Prof. Dr. Eng. Hermínio Duarte-Ramos
Grupo de Engenharia Sistémica (DEE/FCT/UNL)

Rectificação Trifásica em Ponte

1. Circuito trifásico em ponte

A rectificação trifásica em ponte (Fig. 1a) representa o esquema mais usado na electrónica de potência, mercê das suas esplêndidas vantagens relativamente aos outros circuitos.

No caso normal, o secundário está ligado em estrela. No entanto, convém distinguir quando o primário se liga em estrela e em trigângulo.

2. Carga do rectificador

A tensão u de saída do rectificador é igual à diferença das tensões de duas fases pois há sempre uma válvula a conduzir do grupo de diodos I, II, III e outra válvula do grupo I', II', III', ambos conduzindo correntes em fases distintas. Esta propriedade deve-se ao facto de serem opostas as ligações dos dois grupos de diodos relativamente a cada fase, pois o secundário liga-se aos ánodos de um grupo e aos cátodos do outro grupo de diodos. Assim, as válvulas de um e do outro grupo conduzem ou bloqueiam com polaridades contrárias (Fig. 1b): os diodos do grupo I, II, III conduzem nas alternâncias positivas e os do grupo I', II', III' conduzem nas alternâncias negativas das respectivas tensões aplicadas pelo secundário do transformador; além disso, dentro de cada grupo de diodos só conduz aquele que estiver sujeito à tensão de maior amplitude.

Deste mecanismo de funcionamento resulta que a tensão de saída corresponde à sobreposição de duas rectificações trifásicas de via simples (Fig. 1b), donde se obtém menor ondulação, porquanto a forma de onda tem o dobro das pulsações verificadas na rectificação trifásica de via simples (identificando-se com a forma de onda da rectificação hexafásica de via simples, mas cujas amplitudes são diferentes).

Nestas circustâncias, o valor médio da tensão em vazio apresenta-se duplo do valor no circuito trifásico de ponto médio (Fig. 1d)

$$U_{di0} = 2.1,17U_2 = 2,34U_2$$

o que dá lugar na carga a uma corrente média ideal também dupla, visto que $I_d = U_{di0}/R$ (Fig. 1d).

As usurpações, porém, são seis por período (Fig. 1n), três referente a um grupo de diodos (que só comutam entre si) e outras três no outro grupo (igualmente com comutação independente dos diodos do restante grupo). Assim, o decréscimo indutivo da tensão contínua será

$$D_X = 2.3fL_kI_d = 6fL_kI_d$$

tal como num sistema de rectificação hexafásico de via simples.

VI SEPOPE

O 6.º Simpósio de Especialistas em Planeamento Operacioanal e Expansão Eléctrica realiza-se nos dias 24 a 29 de Março de 1998, em Salvador da Baía, no Brasil. O objectivo das Comissões Técnica e de Organização do VI SEPOPE consiste em proporcionar a oportunidade dos especialistas de planeamento operacional e expansão eléctrica para que melhorem o seu conhecimento, ajudando-os assim a enfrentar os desafios levantados pelas novas características de reestruturação do sector eléctrico.

Para isso, serão expostas várias contribuições dos peritos de maior reconhecimento mundial, tendo em consideração as respectivas experiências e visões do desenvolvimento, sobretudo quanto à implementação e gestão dos novos modelos do sector eléctrico. Contam-se mais de duas centenas de comunicações escritas, cobrindo aspectos tecnológicos, económicos e comerciais.

Entre os especialistas presentes referem-se profissionais de empresas e universidades americanas, canadianas, chilenas, brasileiras, inglesas, francesas, italianas, holandesas, dinamarquesas, suecas e portuguesas (nomeadamente do INESC).

Nos dias 21 e 23 de Março decorrem dois cursos de curta duração. O primeiro sobre aplicações da teoria económica à análise de sistemas de energia eléctrica. O segundo acerca da utilização eficiente desses sistemas. Ambos os cursos são limitados a 50 participantes e custam 500 dólares americanos para membros da CIGRÉ (600 dólares para não-membros).

A inscrição no Simpósio tem os mesmos custos dos cursos. O local será o Hotel Bahia Othon Palace. Para mais informações: http//www. provider. com. br/sepope (ou o contacto: evanise @ found. cepel. br).

Para aguçar o apetite transcrevem-se a seguir alguns pormenores culturais e turísticos da cidade Salvador, onde cheira bem a cultura e a influência dos portugueses doutros tempos. □

Centro Histórico

Considerado o maior conjunto arquitectónico colonial da América Latina, o centro Histórico de Salvador reúne prédios que datam dos séculos XVI, XVII e XVIII. A expressão maior desse conjunto arquitectónico está no Pelourinho, que hoje revive os seus momentos de glória e apogeu de outrora, quando ali residia a casta da sociedade brasileira: os senhores de engenhos, os coronéis e os barões.

Com mais de 500 imóveis, totalmente restaurados, o Pelourinho de grandes ruínas transformou-se numa grande relíquia histórica, que transporta os visitantes a um passado de grande riqueza e fartura.

Tombada pelo Património Histórico da Unesco, em 1985, como Património da Humanidade, o Pelourinho sofreu, também nesse último governo, uma marcante transformação sócio-económica.

Através das suas ruelas e calçadas estreitas descortina-se uma série de lojas que comercializam artesanato, pedras preciosas, galerias de arte, hotéis, restaurantes e bares.

Hoje, ponto alto do turismo de Salvador, o Pelourinho tem também uma programação musical riquíssima, desenvolvida todas as noites. Nesse clima de muito axé, tudo isso é envolvido no cheiro inebriante do acarajé, ao som dos atabaques, dos ritmos afro e caribenhos.

Quem resiste a tamanho frenezim? Quem pode ficar indiferente a tanto encanto? Que o SEPOPE de 1998 proprociona em Salvador da Baía. □

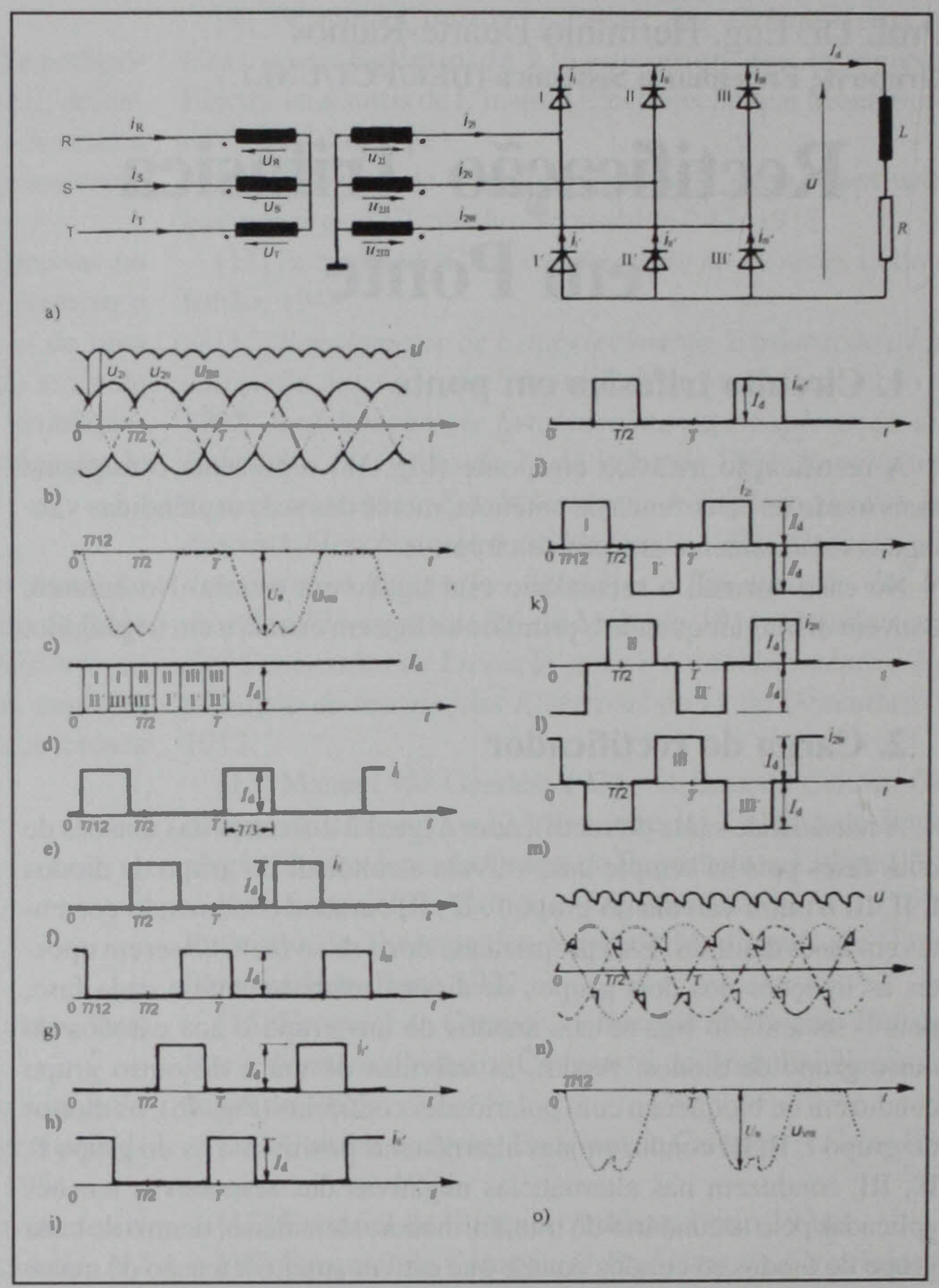

Fig. 1 - Circutio de rectificação trifásica em ponte com transformador YY.

a) Esquema eléctrico.
b) Tensões secundárias e tensão de saída.
c) Tensão num diodo sem usurpação.
d) Corrente contínua na carga.
e) Corrente na diodo I.
f) Corrente no diodo II.
g) Corrente no diodo III.
h) Corrente no diodo I´.
i) Corrente no diodo II´.
j) Corrente no diodo III´.
k) Corrente na fase I do secundário.
l) Corrente na fase II do secundário.
m) Corrente na fase III do secundário.
n) Usurpações.
o) Tensão num diodo com usurpação.

3. Diodo de rectificação

A tensão inversa dos diodos (Fig. 1c) determina uma tensão de bloqueio

$$U_B = \sqrt{3}\hat{U}_2$$

ou então será menor se a duração de comutação for longa (Fig. 1o).

A corrente em cada diodo (Fig. 1e, f, g, h, i, j), como é óbvio, tem o valor médio $I_d/3$.

4. Secundário do transformador

Com $U_{di0} = 2{,}34U_2$, o valor eficaz da tensão por perna do secundário (ou fase, dada a ligação do secundário em estrela) tem o valor

$$U_2 = \frac{U_{di0}}{2{,}34} = 0{,}428U_{di0}$$

Nas pernas do secundário do transformador passam as correntes dos diodos em condução ao longo de cada período da tensão aplicada (Fig. 1k, l, m). Repare-se que as correntes de um grupo de diodos percorrem as bobinas do secundário num sentido e as correntes do outro grupo percorrem as bobinas das mesmas fases em sentido oposto. Resulta daí que a corrente em cada perna do sencundário é alternada (não sinusoidal, mas mais próxima desta forma de onda que no circuito trifásico de ponto médio), evidentemente desfasada de $2\pi/3$ rad entre as três fases.

Assim, o valor eficaz da corrente secundária vem

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d = 0{,}817I_d$$

A pontência aparente do secundário $S_2 = 3U_2I_2$ terá o valor

$$S_2 = 3.0{,}428U_{di0}.0{,}817I_d = 1{,}05P_d$$

que é apenas 5% superior à potência da carga P_d.

5. Primário do transformador estrela-estrela

Com o primário em estrela, as correntes nas pernas do primário são iguais às respectivas correntes nas fases da linha de alimentação.

Já se sabe qual o comportamento do transformador quando uma perna do secundário é percorrido pela corrente I_d. Em consequência do efeito de ponte, uma perna do secundário é agora percorrida pela corrente I_d num dado sentido durante $T/3$ e pela mesma intensidade em sentido contrário durante igual intervalo de tempo, após $T/6$. A corrente numa perna do primário obtém-se pela sobreposição destas correntes nas três fases do secundário (Fig. 2).

Conclui-se, assim, que a corrente no primário tem a mesma forma de onda que no secundário.

Na hipótese $n_1 = n_2$ as amplitudes mantém-se iguais a I_d no primário e portanto o valor eficaz da corrente primária iguala o valor eficaz da corrente, $I'_1 = I_2$. Sendo $n_1 \neq n_2$ obtém-se

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} I_2$$

e por conseguinte

$$S_1 = S_2 = 1.05P_d$$

conforme se calculou atrás.

Cultura Baiana

Capital cultural do Brasil, Salvador destaca-se das demais pela sua grande fertilidade nas mais diversas manifestações culturais. A sua capacidade de criação é algo admirável, principalmente na música. Em cada dia surge um ritmo diferente e com novas revelações no canto e na composição. Enumerar todos os expoentes é uma tarefa difícil, dada a renovação constante de valores. Mas, no momento merecem destaque Daniela Mercury, com o seu axé music, Carlinhos Brown, com a timbalada, Edson Gomes, com o samba reggae e tantos outros. Isso, sem deixar de falar nos nacionalmente conhecidos Dorival Caymmi, Caetano Veloso, Gilberto Gil, Raul Seixas, Gal Costa, Maria Bethânia, Margareth Menezes, Ivete Sangalo e Simone Moreno.

Na literatura, brilham, até hoje, os imortais Jorge Amado (um dos escritores mais traduzidos em todo o mundo) e João Ubaldo Ribeiro, sem esquecer a poesia inigualável de Castro Alves, o Poeta dos Escravos. Mas, entre as maiores estrelas da literatura, Ruy Barbosa merece destaque especial por ser notável, não apenas como escritor, mas também como jurista.

No cinema o grande expoente é Glauber Rocha, que projectou Salvador e o Brasil no cenário mundial. Já nas artes plásticas, os grandes destaques são Calazans Neto, Mário Cravo, Carlos Bastos, Floriano Teixeira e Tetti Moreno. □

Praias de Salvador

Se o Brasil foi a terra abençoada por Deus, a Bahia com certeza é a mais privilegiada pela dádiva do criador. Além de lhe dar uma conformação topográfica bastante acidentada, onde o alto e o baixo propocionam uma movimentação de cenários dos mais belos, também lhe presenteou com uma das mais lindas orlas do país. As suas praias de águas mornas durante todo ano são um convite irresistivel para um banho de mar a qualquer momento.

Não bastasse todo esse esplendor da cor mais morena do país, com seus contornos esculturais e suas passadas sensuais recebe-se o ingrediente mais apetecível para deixar entusiasmo até o mais tímido dos mortais.

As opções de praias são várias, tanto no interior da Baía de Todos os Santos quanto em mar aberto. Mas a grande coqueluche do momento situa-se nas praias que ficam na Linha Verde. São praias paradisíacas, que só agora começam a ser exploradas para fins turísticos. Algumas ainda são quase virgens, onde a tranquilidade e a paz vivem em comunhão constantes.

Misturar a pacificação destas praias com a reflexão da operacionalidade do sector eléctrico, em grande mutação nesta ocasião, provocará certamente motivos de encontro dos melhores pensamentos. Estão de parabéns os patrocionadores do 6.º SEPOPE: Comissão Nacional brasileira da CIGRÉ, Centrais Eléctricas Brasileiras Eléctricas, Companhia de Electricidade do Estado da Bahia COELBA e o IEEE. □

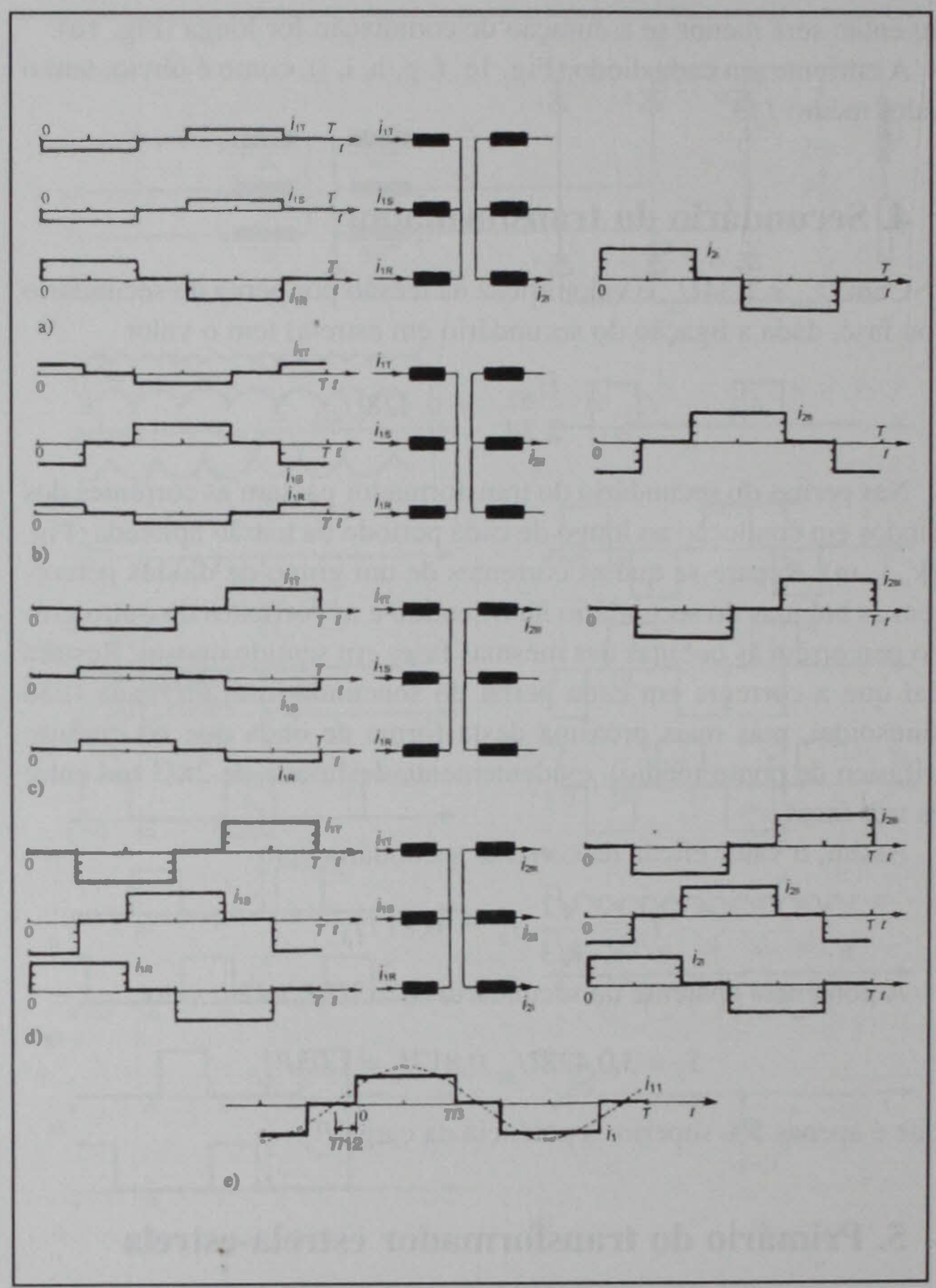

Fig. 2 - Correntes no primário e no secundário de um fransformador estrela-estrela de rectificação trifásica em ponte (hipótese $n_1 = n_2$).

A potência tipo do transformador resulta

$$S_T = 1{,}05P_d$$

somente 5% superior à potência da carga, porque as formas de onda das correntes no primário e no secundário são bastante aproximadas da sinusoide.

6. Primário do transformador triângulo-estrela

A potência secundária do transformador triângulo-estrela (Fig. 3a) mantém-se, obviamente, igual a $S_2 = 1{,}05P_d$. Já não é tão evidente que a potência do primário se mantenha, pois a corrente na linha de alimentação não será a mesma.

O cálculo pode ser feito pela análise dos circuitos magnéticos do transformador, tal como se procedeu no esquema trifásico de ponto médio.

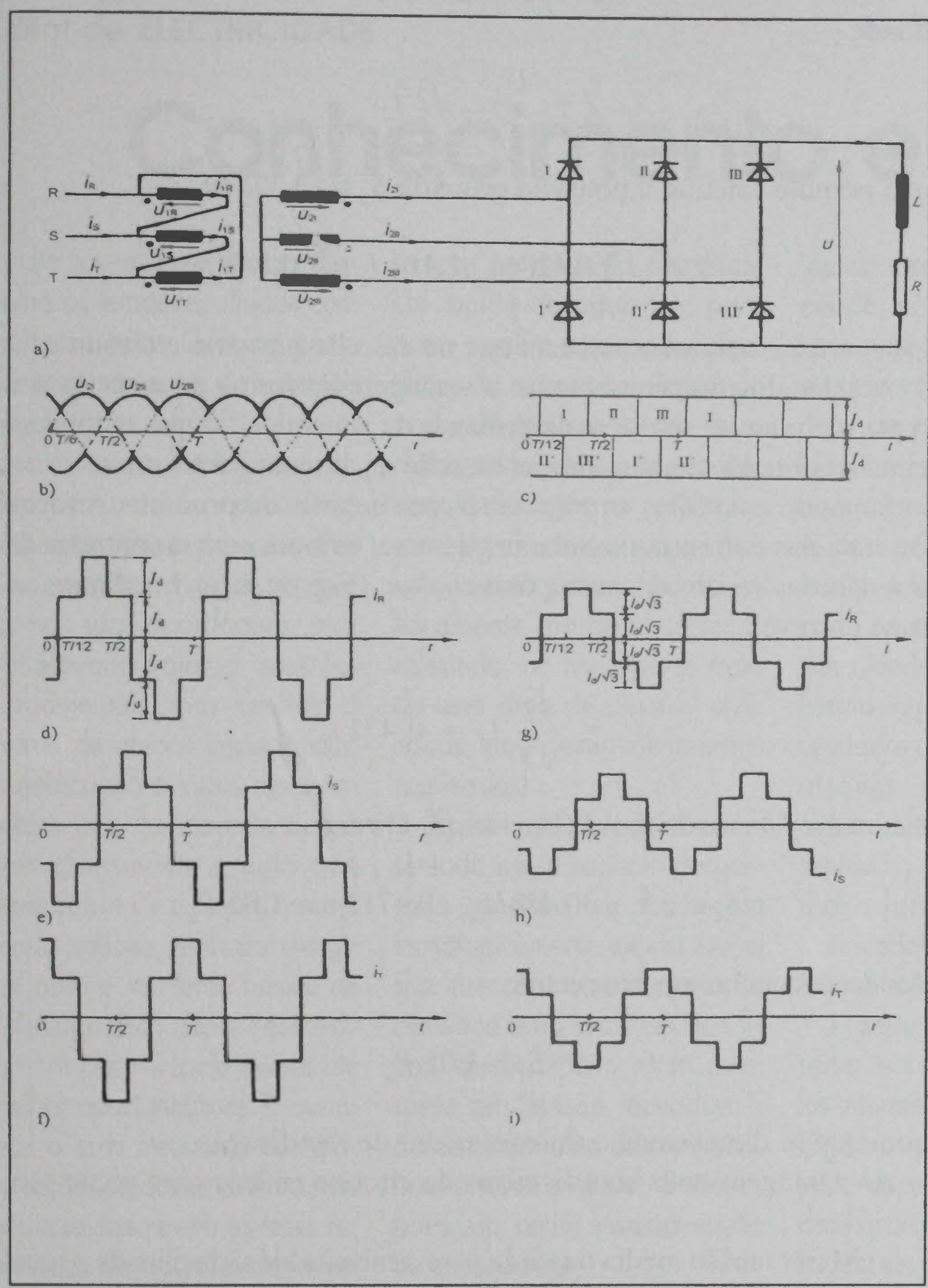

Fig. 3 - Circuito de rectificação trifásica em ponte com transformador DY.
a) Esquema eléctrico.
b) Tensões do secundário.
c) Correntes nos diodos.
d) Corrente na fase R da linha em $n_1 = n_2$.
e) Corrente na fase S da linha com $n_1 = n_2$.
f) Corrente na fase T da linha com $n_1 = n_2$.
g) Corrente na fase R da linha com $n_1 = \sqrt{3}n_2$.
h) Corrente na fase S da linha com $n_1 = \sqrt{3}n_2$.
i) Corrente na fase T da linha com $n_1 = \sqrt{3}\, n_2$.

Na hipótese $n_1 = n_2$ é $V = U_2$ e à amplitude I_d da corrente numa perna do secundário (Fig. 3c) corresponde a amplitude I_d na perna respecitva do primário (se $n_1 \neq n_2$ será I_d/m), sendo os sentidos os mesmos pela convenção adoptada dos sentidos dos enrolamentos (ou das f. m. m.). Da sobreposição dos efeitos introduzidos pelos dois grupos de diodos e das relações entre as correntes nas fases da linha e nas pernas do primário ($i_R = i_{1R} - i_{1T}$, $i_S = i_{1R}$, $i_T = i_{1T} - i_{1S}$) resulta uma forma de onda na corrente da linha muito mais próxima da sinusoidal (Fig. 3d, e, f), cujo valor eficaz é

$$I' = I_d \sqrt{\left(\frac{1}{6} + 4\,\frac{1}{6} + \frac{1}{6}\right) 2} = \sqrt{2}\, I_d$$

Assim é Salvador

Passagem obrigatória de todo o turista estrangeiro, Salvador é a capital brasileira mais moderna do país, de povo alegre e hospitaleiro. Dividida em dois patamares – Cidade Alta e Cidade Baixa – é ligada pelo famoso elevador Lacerda e pelos Planos Inclinados "Gonçalves" e da Liberdade, bem como por íngremes ladeiras que no passado eram os únicos acessos de união das duas partes. É uma terra onde a riqueza do seu casario, de estilo colonial, marca a époco em que Salvador foi a primeira capital do Brasil.

Este antigo modelo arquitectónico mistura-se com o novo numa perfeita simbiose, proporcionando ao visitante uma volta ao passado e, ao mesmo tempo, viver intensamente o presente numa metrópole moderna, pujante e bela.

Conhecida no mundo como "Terra da Felicidade", Salvador destaca-se das outras cidades do país porque nela tudo é motivo de festa. Durante os 365 dias do ano, sempre há algo para festejar. A sua riqueza cultural é invejável.

Erguida à margem da Baía de Todos os Santos, Salvador é detentora de lindas praias, onde o sol brilha o ano todo. Possui uma das mais ricas cadeias de hotéis do país e uma culinária bastante condimentada. A verdade é que em Salvador encontra-se o que há de mais autêntico no povo brasileiro. A cidade respira magia, misticismo, muito encanto e beleza.

Por isso, a oportunidade do evento internacional a realizar de 24 a 29 de Maio em Salvador da Baía, no Brasil, merece ser aproveitada. É só uma questão de verbas disponíveis.

Congressos e Exposições

SALÃO LUMIÈRE 98, exposição sobre iluminação, em Paris, no Parque de Exposições da Porta de Versailles, entre 8 e 12 de Janeiro de 1998. Informa: Promosalons, Telf. 352 84 00, Fax 353 27 80 em Lisboa.

ENVITEC 98, exposição internacional das tecnologias de protecção ambiental, e gestão de resíduos, em Düsseldorf, de 2 a 6 de Março de 1998. Informa: NOWEA, Postfach 101006, D - 40001 Düsseldorf, Telf. + 49 (0) 211 60 10. Internet: http: // www. tradefair. de.

AUTOMATION EUROPE 98, 15.ª edição da exposição com conferência acerca da automação de processos, processamento de dados industriais, actividades e sensores, em CNIT-Paris la Défense, nos dias 10, 11 e 12 de Março de 1998. Informa: Automation Europe, 1 rue du Parc, F-92593 Levallois-Perret Codex, France, Telf. 33 (0) 145 685 493.

Safety and Health at Work '98, exposição em Londres, Earlo Court, sobre segurança e saúde no trabalho, de 10 a 12 de Março 1998. Informa: Caroline Flechner, Paramount Exhibitions & Conferences, 17-21 Schenley Road, Borehamwood, Herts., UK. WDG 1RT, Telf. +44 (0) 216 226 860.

1.º Mercado Inernacional do Audio Visual, ao estilo Midem, em Lisboa, na FIL, de 14 a 19 de Março de 1998. Informa: Paulo Rodrigues, Telef. 360 15 41 de Lisboa.

SysComms '98, exposição, conferência técnica e sessões tutoriais sobre sistemas embebidos e em tempo-real, a 25 e 26 de Março de 1998, CERN, Géneva, na Suiça. Informa: SysComms '98, 1 West Street, Titchfield, Hants, P014 4 DH, England, Telf. +44 (0) 1329 846 166. Internet: http // www. cern. ch/ESONE/ syscomms 98.

donde

$$I = \frac{U_2}{V} \cdot \sqrt{2}\, I_2$$

que permite calcular a potência primária $S_1 = \sqrt{3}\, VI$, ou

$$S_1 = \sqrt{3}.0{,}428 U_{di0}.1{,}414\, I_d = 1{,}0{,}5\, P_d$$

exactamente a mesma potência que no caso do primário em estrela.

Adicionalmente, consegue-se a vantagem da forma de onda da corrente na linha ser muito mais próximo da sinusoidal, o que reduz bastante o conteúdo de harmónicas na rede de alimentação.

Supondo $n_1 = \sqrt{3} n_2$ será $V = \sqrt{3} U_2$ nas bobinas do primário. A forma de onda das correntes na linha mantém-se, embora com amplitudes diferentes das verificadas na hipótese $n_1 = n_2$ (Fig. 3g, h, i). Imediatamente se escreve

$$I' = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d = 0{,}471\, I_2$$

e com $I = I'/m$, onde $m = V/U_2 = 1/\sqrt{3}$, afirma-se

$$S_1 = \sqrt{3}.\ \sqrt{3} 0{,}428 U_{di0}\ .\ 0{,}471 I_d = 1{,}05\, P_d$$

donde se conclui a potência tipo

$$S_T = 1{,}05\, P_d$$

com que se dimensiona o transformador de rectificação.

As vantagens mais significativas do circuito trifásico em ponte são:

a) Maior tensão média na saída para a mesma tensão aplicada e igual tensão de bloqueio dos diodos (compare-se U_{di0} e U_B nos esquemas estudados).
b) Menor ondulação da tensão de saída (correspondendo à da rectificação hexafásica de ponto médio), o que equivale a um indutor de alisamento da corrente de carga mais barato, ou a um melhor alisamento da corrente para uma dada indutividade.
c) Relativamente ao circuito hexafásico de via simples, tem menor custo (pois o transformador trifásico é mais barato) e a corrente contínua na carga é mais elevada (porque $U_{di0} = 2{,}34 U_2$ em vez de $U_{di0} = 1{,}35 U_2$).
d) O transformador de alimentação tem o melhor aproveitamento da sua potência. □

Com este artigo concluiu-se o estudo dos circuitos básicos de rectificação não-controlada. A análise dos mesmos circuitos com dispositivos de ponta controlada torna-se agora muito fácil.