos conversores que são equipamentos que convertem a energia elétrica de corrente alternada com dado número de fases, em um sistema com outro número de fases, à mesma frequência e/ou frequência variável, como é o caso dos conversores eletrônicos.

É importante não superdimensionar os motores, pois, neste caso, tanto a eficiência quanto o fator de potência são reduzidos, comprometendo diretamente as premissas e, portanto, os resultados apresentados neste relatório. Isso acarreta o aumento da corrente do motor, contribuindo para o aumento das perdas no sistema e, conseqüentemente, da queda de tensão na linha [9].

Levantamentos realizados [9] sobre o dimensionamento de motores instalados em propriedades rurais do Estado de São Paulo, comprovaram a prática de superdimensionamento de motores, conforme pode ser observado nos dados da Tabela 2.

Tabela 2 – Distorções das potências encontradas nos estabelecimentos [9]

Visitas	Número de vacas	Volume cortado (kg)	Potência recomendada pelo estudo (CV)	Potência encontrada (CV)	Potência recomendadas pelos vendedores (CV)
1	300	4.500	7,5	10,0	20,0
2	280	4.200	7,5	10,0	20,0
3	50	750	3,0	10,0	10,0
4	65	975	3,0	10,0	10,0
5	16	240	3,0	10,0	5,0
6	22	330	3,0	10,0	5,0

3. CARACTERÍSTICAS DAS CARGAS RURAIS

3.1 UTILIZAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NAS PROPRIEDADES RURAIS

Diversas são as formas de utilização da energia elétrica nas propriedades rurais como insumo de produção e de aumento da produtividade, propiciadas pela adoção de novas tecnologias e pela diversificação das atividades.

A energia elétrica pode ser utilizada como:

a) Força motriz nos equipamentos eletrorurais

- Beneficiamento e classificação de cereais.
- Preparo de alimentos para bovinocultura, suinocultura, avicultura, etc.

- Automação da distribuição dos alimentos.
- Bombeamento de água para limpeza e consumo.
- Bombeamento de água para irrigação.
- Ventilação de galpões.
- Ordenha mecânica.
- Resfriamento de produtos.

b) Fonte de calor

- Nos aquecedores de galpões.
- Nas chocadeiras.

c) Iluminação

3.2 DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS ELETRORRURAIS

Quando da escolha e do dimensionamento do equipamento eletrorrural, o proprietário deverá considerar as atividades desenvolvidas na propriedade e, se for o caso, aquelas planejadas para serem implementadas a curto e a médio prazos.

Desse modo, e levando em consideração as características de exploração da propriedade, o número de animais a serem manejados e a área de exploração, deverão ser escolhidos os equipamentos que apresentem o melhor rendimento para o tempo disponível do produtor ou do empregado para a execução da tarefa.

4. SISTEMAS ELÉTRICOS EMPREGADOS NAS REDES ELÉTRICAS RURAIS

A escolha da utilização, tanto técnica quanto econômica, de conversores é diretamente influenciada pelo sistema de alimentação. A seguir mostra-se os tipos de sistemas empregados nas redes elétricas rurais [4].

4.1 SISTEMAS TRIFÁSICOS

Este sistema é constituído por três condutores de fase e, dependendo se é efetivamente aterrado ou multiterrado, por mais um condutor, o condutor neutro.

Deste sistema podem derivar sistemas bifásicos, monofásicos com retorno pelo neutro (MRN) e monofásicos com retorno pela terra (MRT).

4.2 SISTEMA BIFÁSICO

O sistema bifásico constitui-se de dois condutores de fase, ou dois condutores de fase e o condutor neutro, derivados de uma rede trifásica e é utilizado preferencialmente para

suprimento a cargas monofásicas.

É indicado para áreas onde a conexão da rede primária da concessionária não permite a execução de sistema monofásico ou onde haja previsão de um rápido crescimento de carga além da capacidade do sistema monofásico, pois permite o atendimento deste aumento de carga com a sua conversão para o sistema trifásico.

Estes sistemas alcançam em média uma redução de custo de aproximadamente 20% em relação aos sistemas trifásicos.

4.3 SISTEMAS MONOFÁSICOS

4.3.1 SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO PELO NEUTRO (MRN)

Este sistema é constituído de um condutor de fase e um condutor neutro, o qual serve de retorno para a corrente. Sendo o neutro multiterrado, parte da corrente também retorna pela terra.

Sua aplicabilidade deve sempre ser analisada sempre que a carga a ser atendida não exigir o sistema bifásico ou trifásico, buscando-se o menor custo. Assim, por exemplo, quando do atendimento de cargas em áreas rurais pouco povoadas e, portanto, com baixa densidade de carga.

Nos Estados Unidos e Canadá o desenvolvimento da eletrificação rural tem sido quase totalmente feito com o uso do sistema MRN, que atualmente se estende por milhares de quilômetros.

Em relação aos sistemas trifásicos, alcança em média uma redução de custo de investimento de aproximadamente 30%.

4.3.2 SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO PELA TERRA (MRT)

O Sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT) foi criado pelo Eng^o Lloyd Mandeno de Auckland em 1941 na Nova Zelândia, na área de Bay of Islands, na North Island. Dali estendeu-se à Austrália a partir de 1952, onde hoje cobre uma área de milhares de km². No Canadá, foi adotado na província de Saskatchewan a partir de 1949. Na Rússia, foi adotado para o atendimento em zonas agrícolas, sendo que, em Leningrado, usou-se linhas portáteis deste tipo para atender demandas sazonais de irrigação e moagem. De fato, atualmente, o sistema MRT tem sido adotado em muitos países do mundo para suprimento de áreas rurais, seja na concepção original ou numa concepção que associa o princípio de outros sistemas (sistemas híbridos).

No sistema MRT há apenas um condutor de fase acima do solo, sendo o solo o condutor para o retorno da corrente.

Portanto, em função de ter somente um condutor, o sistema MRT tem aplicação direta à alimentação de pequenas cargas em áreas esparsamente povoadas, associado a necessidade de reduzir ainda mais o custo conseguido com o sistema monofásico com retorno pelo neutro (MRN), desde que os critérios de proteção e aterramento sejam garantidos e não onerem o projeto. Pode-se apresentar na versão com ou sem um transformador de isolamento.

5. ANÁLISE DE PERDAS NOS MOTORES

Para uma dada potência, os motores trifásicos são significativamente mais eficientes que seus similares monofásicos, como pode ser visto na Figura 2. Estes dados foram obtidos de catálogos de fabricantes para rendimento com carregamento de 100%.

A faixa de valores de potência apresentada é limitada pelo maior valor de potência do motor monofásico padrão fabricado no Brasil para aplicação rural, isto é 12,5 CV.

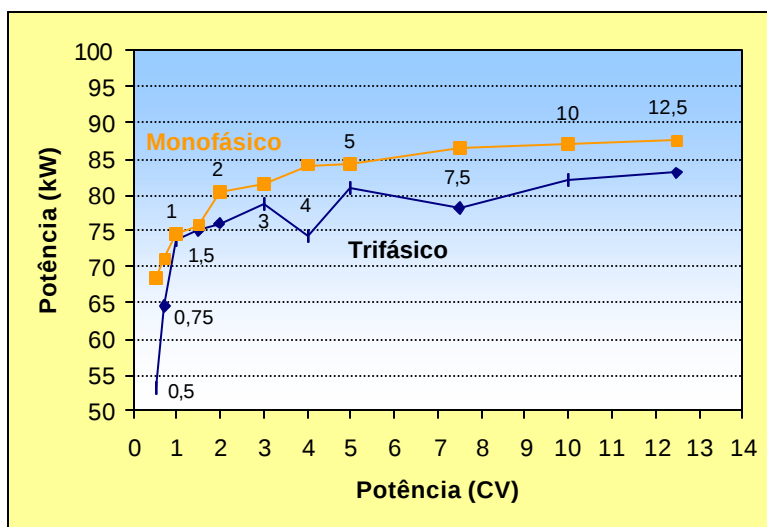


Figura 1 – Potência elétrica de motores monofásicos e trifásicos

Na Figura 2 os valores de potência em CV foram convertidos em kW utilizando-se os valores de rendimento dos motores monofásicos e trifásicos.

Nota-se nesta figura que, os valores de potência em kW apresentados para os motores trifásicos encontram-se sempre abaixo dos motores monofásicos de potência similar e em alguns casos chegando a uma diferença de rendimento superior a 10%.

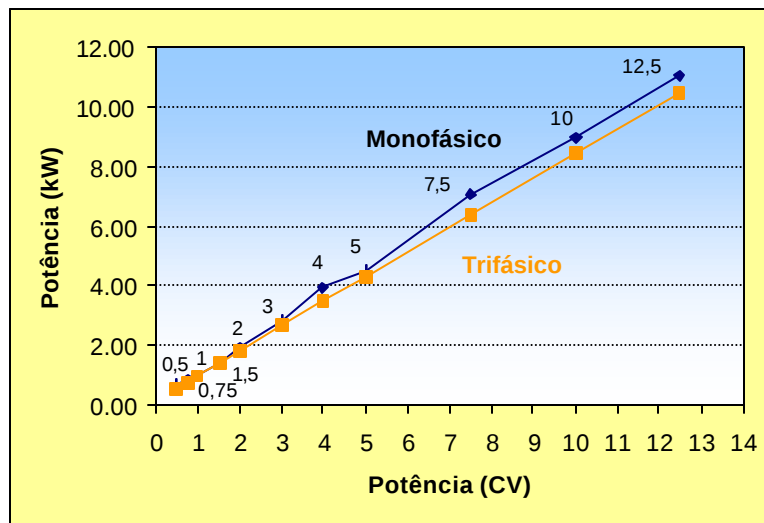


Figura 2 – Potência elétrica de motores monofásicos e trifásicos

Por outro lado, a seguir são apresentados outros fatores que caracterizam em certos casos a vantagem dos motores trifásicos:

- Correntes de partida e em regime em motores trifásicos são menos severas que em motores monofásicos [14].
- Motores monofásicos se caracterizam por apresentarem:
 - Torque pulsante em regime, provocando falhas mecânicas e ruídos.
 - Baixo torque de partida.
 - São muito mais pesados, chegando próximo ao dobro da massa (kg) de um similar trifásico [33] e, conseqüentemente, são mais caros.

6. DISPOSITIVOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES TRIFÁSICOS ALIMENTADOS POR UM SISTEMA MONOFÁSICO

6.1 HISTÓRICO

Até 1950, nos Estados Unidos, não se tinha conseguido a aprovação do “Underwriters Laboratories” e, além disso, a REA (*Rural Electrification Administration*) não recomendava o uso dos conversores. Finalmente, só a partir de 1970, a REA regulamentou o uso desses dispositivos [1].

Hoje em dia, tais conversões são extensivamente usadas na eletrificação rural dos Estados Unidos, Canadá, Austrália, e outros países. A utilização destes conversores acarreta um investimento que representa somente uma fração dos custos de implantação de um sistema trifásico de distribuição [19].

No Brasil, ressalta-se a instalação destes conversores em diversas regiões do país no final da década de 70 e início da 80 (até 1983), como se pode verificar na lista de conversores instalados nas diversas regiões (Apêndice A - Tabela 10). As maiores potências instaladas são de 30 e 35 CV; a menor de 3 CV; os mais frequentes são de 5, 7½ e 10 CV.

Os conversores utilizados no passado eram basicamente de dois tipos, estático (capacitor e autotransformador) e rotativo. Hoje, com a evolução tecnológica dos dispositivos semicondutores, verifica-se uma grande disseminação dos conversores estáticos eletrônicos de potência [5].

Em geral, os conversores comerciais são fornecidos com sistemas de proteção para surtos de tensão e corrente para o conjunto motor/conversor. O mesmo ocorre para o sistema de partida dos motores, que dispensa componentes adicionais.

Neste trabalho, optou-se por classificar os conversores por seu principal componente, pois observou-se esta tendência nas referências existentes na literatura. Essa classificação está mostrada na Figura 3 e é a seguinte:

- Conversores Estáticos a **Capacitores** – São construtivamente mais simples, pois se compõem unicamente de capacitores.
- Conversores Estáticos a **Autotransformadores** – Procuram eliminar os desequilíbrios causados pela topologia anterior; são compostos de um autotransformador e capacitores.
- Conversores Estáticos Eletrônicos - **Dispositivos Semicondutores** – São equipamentos com grande avanço tecnológico, que permite, por exemplo, o controle da velocidade de motores de indução. Possuem dispositivos semicondutores, indutores e capacitores.
- Conversores Rotativos – **Máquinas de Indução** – São máquinas usadas exclusivamente para este fim, pois não podem ser carregadas em seu eixo.

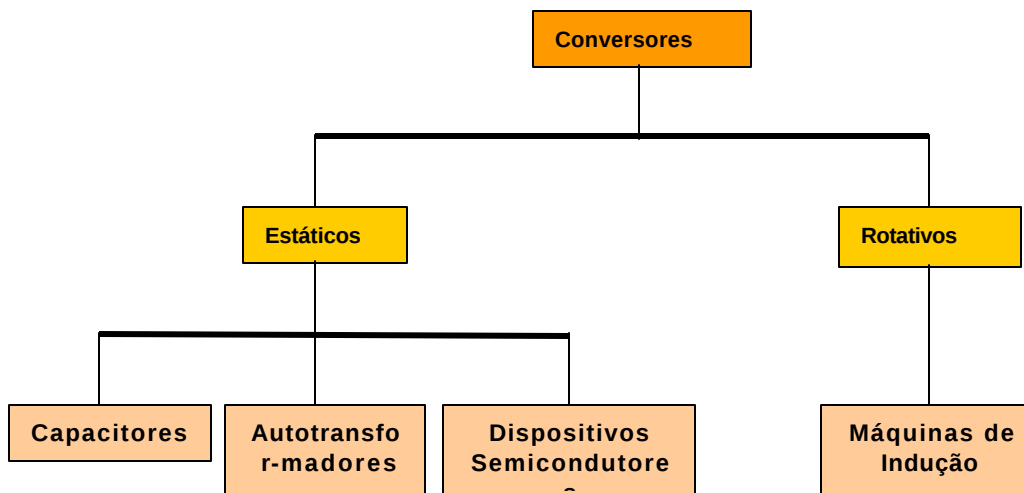


Figura 3 – Classificação dos conversores

Na próximo item, será descrito com detalhes cada tipo de conversor, com foco para aplicação no meio rural.

6.2 CONVERSORES ESTÁTICOS

6.2.1 A CAPACITORES

a) Características

Têm geralmente um terminal conectado a uma das fases do secundário do transformador de uma propriedade rural e seu outro terminal (C) compõe a fase faltante que irá alimentar o motor trifásico, como é mostrado na Figura 4. Uma outra topologia utiliza-se desse mesmo artifício, sendo que, para cada fase do transformador, é conectado um capacitor.

Na Figura 5 está a segunda topologia, onde observa-se que o motor trifásico pode ser acionado como um motor monofásico, ligando-se dois dos três terminais do motor e adicionando-se capacitores entre o terceiro terminal (C) do motor e as duas fases de alimentação monofásica.

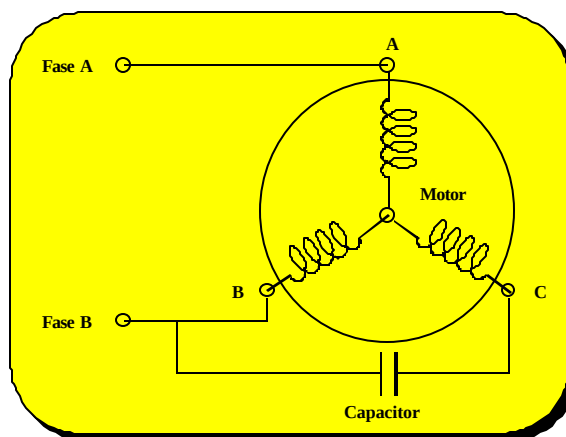


Figura 4 – Conversor estático a capacitor conectado em uma das fases

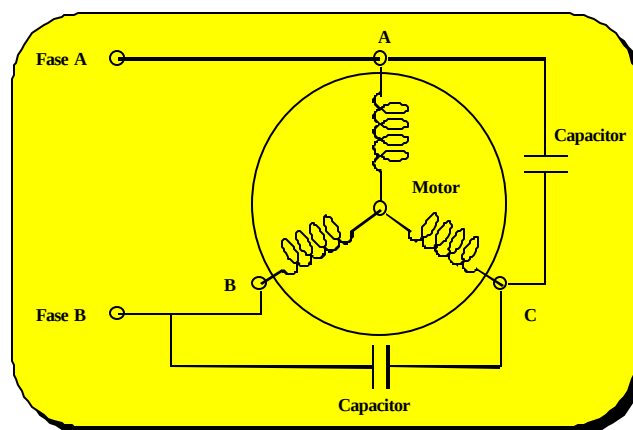


Figura 5 – Conversor a capacitor conectado nas duas fases

Para que tal princípio de uso de capacitores possa ser entendido, na Figura 6 mostra-se dois exemplos de sistemas de redes de alimentação de energia elétrica:

- Sistema monofásico, com tensão de 240V entre as fases A e B do secundário do transformador.
- Sistema trifásico, de mesma tensão entre as fases. É o que se deseja para a alimentação de cargas trifásicas, como motores elétricos.

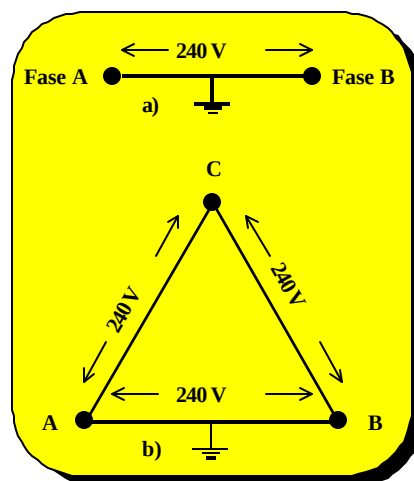


Figura 6 – a) Sistema monofásico e b) Sistema trifásico de redes de alimentação de energia elétrica

Na Figura 7 e na Figura 8 mostram-se as defasagens encontradas nos sistemas descritos na Figura 6; sendo que na Figura 7, tem-se a defasagem de 180° encontrada nos sistemas monofásicos; na Figura 8, tem-se as defasagens de 120° , que caracterizam os sistemas trifásicos.

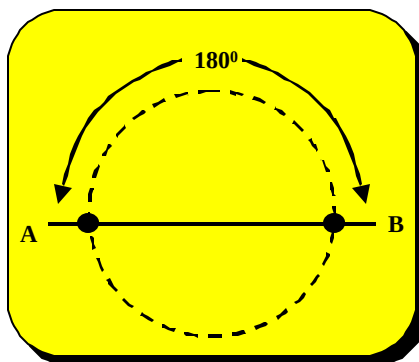


Figura 7 – Defasagens do sistema monofásico

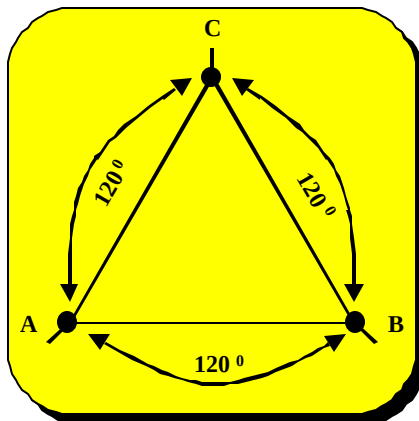


Figura 8 – Defasagens do sistema trifásico

Na Figura 9 mostra-se que a adição de capacitores cria um novo sistema, neste exemplo, a situação ideal, que apresenta as defasagens descritas. Isso é explicado pelo fato dos capacitores apresentarem inércia de tensão em seus terminais, o que acarreta uma defasagem de 90° da tensão em relação a corrente.

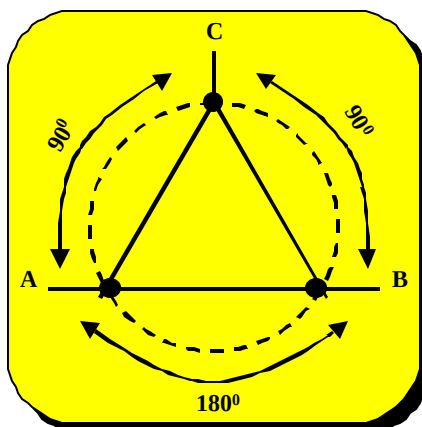


Figura 9 – Sistema trifásico criado pelo conversor estático a capacitor

Na Figura 10 mostra-se um sistema semelhante ao descrito na Figura 9, de mesma tensão e defasagem entre seus terminais, ou seja, um sistema equilibrado. Para o sistema trifásico real criado pelo conversor a capacitor, isso não ocorre, pois esta terceira fase criada é fortemente influenciada pela carga. O valor da capacitância deve possibilitar o melhor equilíbrio entre as fases. A Figura 11 mostra o que pode ocorrer quando houver um desequilíbrio causado por este sistema.

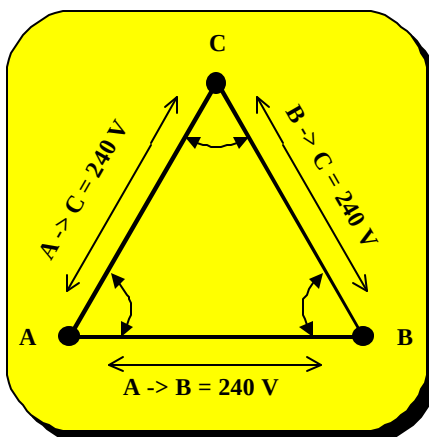


Figura 10 – Sistema trifásico ideal

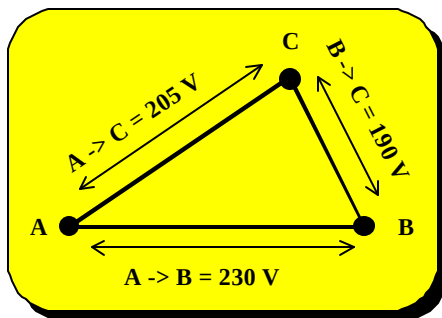


Figura 11 – Sistema trifásico real

b) Aplicação

A operação do conversor estático a capacitor é fortemente influenciada pela carga conectada. Por isso, sua fabricação atende a uma determinada característica de carga especificada. Assim o motor não operará com igual eficiência e potência como se fosse ligado a uma rede trifásica, mas terá correntes desequilibradas nos seus três enrolamentos, como observou-se na Figura 11, gerando diferentes aquecimentos nos mesmos.

Este conversor reduz muito o conjugado de partida do motor. Pode-se esperar uma redução do conjugado de partida de 50% em relação ao que o motor teria, caso fosse ligado à rede trifásica, e por isso ligam-se mais capacitores no circuito no período de partida, elevando, dessa maneira, o conjugado [1]. A condição para garantir a operação equilibrada deste sistema faz com que o motor opere com um baixo fator de potência, com ângulo da corrente de 60° com as fases do sistema monofásico.

Para manter a temperatura do motor nos limites recomendados, a potência de acionamento é reduzida, limitando-se a mesma a um carregamento de 70% da potência nominal do motor para regime contínuo e 95% para intermitente, não superior a 15 minutos com um igual período de resfriamento [28].

Em função desses fatores, este conversor é indicado para acionamento de cargas que não requeiram alto conjugado de partida, como: trituradores, ventiladores, tornos, furadeiras, etc. Além disso, não pode ser utilizado para acionar mais de um motor simultaneamente.

Por outro lado, a perda de potência com a utilização deste conversor é compensada pelo seu baixo custo e simplicidade construtiva.

c) Fabricantes

- Electram Rotary Equipment Ltd., <http://www.electram.com>
- GWM Corporation, <http://www.gwm4-3phase.com>
- Tower Electric Motor Company, <http://www.phaseconverter.com/>

d) Custos

Este tipo de conversor estático encontra-se disponível nas potências mostradas nas

Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5. É importante ressaltar que o modelo adequado depende da aplicação, pois dois modelos podem atender a mesma potência.

Tabela 3 – Potências disponíveis para o Conversor Estático a Capacitor - 06/2001 [28] - GWM Corporation

Modelo	Motor [CV]	Preço[US\$]
CD 10	0,5-1,5	151
CD 12	1-4	172
CD 13	2-5	186
CD 14	3-7	204
CD 15	6-10	239
CD 16	8-14	319
CD 17	12-19	483
CD 18	20-28	597
CD 19	28-38	839
CD 20	38-48	1044
CD 21	48-58	1187
CD 22	58-70	1391
CD 23	70-85	1862
CD 24	85-100	2445

Tabela 4 – Potências disponíveis para o Conversor Estático a Capacitor - 06/2001 [29] - Tower Electric Motor Company

Modelo	Motor [CV]	Preço [US\$]
TEMCo - ¾ LSD	1/3-3/4	95
TEMCo - 1 ½ LSD	3/4-1 1/2	105
TEMCo - 3 LSD	2-3	115
TEMCo - 5 LSD	5	135
TEMCo - 7 ½ LSD	7 ½	165

Tabela 5 – Potências disponíveis para o Conversor Estático a Capacitor - 06/2001 [29] - Tower Electric Motor Company

Modelo	Motor [CV]	Preço [US\$]
TEMCo - ¾HSD	1/3-3/4	118
TEMCo - 1 ½ HSD	3/4-1 1/2	129
TEMCo - 3 HSD	2-3	142
TEMCo - 5 HSD	3-5	176
TEMCo - 7 ½ HSD	7 1/2	210
TEMCo - 10 HSD	10	294
TEMCo - 15 HSD	15	485
TEMCo - 20 HSD	20	629
TEMCo - 30 HSD	30	778
TEMCo - 40 HSD	40	890
TEMCo - 50 HSD	30-50	1098

6.2.2 A AUTOTRANSFORMADORES

a) Características

O segundo tipo, com autotransformador, permite equilibrar à plena carga as correntes nos enrolamentos do motor. No diagrama da Figura 12 mostram-se dois dos terminais do motor trifásico ligados através do banco de capacitores ao autotransformador. Os “taps” permitem o ajuste da tensão suprida ao banco de capacitores, balanceando-se as correntes.

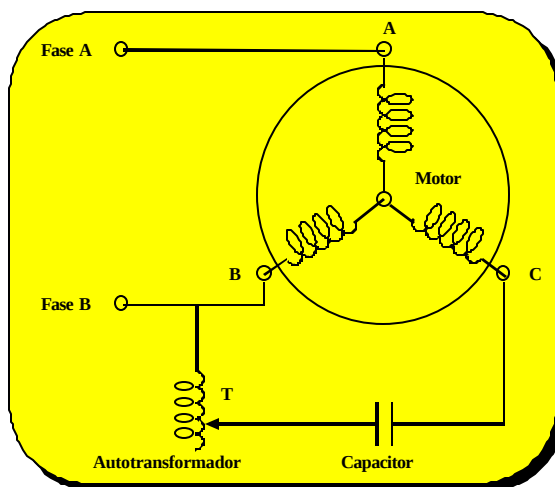


Figura 12 – Conversor estático a autotransformador

As equações analíticas para a determinação do dimensionamento dos capacitores e o número de espiras do autotransformador que resultarão em tensões e correntes equilibradas no motor, aqui apresentadas, foram desenvolvidas por *Roshan L. Chhabra*, *Leo H. Soderholm* e *Leon F. Charity*, na IEEE Rural Electric Power Conference, de 1972 e

transcritas do RER 03 [1] com algumas alterações.

As equações usam como variáveis independentes parâmetros facilmente obtidos na placa do motor a ser acionado, quais sejam: corrente nominal, tensão e ângulo do fator de potência nos enrolamentos para uma carga específica de um dado motor.

O diagrama vetorial correspondente ao diagrama simplificado da Figura 12, para condição de equilíbrio de fases, é o indicado na Figura 13.

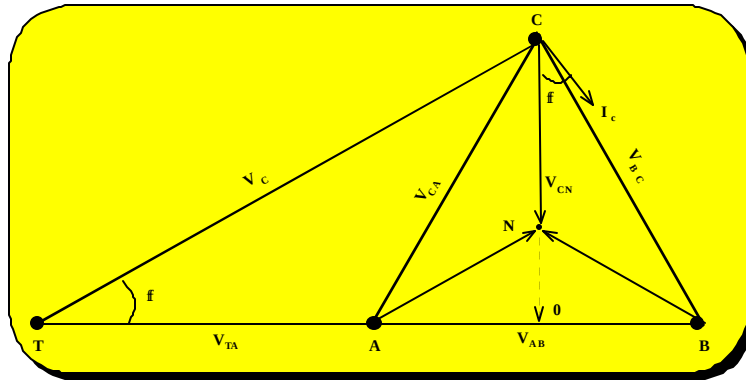


Figura 13 – Sistema trifásico criado pelo conversor estático a autotransformador

A tensão monofásica é igual a V_{AB} , tensão nominal do motor. A tensão do autotransformador V_{TB} está em fase com V_{AB} e portanto está na mesma direção do motor. As correntes I_A , I_B e I_C , nos três enrolamentos do motor estão em atraso das tensões correspondentes no sentido horário adotado, de um ângulo ϕ . Note-se que, por simplicidade, na Figura 13 só é mostrada I_C .

A tensão no terminal C do motor é determinada pela tensão no capacitor V_C e pela tensão de saída do autotransformador, dada por $V_{TB} = V_{AB} + V_{TA}$. A tensão no capacitor V_C faz um ângulo reto com a corrente I_C . Quando se prolonga o vetor V_C , ele intercepta a tensão de saída do autotransformador V_{TB} no ponto T.

Para operar um motor trifásico sob condições de equilíbrio, a tensão de saída do transformador deverá ser igual a V_{TB} e a queda de tensão através do capacitor deverá ser V_C .

As equações para dimensionamento do capacitor e do número de espiras do autotransformador são derivadas como segue:

$$V_{N0} = V_{AN} \sin 30^\circ = \frac{V_{AN}}{2}$$

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN}$$

$$V_{AN} = V_{BN} = V_{CN}$$

$$V_{C0} = V_{AN} + \frac{V_{AN}}{2} = \frac{3}{2} V_{AN} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{AB}$$

$$V_{C0} = V_C \sin \phi$$

$$V_C = I_3 X_C = I_C \left(\frac{1}{2\pi f C} \right)$$

$$C = \frac{I_C}{V_C 2\pi f}$$

Sob condições balanceadas, as correntes nos três enrolamentos do motor são iguais, portanto: $I_A = I_B = I_C = I$, onde I é a corrente de placa.

Substituindo o valor de V_C , vem:

$$C = I \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} V_{AB}} \frac{1}{2\pi f}$$

Para $f = 60$ Hz e C em [mF], vem:

$$C = 3,063 \left(\frac{I}{V_{AB}} \right) \sin \phi ,$$

onde V e I são respectivamente a tensão e a corrente de placa do motor e ϕ é o ângulo do fator de potência.

A mesma análise pode ser feita para o cálculo do capacitor do conversor estático a capacitor. O resultado mostra que o valor do capacitor encontrado depende somente da corrente de placa do motor. Isto significa que o desempenho do conversor é fortemente dependente da carga conectada ao motor.

A tensão de saída V_{TB} , do autotransformador, necessária para a operação balanceada do motor, pode ser escrita, em termos da tensão de suprimento, isto é:

$$V_{TB} = n V_{AB} ,$$

onde n é o número de espiras do transformador.

Tem-se, portanto:

$$V_{T0} = \frac{\sqrt{3} V_{AB}}{2 \sin \phi} \cos \phi$$

$$V_{TB} = \frac{1}{2} V_{AB} + \frac{\sqrt{3} V_{AB}}{2 \sin \phi} \cos \phi$$

$$n = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cot g \phi$$

b) Aplicação

Os “*taps*” do autotransformador permitem o ajuste da tensão suprida ao banco de capacitores, balanceando-se as correntes nos enrolamentos para uma carga específica de um dado motor.

Diferentemente da construção somente a capacitor, a construção com autotransformador permite que mais de um motor possa ser operado simultaneamente com esse tipo de conversor. Para melhorar o conjugado de partida desses conversores, capacitores adicionais são ligados no circuito, mas somente na partida.

O conversor estático a autotransformador teoricamente permite o controle do fator de potência para todos os valores diferentes do unitário.

c) Fabricante

- Electram Rotary Equipment Ltd., <http://www.electram.com>

d) Custos

Nos Estados Unidos esses equipamentos são fabricados em série nas potências de 1 a 100 CV. O seu custo em março de 1980, FOB Louisiana, é o indicado na Tabela 6 [1].

Tabela 6 – Potências disponíveis para o Conversor a Autotransformador - 03/1980 [1].

Potência [CV]	A Prova de Chuva uso Externo/Interno [US\$]	A Prova de Poeira [US\$]
1/4	242	303
1/3	246	303
1/2	252	315
3/4	256	320
1	296	370
1 1/2	330	413
2	349	437
3	388	485
5	418	522
7 1/2	614	768
10	718	898
15	890	1113
20	1070	1338
25	1294	1618
30	1530	1913
40	1842	2302
50	2238	2797
60	2660	3225
75	3344	4180
100	4270	5337

6.2.3 ELETRÔNICOS (DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES)

a) Características

O avanço tecnológico dos dispositivos semicondutores proporcionaram um crescimento dos acionamentos de motores com conversores eletrônicos de potência. Esses equipamentos permitem o controle da tensão/corrente e frequência de saída para o motor independente da rede de alimentação [5]. Por conseguinte, este tipo de acionamento permite, no caso dos motores de indução, o controle da velocidade e/ou do torque dessas máquinas.

A estrutura dos conversores eletrônicos, em sua grande totalidade, é mostrada na Figura 14. A alimentação do conversor é feita por rede monofásica e a saída trifásica alimenta o motor. Nesta figura podem ser observados três estágios, que são os seguintes:

- **Retificador** - A função deste estágio é transformar a corrente de entrada do conversor unidirecional. Nesse caso, o retificador é conhecido como de onda completa, pois os ciclos positivo e negativo são usados para esse fim.
- **Filtro ou “Link” CC** – Os filtros são usados para eliminar as oscilações presentes na saída do estágio de retificação. Essas oscilações são os semi-ciclos da tensão senoidal da rede de alimentação.

- **Inversores** – É o estágio que efetivamente converte a tensão filtrada no “Link” CC em alimentação trifásica para o motor. Os tipos de dispositivos semicondutores encontrados neste estágio permitem o controle da tensão/corrente e frequência desejada.

Para o controle destas chaves eletrônicas são geralmente utilizados microcontroladores, que permitem armazenar informações e efetuar operações em alta velocidade.

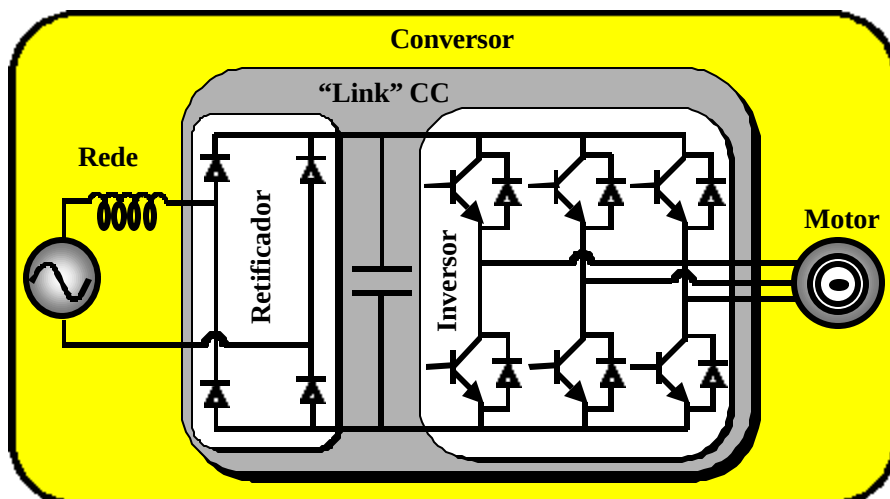


Figura 14 – Conversor estático eletrônico

O controle para esse tipo de acionamento denomina-se Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM). Na Figura 15 pode-se observar a tensão de alimentação do motor e sua componente fundamental senoidal. As características elétricas dos motores e da rede de alimentação funcionam como filtros para as correntes que circulam no conjunto conversor/motor.

Dependendo das características elétricas da rede de alimentação, é necessária a utilização de reatâncias de rede para filtragem da corrente de entrada do conversor. Tal procedimento propicia:

- Aumento do fator de potência.
- Aumento da vida útil dos capacitores.
- Diminuição da distorção harmônica na tensão/corrente de entrada do conversor.

De um modo geral, os conversores podem ser ligados diretamente à rede elétrica.

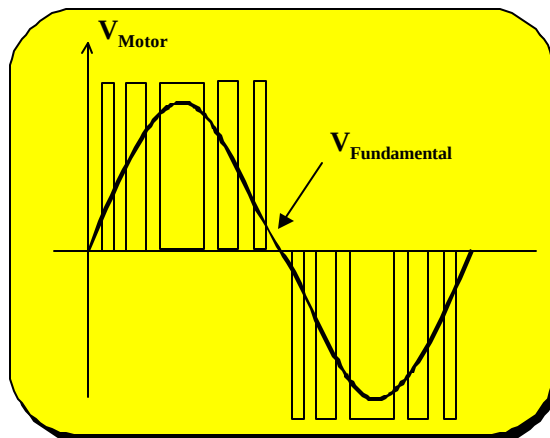


Figura 15 – Tensão fase-fase de alimentação do motor

b) Aplicação

Os conversores trifásicos comerciais são encontrados, com facilidade, para um grande faixa de potência, atendendo o mercado industrial. Porém, os modelos monofásicos estão limitados a 5 CV (potência do motor a ser acionado).

Para alcançar maiores potências de acionamento, utiliza-se conversores comerciais trifásicos que podem ser alimentados por rede monofásica. É sugerido um conversor com o dobro da corrente da carga a ser acionada, para compensação da ausência de uma fase e do dimensionamento do filtro ("Link" CC). Esse fato, acarreta acréscimo no custo desse equipamento como será visto no item d).

Em sistemas de irrigação, onde válvulas mecânicas são usadas para controle de vazão e/ou em superfícies com diferentes alturas manométricas, o uso de conversores eletrônicos com controle de velocidade do motor proporciona economia de energia, além de redução de desgaste mecânico, redução da demanda de energia elétrica e melhoria do fator de potência [5 , 11].

c) Fabricantes

- Electram Rotary Equipment Ltd., <http://www.electram.com>
- ABB, <http://www.abb.com/br>
- GE- GEVISA, <http://www.geindustrial.com.br/>,
- Siemens, <http://www.siemens.com.br/ind/ind.html>
- Weg, <http://www.weg.com.br/>
- Yaskawa, <http://www.yaskawa.com.br/>

d) Custos

Como foi apresentado, os conversores estáticos eletrônicos são equipamentos com

grande avanço tecnológico, sendo usados para otimização e efficientização de sistemas. Na maioria das aplicações rurais seu uso é dispensável, pois seus custos são elevados e limitados a pequenas potências. A seguir apresenta-se o custo de um modelo monofásico e seu equivalente trifásico, preços em Reais para o mês de Maio, 2001 (1U\$ = 2,36 R\$):

- Inversor Monofásico de 3CV – 220V – 11A; Custo: R\$1.119,73 (imposto incluso).
- Inversor Trifásico de 6CV – 220V – 17,5A; Custo: R\$1.571,60 (imposto incluso).

6.3 CONVERSORES ROTATIVOS

a) Características

Os conversores rotativos são constituídos obviamente de uma parte rotativa, semelhante a um motor trifásico, e de capacitores, como mostrado na Figura 16. São bem robustos e atendem às mais severas condições de trabalho, permitindo o comando de um ou mais motores [1].

O sistema consiste de um motor de indução a vazio (sem carga no eixo) com um capacitor atuando para balancear as fases do sistema trifásico que irá alimentar os motores (cargas) [15]. A potência desse motor deverá ser igual a soma das potências dos motores a serem acionados para garantir sua performance.

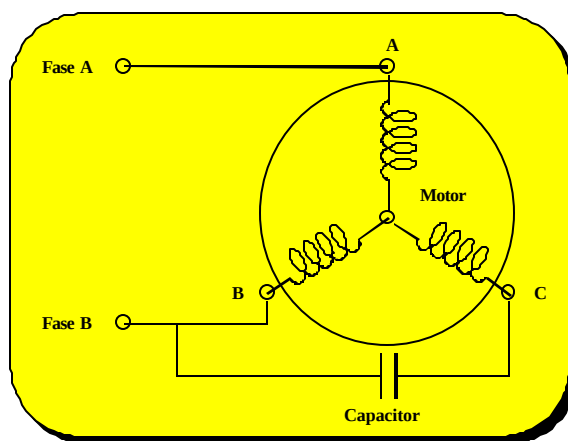


Figura 16 - Conversor rotativo

b) Aplicação

São ainda recomendados para acionamentos de máquinas operatrizes, sujeitas a freqüentes interrupções e manobras de inversão no sentido de rotação dos motores.

c) Fabricantes

- Electram Rotary Equipment Ltd., <http://www.electram.com>
- GWM Corporation, <http://www.gwm4-3phase.com>
- Tower Electric Motor Company, <http://www.phaseconverter.com/>

d) Custos

Na Tabela 7 mostra-se o custo deste equipamento.

Tabela 7 – Potências disponíveis para o Conversor Rotativo- 06/2001 [27 , 28 , 29]

Motor [CV]	Preço [US\$]
3	596
5	765
7 1/2	1015
10	1295
15	1825
20	2165
30	2990
40	3650
50	4490

6.4 PESQUISAS DESENVOLVIDAS

Várias pesquisas [14 , 15 , 19 , 21 , 23 , 25 , 26] então sendo desenvolvidas para adequar as necessidades da conversão do sistema monofásico em trifásico, para aplicações rurais, sem levar a altos custos.

Optou-se por mostrar alguns destes trabalhos, que são voltados para aplicações com velocidade de motor fixa, pois a maioria das aplicações rurais não requer controle de velocidade/torque dos motores.

6.4.1 CONVERSOR ESTÁTICO ELETRÔNICO - INDUTOR VARIÁVEL

No esquema da Figura 17 apresenta-se uma estrutura de controle flexível quando comparada aos conversores estáticos a capacitor e autotransformador, sendo que, seu controle é mais complexo e seu custo é maior.

A topologia mostrada possui dois dispositivos semicondutores ligados em anti-paralelo com um indutor série, produzindo assim um sistema trifásico balanceado para qualquer operação de fator de potência dos motores [15].

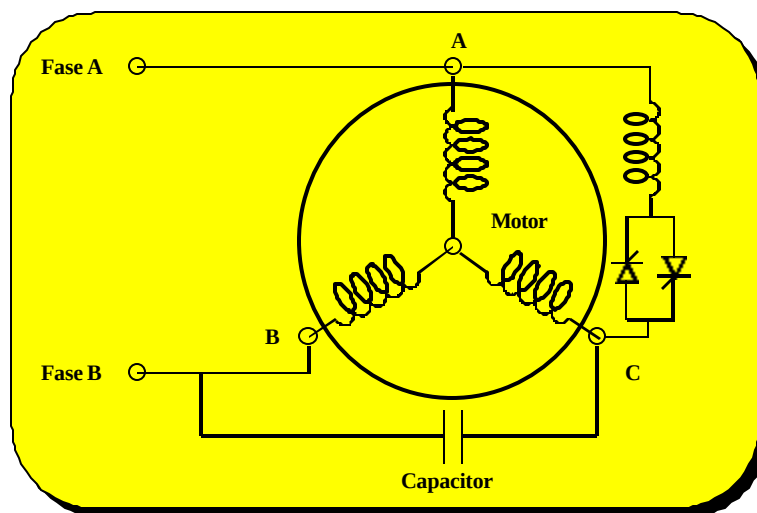


Figura 17 - Conversor estático eletrônico – indutor variável

6.4.2 CONVERSORES ESTÁTICOS ELETRÔNICOS - TOPOLOGIA SIMPLIFICADA

Nos conversores eletrônicos comerciais mencionados no item 6.2.3 descreveu-se a estrutura de conversão do sistema monofásico em trifásico; nas Figura 18 e Figura 19 são mostrados dois circuitos semelhantes, que apenas geram a fase faltante para compor o sistema trifásico em tensão e frequência fixa [14].

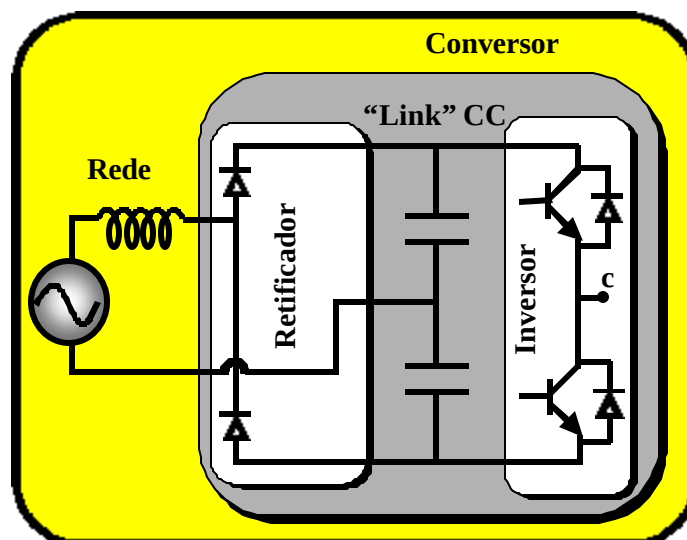


Figura 18 - Conversor estático eletrônico - topologia simplificada

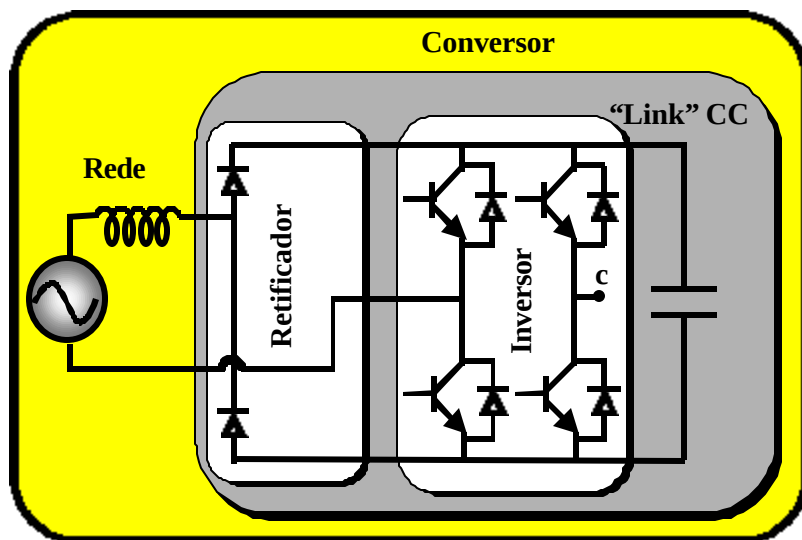


Figura 19 - Conversor estático eletrônico - topologia simplificada

Essas topologias reduzem a quantidade de dispositivos semicondutores e a necessidade da utilização de microcontroladores, pois a lógica de controle destes circuitos é simples.

A técnica de controle PWM (Modulação por Largura de Pulso) é usada para garantir uma alta qualidade na forma de onda da saída do conversor, eliminando os harmônicos de baixa ordem.

No esquema da Figura 18 as chaves eletrônicas são submetidas ao dobro da tensão de pico do sistema monofásico e a razão VA dos capacitores do "link" CC é alta. Isso não ocorre no esquema da Figura 19.

As características das topologias das Figura 18 e Figura 19 são mostradas na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Características dos conversores estáticos eletrônicos - topologia simplificada [14]

Características	Topologia da Figura 18	Topologia da Figura 19
Numero de dispositivos	Diodos – 2 Chaves – 2	Diodos – 2 Chaves – 4
Tensão nas chaves	2,82 pu	1,41 pu
Filtro capacitivo	2	1

Existem topologias onde o estágio de retificação possui dispositivos semicondutores controláveis, como os encontrados no inversor, permitindo a filtragem da corrente e o controle do fator de potência da rede monofásica [16, 17, 18, 20, 22, 24].

6.4.3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO

No Brasil, pesquisadores da Universidade Federal de Uberlândia desenvolveram um protótipo de motor de indução assimétrico alimentado por sistema monofásico [10]. O motor apresenta as mesmas características construtivas de um motor de indução de rotor

gaiola, sendo que, seus enrolamentos de estator possuem diferentes número de espiras.

Na Figura 20 é apresentado o esquema de ligação deste motor a uma rede monofásica. É utilizado um capacitor entre uma das fases e o terceiro terminal de alimentação da máquina para aumentar o conjugado de partida e melhorar o funcionamento em regime permanente.

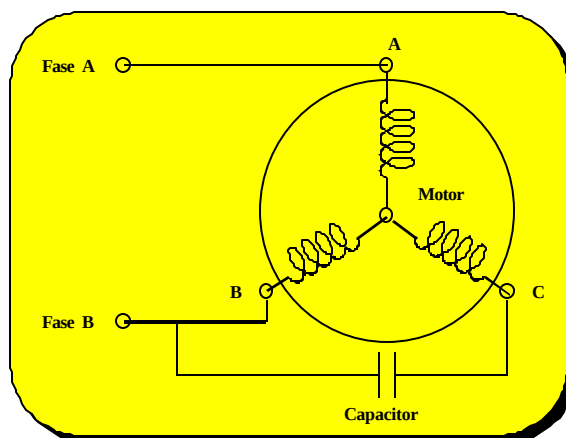


Figura 20 - Motor de indução trifásico assimétrico

O motor é projetado para operar nas condições nominais, ou seja, a plena carga. Segundo o autor de [10], o custo final da utilização do motor de indução trifásico assimétrico encontra-se entre os custos dos motores trifásicos e um suposto monofásico de mesma potência.

6.5 IRRIGAÇÃO

Em geral, o sistema monofásico atende plenamente as necessidades dos equipamentos eletrorurais, pois grande parte das máquinas elétricas usadas em atividades desenvolvidas no meio rural são de potências abaixo de 10 CV [7], podendo-se citar picadeiras, desintegradores, misturadores, ordenhadeiras e resfriadores, entre outros[2].

Por outro lado, existem algumas atividades desenvolvidas no meio rural onde o sistema monofásico poderia atender, mas a aplicação é limitada pelo maior motor monofásico padrão fabricado no Brasil. É o caso da atividade de irrigação, onde o motor monofásico de 12,5 CV pode não atender as necessidades da área a ser irrigada. No entanto, para esse caso, algumas soluções particulares são encontradas, tais como:

- Utilização de um número maior de motores monofásicos de menor potência.
- Utilização de motores especiais, como, por exemplo o motor de pólo escrito "*written-pole motor*" (vide item 6.5.2).
- Utilização de conversores estáticos eletrônicos.

6.5.1 MOTORES MONOFÁSICOS

No Brasil, em particular no estado de Minas Gerais e na área de concessão da CEMIG, os

consumidores rurais com potência instalada de até 37,5kVA são atendidos com sistema monofásico em 93% dos casos e apenas 7% são atendidos com sistema trifásico [3 , 7].

No caso da CEMIG, são tomadas soluções práticas para tornar a atividade de irrigação viável em sistemas monofásicos, como:

- A simples utilização de um número maior de motores.
- O acoplamento de motores através de correias.
- A utilização de motores conectados mecanicamente eixo a eixo. Essa formação foi experimentada na Unidade de Demonstração instalada na Fazenda Olhos D'água, de propriedade do produtor Dinorestes Evangelista da Silva, localizada no município de Centralina, por um período de 7 anos [7].

6.5.2 MOTORES ESPECIAIS

No início da década 80, a Precise Power Corporation desenvolveu a tecnologia chamada "written pole" (pólo escrito) para reduzir a necessidade de altas correntes de partida em motores monofásicos.

De acordo com o fabricante, o motor não requer correção de fator de potência e apresenta alta eficiência, quando comparado a motores padrão. Esses motores apresentam alto custo de aquisição (cerca de US\$400,00 por CV) quando comparados aos motores trifásicos.

Para aplicação em irrigação, as potências disponíveis são 20, 30, 40, 50 e 60 CV. Alguns modelos destes motores encontram-se em testes no Brasil, em bancada no CEPEL e em campo pela CEMIG.

6.5.3 CONVERSORES ESTÁTICOS ELETRÔNICOS

No controle de escoamento em tubulações, é usual a utilização de válvulas reguladoras de pressão. A utilização dessas válvulas acarreta adicionar perdas no circuito hidráulico, ou seja, do ponto de vista energético, uma válvula não é a forma eficiente de controle [5 , 11].

Estudos mostram que a utilização de conversores eletrônicos para o controle da velocidade de bombas resulta em significativa economia de energia [5 , 11]. Para esse tipo de aplicação, a economia no consumo de energia durante o tempo de vida do conjunto conversor/motor propicia um retorno parcial ou total do investimento para sua implantação.

Junto com a economia de energia, o conjunto conversor/motor proporciona uma partida suave do motor trifásico, reduzindo as quedas de tensão nas redes de alimentação.

Na eletrificação rural, existem outras variáveis envolvidas que podem determinar ou não a utilização dos conversores. Isso será visto no item a seguir.

7. VIABILIDADE ECONÔMICA DE APLICAÇÃO DOS CONVERSORES

Para a análise da viabilidade econômica de aplicação dos conversores escolheu-se dois

casos para estudo. No primeiro, a potência de acionamento requerida pode ser atendida por um único motor monofásico disponível no mercado; No segundo, tem-se aplicações onde um único motor monofásico de maior potência não é suficiente para atender a carga, como é o caso da irrigação.

Nesse estudo, optou-se por correlacionar os custos em função do comprimento da linha de distribuição, visto que, os custos das ligações no sistema trifásico tornam-se maiores quanto maior o comprimento da rede de distribuição primária. A seguir apresentam-se os parâmetros que serão utilizados na análise:

- Custo da rede primária (monofásica e trifásica).
- Custo do posto de transformação (monofásico e trifásico).
- Custo da entrada de serviço (monofásica e trifásica).
- Custo dos motores (monofásico e trifásico).
- Custo da chave de partida dos motores (monofásico ou trifásico).
- Custo do conversor.
- Número médio de horas de funcionamento do motor/ano.
- Tarifa média de fornecimento para a classe rural.
- Diferença de eficiência dos motores (monofásico x trifásico).
- Tempo de vida útil dos equipamentos.
- Taxa de desconto.

7.1 PRIMEIRO CASO

No primeiro caso, um motor de 7,5CV é a carga a ser atendida e os sistemas são os seguintes:

- Sistema trifásico com motor trifásico.
- Sistema monofásico com motor monofásico.
- Sistema monofásico com conversor estático a capacitor e motor trifásico.
- Sistema monofásico com conversor estático a autotransformador e motor trifásico.
- Sistema monofásico com conversor estático eletrônico e motor trifásico.
- Sistema monofásico com conversor rotativo e motor trifásico.

7.1.1 CONSIDERAÇÕES

1. Funcionamento do motor durante 730 horas em 1 ano.
2. Tarifa média anual para consumidores rurais (sudeste) de R\$100,44 MWh, sem impostos (Aneel, 2001).
3. Horizonte de planejamento igual ao tempo de vida útil dos equipamentos, que foi assumido igual a 15 anos [11].
4. Diferença de eficiência de 8,5% entre o sistema monofásico com motor monofásico e o sistema trifásico com motor trifásico [33 ,34].
5. Diferença de eficiência de 3,0% entre o sistema monofásico com conversores e motor trifásico e o sistema trifásico com motor trifásico [33 ,34].
6. A diferença de eficiência foi somada ao custo do sistema monofásico com motor monofásico e o sistema monofásico com conversores e motor trifásico, como determinado a seguir:
 - Valor economizado = n^o de horas / ano x diferença de eficiência [kWh] x tarifa.
 - Taxa de desconto de 6%.
 - Perdas = Valor Presente Líquido (VPL).

7.1.2 OBSERVAÇÕES

A eficiência adotada para os conversores, de forma global, foi extraída dos manuais dos conversores estáticos eletrônicos e que em média é de 97%.

Nos custos dos sistemas monofásico com motor monofásico e trifásico com motor trifásico foi incluído o custo da chave de partida do motor, pois este dispositivo está incluso nos conversores.

O aumento da tarifa durante o período de planejamento não foi considerado.

O preço do conversor eletrônico cotado foi o de potência trifásica, pois não existe modelo com entrada monofásica para essa potência de acionamento. Observando-se o descrito no item 6.2.3b), o preço usado para o primeiro caso é o de potência trifásica de 15CV (sem impostos).

O preço do dólar comercial, utilizado para conversão dos preços dos conversores cotados nessa moeda, foi o do dia 01/01/2001 (1US\$ = 1,951R\$).

Os impostos não estão inclusos para os modelos dos conversores, os quais os fabricantes identificados são de outras nacionalidades.

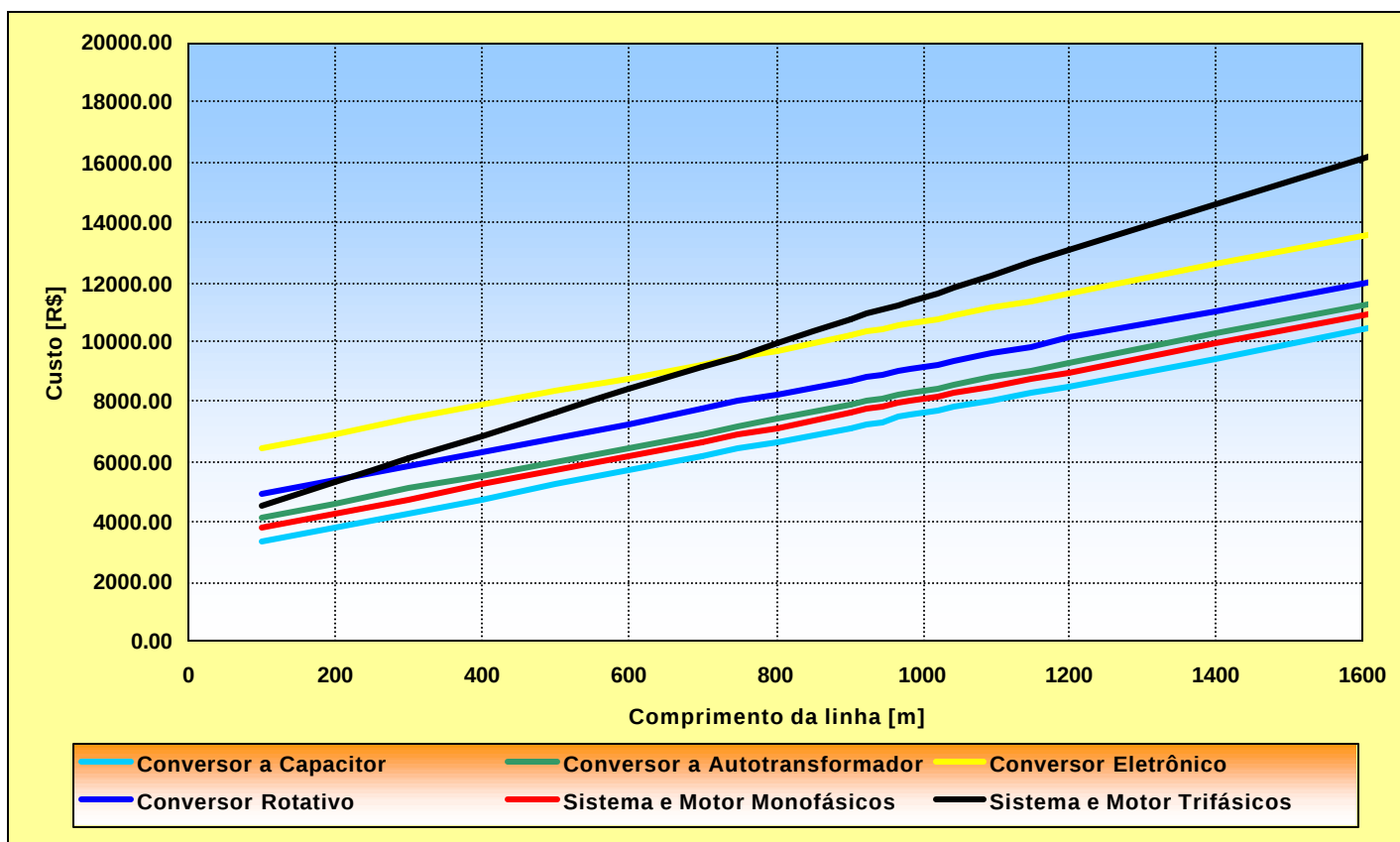


Figura 21 – Custos para o motor de 7,5 CV

Como pode-se observar na Figura 21, o sistema trifásico só se apresenta como melhor alternativa quando comparado ao conversor eletrônico para comprimento das linhas inferior a 800m, aproximadamente.

Observa-se também que, o conversor estático a capacitor é a melhor opção apresentada do ponto de vista econômico, porém, deve-se analisar as características técnicas descritas no itens 6.2.1a) e 6.2.1b).

Para o primeiro caso, onde encontram-se aplicações que o sistema monofásico atende plenamente às necessidades dos equipamentos eletorrurais, a utilização da maioria dos conversores comerciais com motores trifásicos não é justificável economicamente na substituição dos motores monofásicos.

Na Tabela 9 mostra-se percentual da redução de custos dos conversores para tornar-se um alternativa viável quando comparado ao sistema monofásico com motor monofásico.

Tabela 9 – Necessidade de redução dos custos dos conversores

Conversor	Redução no custo [%]
Autotransformador	18
Eletrônico*	65
Rotativo	44
* A fabricação deste tipo de conversor com entrada monofásica já reduzirá seus custos.	

Como observa-se desta tabela, os conversores eletrônicos são os que apresentam maior necessidade de redução de seus custos. Porém, como mostrado no item 6.4 , a flexibilidade construtiva desses conversores indica um maior potencial para redução de seus custos.

7.2 SEGUNDO CASO

No segundo caso, um motor de 20CV é a carga a ser atendida e os sistemas são os seguintes:

- Sistema trifásico com motor trifásico.
- Sistema monofásico com motores monofásicos.
- Sistema monofásico com conversor estático a capacitor e motor trifásico.
- Sistema monofásico com conversor estático a autotransformador e motor trifásico.
- Sistema monofásico com conversor estático eletrônico e motor trifásico.
- Sistema monofásico com conversor rotativo e motor trifásico.
- Sistema monofásico com motor de pólo escrito.

7.2.1 CONSIDERAÇÕES

1. Funcionamento do motor durante 3650 horas em 1 ano.
2. Tarifa média anual para consumidores rurais (sudeste) de R\$100,44 MWh, sem ICMS (Aneel, 2001).
3. Horizonte de planejamento igual ao tempo de vida útil dos equipamentos (15 anos) [11].
4. Diferença de eficiência de 13,0% entre o sistema monofásico com motor monofásico e o sistema trifásico com motor trifásico [33 ,34].
5. Diferença de eficiência de 3,0% entre o sistema monofásico com conversores e motor trifásico e o sistema trifásico com motor trifásico [33 ,34].
6. A diferença de eficiência foi somada ao custo do sistema monofásico com motor monofásico e o sistema monofásico com conversores e motor trifásico, como determinado a seguir:
 - Valor economizado = n^o de horas / ano x diferença de eficiência [kWh] x tarifa.
 - Taxa de desconto de 6%.
 - Perdas = Valor Presente Líquido (VPL).

7.2.2 OBSERVAÇÕES

Para este segundo caso o número de horas foi aumentado, pois na irrigação é comum um maior tempo de utilização das bombas para irrigar as áreas de plantio.

Outro fato a ressaltar é o aumento significativo do rendimento do motor trifásico para a potência de 20 CV quando comparado ao de 7,5 CV do primeiro caso.

O preço do conversor eletrônico cotado foi o de potência trifásica, pois não existe modelo com entrada monofásica para essa potência de acionamento. Observando-se o descrito no item 6.2.3b), o preço usado para o primeiro caso é o de potência trifásica de 40CV (sem impostos).

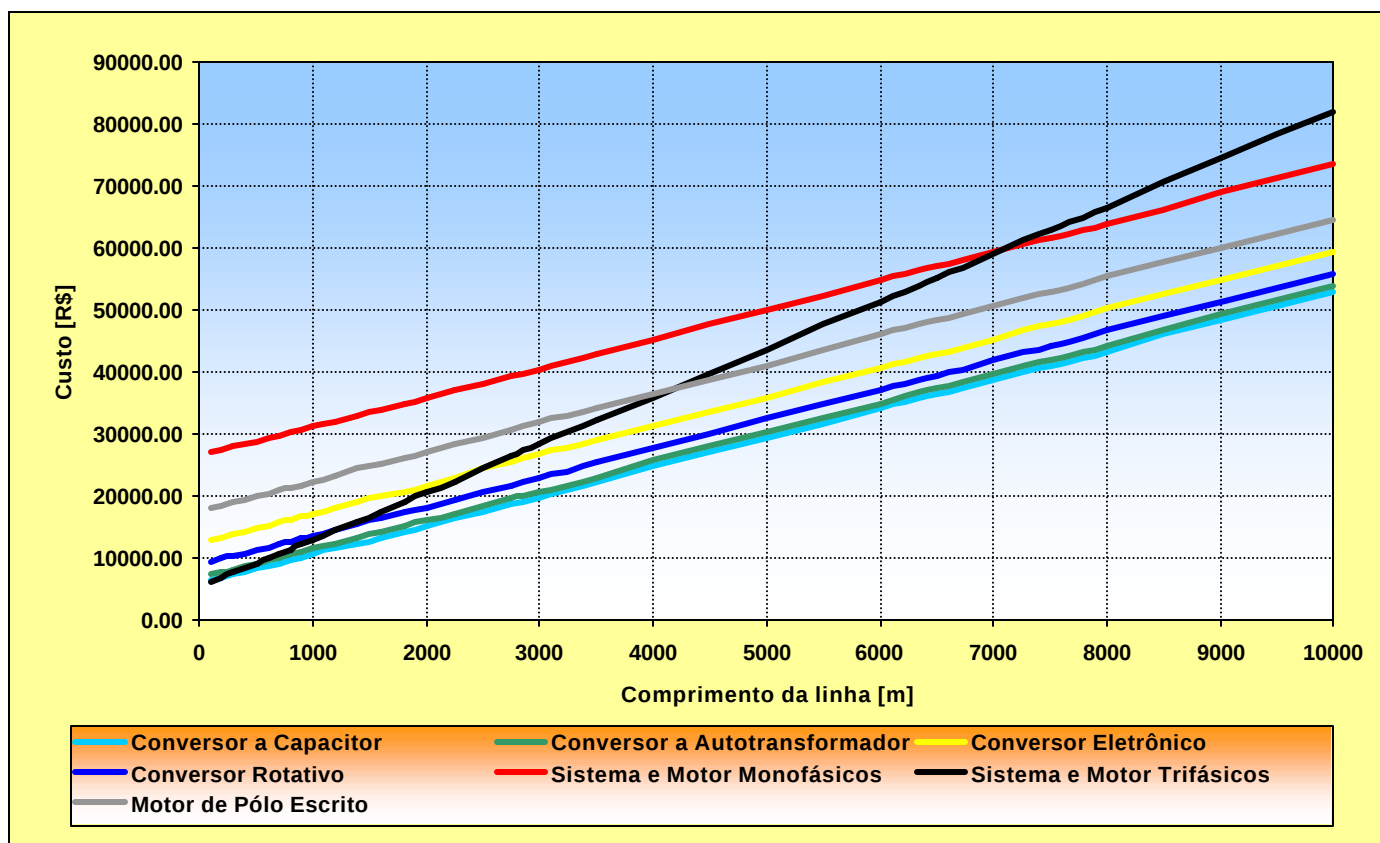


Figura 22 – Custos para motor de 20 CV

Como pode-se observar na Figura 22, o sistema monofásico não se apresenta sempre, como no caso anterior, como a melhor opção técnica econômica. Todos os conversores são viáveis economicamente a partir de comprimentos de linha de 2500 m, aproximadamente, quando comparado ao sistema trifásico com motor trifásico.

Observa-se também que, o motor de pólo escrito só se torna viável, quando comparado ao sistema e motor trifásicos, para grandes distâncias. Nesse caso, onde a potência do motor é de 20 CV, esse comprimento da linha fica acima de 4000 m.

8. CONCLUSÕES

- O desempenho do motor trifásico é sensivelmente melhor que seu similar monofásico, motivando a realização desse relatório. O preço e o rendimento dos motores trifásicos, em alguns casos, podem justificar a utilização dos conversores, como pode ser visto na Figura 2, Figura 21 e Figura 22.
- Deve-se ressaltar a importância de sistemas eficientes [2 , 8] nos dias atuais, em que a escassez de energia e o crescente preços das tarifas tornam esses sistemas cada vez mais vantajosos. Isso já pode ser constatado em algumas concessionárias, como por exemplo a CEMIG [5], que incentiva a utilização de conversores eletrônicos mediante pagamento de bônus para cada CV.
- Como foi visto no primeiro caso, o conversor estático a capacitor é uma opção economicamente viável, sendo indicado para acionamento de cargas que não requeiram alto conjugado de partida, tais como: trituradores, ventiladores, tornos, furadeiras, etc.
- Os custos dos conversores eletrônicos usados neste relatório, são referentes aos modelos trifásicos, que alimentados por sistema monofásico na entrada são capazes de acionar na sua saída um motor trifásico de uma dada potência, ou seja, um modelo de conversor trifásico de potência maior do que se deseja acionar, conseqüentemente, mais caro. Esses terão seus custos reduzidos quando projetados para entrada monofásica.
- Os resultados das pesquisas mostradas no item 6.4, indicam que para alternativas de baixo custo, devem ser discutidos e investigados os seguintes itens:
 - Faixa de potência que estes conversores atendem.
 - Dispositivos para partida dos motores.
 - Correção do fator de potência, se for o caso.
- Os custos dos conversores rotativos estão muito próximos dos custos dos conversores eletrônicos e sua eficiência, pelo fato de conversores rotativos possuírem partes rotativas, deve ser menor quando comparada a dos eletrônicos.
- A eficiência dos conversores eletrônicos pode aumentar como relação aos demais sistemas quando for necessária a regulação de vazão de um sistema de irrigação [5 , 11].
- Não foi observado neste trabalho a possibilidade da utilização de motores comerciais de alto

rendimento, o que levaria ao aumento da eficiência dos sistemas com este motor, porém seu custo é maior quando comparado ao motor padrão de mesma potência.

- Deve-se lembrar que, alguns conversores permitem acionar cargas de diferentes características simultaneamente, como é o caso dos conversores rotativos.

9. ESPECIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este trabalho não deve ser encarado como conclusivo, sendo os seguintes os próximos passos a serem dados:

1º - Conversor eletrônico simplificado - elaboração de projeto de conversores alimentado por rede monofásica para acionamento de motores até 12,5 CV, com redução do número de componentes atualmente utilizado nos conversores comerciais. A maioria dos equipamentos eletrorrurais necessitam de motores até esta potência.

2º - Conversor eletrônico comercial – elaboração de projeto de conversores alimentado por rede monofásica para acionamento de motores utilizados na irrigação com o objetivo de reduzir as perdas neste processo, tanto de energia quanto de água.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ELETROBRÁS – Estudo de Carga para Redes Monofilares com Retorno por Terra (MRT) – RER 03, 1986.
- 2 Salari, J.C.F., d Almeida, J. C. S., Moraes, L. S.- Estudos de Carga para Redes Elétricas Rurais - CEPEL - ADG-A/PER - 407/2001.
- 3 Salari, J.C.F., Alves, L. A.S. – Levantamento das Características dos Sistemas Elétricos Brasileiros de Distribuição Rural na Âmbito do Programa de Nacional de Eletrificação Rural "Luz no Campo" - CEPEL - ADG-A/PER - 323/2000.
- 4 Salari, J.C.F., d Almeida, J. C. S., Alves, L. A.S. – Sistema de Fases Empregados nas Redes de Distribuição Rural. CEPEL - ADG-A/PER - 409/2001.
- 5 Americo, M., et al. – Guia Operacional de Acionamentos Eletrônicos – CEPEL, Versão 1.0, 1998.
- 6 Oliveira, E. S. – A Experiência da CEMIG na Eletrificação Rural – 1º Seminário Energia na Agricultura, outubro 2000.
- 7 Coutinho, A. C. – Uso do Sistema Monofásico para Produção Agrícola Intensiva - 1º Seminário Energia na Agricultura, outubro 2000.

- 8 Gusmão, M.V.N. – Ações Tecnológicas de Apoio o PNER “ Luz no Campo” – 1º Seminário Energia na Agricultura, outubro 2000.
- 9 Ribeiro, F. S, et al. - Os Problemas do Superdimensionamento das Cargas Elétricas Rurais. 1º Seminário Energia na Agricultura, outubro 2000.
- 10 Mendonça, R. G., Neto, L.M. – Motor de Indução Assimétrico Uma Solução para o Uso de Cargas Tipicamente Trifásica na Zona Rural. 1º Seminário Energia na Agricultura, outubro 2000.
- 11 Campana, S., 2000 – Racionalização do Uso da Energia Elétrica em Sistema de Irrigação Tipos Pivô Central e Aspersão Convencional. Tese de M.Sc., UFV, Viçosa, MG, Brasil.
- 12 Sobrinho, E. S., et al. – Informe Brasil - XVII Conferência Latino Americana de Eletrificação Rural.
- 13 Vieira, X. F., et al. – Rural Electrification in Brazil and the “Luz no Campo” Program – VII Symposium of specialists in Electric Operational and Expansion Planning.
- 14 Enjeti, P, Rahman, A., Jakkli, R. – “Economic Single Phase to Three Phase Converter Topologies for Fixed Frequency Output”. CH2992-6/91/0000-0088 IEEE, 1991.
- 15 Pillay, P., Brzezinski, J. – “Induction Motor Performance when Fed from Single to Three Phase Converters. 90/CH 2935-5/90/0000-0045 IEEE, 1990.
- 16 Itoh, J., Fujita, K. – “Novel Unity Power Factor Circuits Using Zero-Vector Control for Single-phase Input Systems”. 0885-8993/00 IEEE, 2000.
- 17 Douglas, H., Malengret, - “Symmetrical PWM with a Slip-capacitor Single-phase to Three-phase Converter for Rural Electrification”. 0-7803-4756-0/98 IEEE, 1998.
- 18 Enjeti, P, Rahman, A. – “A New Single Phase to Three Phase Converter with Active Input Current Shaping for Low Cost AC Motor Drives”. 90/CH 2935-5/90/0000-0935 IEEE, 1990.
- 19 Kahn, S.I., Ziogas, P.D., Rashid, M.H. – “ A Novel Single- to Three-phase Converter”. 0093-9994/89/0100-0143 IEEE, 1989.
- 20 Covic, G.A., Peters, G.L. – “DC Link Imbalance Compensation in Four-switch Inverter AC Motor Drives”. Electronics Letters Vol. 33 IEEE, June 1997.

- 21 Marinus, S., Malengret, M. – “Using Passive Elements and Control to Implement Single-to Three- phase Conversion”. 0-7803-5546-6/99 IEEE, 1999.
- 22 Sander-Larsen, J., at al. – “Control of a Complete Digital-based Component-minimized Single-phase to Three-phase AC/DC/AC Converter”. 0-7803-4503-7/98 IEEE, 1998.
- 23 Tshivhilinge, E. N., Malengret, M. – “A Practical Control of a Cost Reduced Single Phase to Three Phase Converter”. 0-7803-4756-0/98 IEEE, 1998.
- 24 Peters, G.L., Covic, G.A., Boys, J.T. “ Eliminating Output Distortion in Four-switch Inverters with Three-phase Loads”. IEE Proc.- Electr. Power Appl, Vol. 145, 1998.
- 25 Malengret, M., Naldrett, G., Enslin, J. – “Applying Parks Transformation to a Single to Three Phase Converter”. 0-7803-2730-6/95 IEEE, 1995.
- 26 Kersting, W. H.. “Cause and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor”. IEEE.
- 27 Electram Rotary Equipment Ltd., julho 2001, <http://www.electram.com>.
- 28 GWM Corporation, julho 2001, <http://www.gwm4-3phase.com>.
- 29 Tower Electric Motor Company, julho 2001, <http://www.phaseconverter.com/>.
- 30 ABB, julho 2001, <http://www.abb.com/br>.
- 31 GE- GEVISA, julho 2001, <http://www.geindustrial.com.br/>.
- 32 Siemens, julho 2001, <http://www.siemens.com.br/ind/ind.html>.
- 33 Weg, julho 2001, <http://www.weg.com.br/>.
- 34 Yaskawa, julho 2001, <http://www.yaskawa.com.br/>.
- 35 CEMIG, agosto 2001, http://www.cemig.com.br/atendimento/programa_inversores.htm

APÊNDICE A LISTA DE CONVERSORES INSTALADOS

Tabela 10 – Lista de conversores instalados [1]

Cliente	Local	Tipo	Potência [CV]	Aplicação	Data de Instalação
Fazenda Oxalá	Magé/RJ	Adifase	7,5	Triturador	Fev/80
CERJ	Itaocara	Adifase	15	Serraria	Fev/80
Admin. Itahy	Angra dos Reis	Adifase	7,5	Guindaste	Mar/80
LIGHT	Paraíba do Sul	Adifase	5	Treinamento	Dez/82
London Realtors	São Paulo	Adifase	7,5	Triturador	Nov/79
Ernesto Bunge	São Paulo	Adifase	20	Diversos	Nov/77
José Horack	Salto Pirapora	Adifase	10	Triturador	Jan/79
Constr..Pinheiro Lima	São Paulo	Adifase	10	Poço Artesiano	Ago/79
Ferso 1	São Paulo	Adifase	5	Poço Artesiano	Ago/79
Pró-Domo Engenharia	Cotia/SP	Adifase	5	Bomba Submersa	Jun/79
Carlos A. Pereira	Cotia/SP	Adifase	10	Bomba Submersa	Jul/81
Cia Docas de Santos	Santos/SP	Adifase	20	Trem Transporte	Jun/80
Coop. Mogim-Mirim	Mogim-Mirim	Adifase	30	Diversos	Abr/77
Antônio Juarez M. Morade	Sorocaba	Adifase	7,5	Picadeira	Set/80
Aulus Santos Novaes	Betim/MG	Adifase	3/10	Bomba Submersa	Set/80
Agropecuária Sta Rita	Betim/MG	Adifase	15	Bomba Submersa	Jul/81
COPASA/MG	Barbacena	Adifase	3	Abast. Água	Set/80
Delpa Engenharia Mecânica	Barbacena	Adifase	15	Bomba Submersa	Set/80
Cia T. Janer	Belo Horizonte	Adifase	5 x 5 3 x 5 5 x 7,5	Bomba Submersa	Mai/78 Mar/79 Mai/80
ECESA	Bocaiúva	Adifase	5	Bomba Submersa	Out/80
Eletr Elco	Betim	Adifase	5	Bomba Submersa	Out/81
OPS – Mineração	Itaberrito	Adifase	5	Bomba Submersa	Out/79
Hidrotécnica	Betim	Adifase	5	Bomba Submersa	Mar/81
Granja Aveflor	Betim	Adifase	7,5	Bomba Submersa	Nov/79
Org. Agropecuária "AP"	Betim	Adifase	5	Bomba Submersa	Jan/79
Ilhadeus Lilas Viera	Alfenas	Adifase	10	Bomba Submersa	Mar/77
USIMINAS	Verparziano	Adifase	3 7,5	Bomba Submersa	Ago/78

Coop. Bom Despacho	B. Despacho	Adifase	5 7,5	Bomba Submersa	Mar/79
Mercantil Benef. Café	Campo Belo	Adifase	15	Benef. De Café	Mai/77
Ind. Pastoril São João	Campo Belo	Adifase	15	Triturador	Mai/77
José Vicente Nogueira	Campo Belo	Adifase	10	Bomba Submersa	Abr/77
Cel. Altino Machado	Gov. Valadares	Adifase	4	Bomba Submersa	Set/79
Coop. Rio Doce	Gov. Valadares	Adifase	7,5	Bomba Submersa	Dez/78
Pref. Municipal	Itabira	Adifase	5	Bomba Submersa	Jun/81
Jair Arthuso	S. D. Prata	Adifase	10	Picadeira	Nov/80
Fimibri-Lages e Premold.	Três Pontas	Adifase	5	Vib. Concreto	Jun/81
Eletro "ENC" Pavan	Uberaba	Adifase	5	Bomba Submersa	Jun/80
Subterrânea	Uberaba	Adifase	5 x 5	Bomba Submersa	Mar, Mai/80
Laticícios "MB"	Sta Rita Ibitipoca	Adifase	20	Bomba Leite, Pasteuriz.,etc	Set/83
Agromisa – Agropecuária	Bocaiúva	Adifase	4 x 10	Bomba Submersa	Set/83
Centro Fed. Educ. Tecnologia	Curitiba	Adifase	2	Didático	Jul/80
Arlindo Pizzol	Cascavel	Rotfase	25	Secador Granel	Jun/81
Zeno A. Sulzbacher	Cascavel	Adifase	10	Triturador	Mai/80
Copercal	Cascavel	Adifase	5	Bomba Submersa	Ago/80
Antônio Kucinski	Cascavel	Rotfase	25	Secador Granel	Jul/81
Gralha Azul	Franc. Beltrão	Adifase	7,5	Bomba Submersa	Abr/80
A Eletrônica	Foz Iguaçu	Adifase	10	Triturador	Nov/77
Comercial Téc. Elétrica	Paranavaí	Adifase	5 10	Triturador	Jun/77
Magril Com. Máquinas	Paranavaí	Adifase	12,5	Bomba Submersa	Ago/79
Sopel Soc. Paranaense	Paranavaí	Adifase	5 10	Triturador	Jan/79
CERPA – Coop. Eletrif. Rural	Palotina	Adifase	5 10	Triturador	Jun/77
Thiago Rodrigues Pinto	Planaltina	Adifase	7,5	Triturador	Jun/77
CERBAP – Coop. Eletrif. Rural	Pato Branco	Adifase	10	Triturador	Jun/81
Dalyo Moyses	Palm. Missões	Adifase	10	Triturador	Nov/78
José Machado Martins	Palm. Missões	Adifase	4,5	Bomba Submersa	Mai/80
Prefeitura do Município de Giruá	Giruá	Adifase	7,5	Bomba Submersa	Ago/79
Frigorífico Ideal	S. Correa	Adifase	5	Bomba Submersa	Ago/80

Kurtz & Kochann	T. de Maio	Adifase	5 10	Bomba Submersa	Set/79
Prefeitura Município Sto Agostinho	Sto Agostinho	Adifase	5	Bomba Submersa	Jul/80
Univ. Fed. Sta Maria	Santa Maria	Adifase	7,5	Bomba Submersa	Mar/79
Clementino P. Carneiro	Nerópolis	Adifase	10	Irrigação	Mar/79
José Amaro de Souza	Nerópolis	Adifase	35	Irrigação	Mar/79
Kamal Hmide	Nerópolis	Adifase	30	Irrigação	Out/80
Coop. Eletrif. Rural	Alexania	Adifase	7,5	Bomba Submersa	Set/80
Fazenda Sta Bárbara	Goiatuba	Adifase	20	Benef. Café	Set/83
Fazenda Rancho Alegre	Goiatuba	Adifase	20	Benef. Café	Set/83
Dr. Helvio A. Passos	Brasília	Adifase	4,5 7,5 3	Ordenha Refrig. Leite Bomba D'água	Nov/79
Instituto A. M. Chagas	Brasília	Adifase	7,5	Picadeira	Mai/80
CEMAR	São Luís	Adifase	5	Treinamento	Set/81
CEPISA	Teresina	Adifase	5	Treinamento	Set/81
Ministério da Saúde	Aracaju	Adifase	5	Bomba Submersa	Jul/79
Motomaq.	Manaus/AM	Adifase	5	Bomba Submersa	Ago/79

APÊNDICE B CUSTOS DOS SISTEMAS

Tabela 11 – Custos dos sistemas [27 , 28 , 29 , 33 , 34]

Equipamento	Preço R\$	Preço U\$	IGPM	R\$ / U\$	Preços em 01/01/2001
Rede de distribuição trifásica 13,8 kV 4 CAA (km)	6523,00	-	1,1826	-	7714,10
Rede de distribuição monofásica 13,8 kV 4 CAA (km)	3995,00	-	1,1826	-	4724,49
Posto de transformação trifásico 13,8 kV - 45 kVA	3027,00	-	1,1826	-	3579,73
Posto de transformação trifásico 13,8 kV - 30 kVA	2562,00	-	1,1826	-	3029,82
Posto de transformação monofásico 13,8 kV - 37,5 kVA	1981,00	-	1,1826	-	2342,73
Posto de transformação monofásico 13,8 kV - 10 kVA	1378,00	-	1,1826	-	1629,62
Entrada de serviço monofásica de 70 A	273,00	-	1,1826	-	322,85
Entrada de serviço trifásica de 70 A	301,00	-	1,1826	-	355,96
Entrada de serviço trifásica de 100 A	453,00	-	1,1826	-	535,72
Motor trifásico de 7,5 CV	353,00	-	1,0000	-	353,00
Motor trifásico de 20 CV	872,53	-	1,0000	-	872,53
Motor polo inscrito de 20 CV	-	8000	-	1,951	15608,00
Motor monofásico de 7,5 CV	768,00	-	1,0000	-	768,00
Chave de partida p/motor monofásico 7,5 CV	75,00	-	1,0000	-	75,00
Chave de partida p/motor trifásico 7,5 CV	55,00	-	1,0000	-	55,00
Chave de partida p/motor trifásico 20 CV	120,00	-	1,0000	-	120,00
Conversor com capacitor p/ motor de 7,5 CV	-	210,00	-	1,951	409,71
Conversor com autotransformador p/motor de 7,5 CV	-	614,00	-	1,951	1197,91
Conversor eletrônico p/motor de 7,5 CV	-	1802,29	-	1,951	3516,27
Conversor rotativo p/motor de 7,5 CV	-	1015,00	-	1,951	1980,27
Conversor com capacitor p/ motor de 20 CV	-	597,00	-	1,951	1164,75
Conversor com autotransformador p/motor de 20 CV	-	1070,00	-	1,951	2087,57
Conversor eletrônico p/motor de 20 CV	-	4004,34	-	1,951	7812,47
Conversor rotativo p/motor de 20 CV	-	2165,00	-	1,951	4223,92
Preços das redes e postos de transformação (ESCELSA) referidos a set/99 atualizados pelo IGPM até 01/janeiro/2001.					
Valores em dólares convertidos para reais em 01/01/2001.					