

TESE  
1185

· UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Uma Contribuição para o Estudo  
de Transformadores para Conversores

ADRIANA CORTEZ DE SA

ITAJUBÁ, JUNHO DE 2002

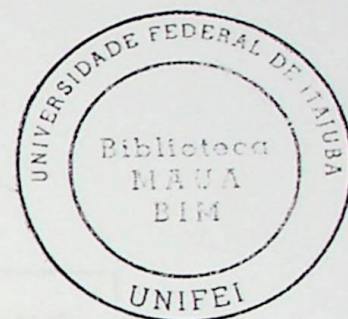
CLASS. 621.314 (043.2)  
CUT. R. 21112  
TOMBO. 1185

UNIFEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Uma Contribuição para o Estudo de Transformadores  
para Conversores

Adriana Cortez de Sá



Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

**Orientador:** Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek

**Co-orientador:** Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá

Itajubá, junho de 2002

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

S111c

Sá, Adriana Cortez de

Uma contribuição para o estudo de transformadores para  
conversores / por Adriana Cortez de Sá; orientado por Ângelo  
José Junqueira Rezek e co-orientado por Jocélio Souza de Sá.

Itajubá, MG : UNIFEI, 2002.

110 p. il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de  
Itajubá.

1. Transformadores - Eletrônica de Potência. 2. Forças  
magnetométrizes - cálculo. I. Rezek, Ângelo José Junqueira,  
orient. II. Sá, Jocélio Souza de, co- orient. III. Universidade  
Federal de Itajubá. IV. Título.

CDU 621.314(043.2)

## *Agradecimentos*

### *Dedicatória*

**Dedico este trabalho**

**à minha filha Marina e aos meus pais**

**Ana Maria e Jocélio**

# *Agradecimentos*

Ao Professor Dr. Ângelo José Junqueira Rezek pelo apoio e incentivo durante o curso e na orientação deste trabalho.

Ao Professor Dr. Jocélio Souza de Sá, ou melhor, ao meu pai pelo apoio e co-orientação deste trabalho, além do incentivo para continuar atuando em pesquisa e desenvolvimento.

A Sra. Janice Duarte Viana e ao Sr. Argemiro dos Santos pela ajuda na edição da dissertação.

A FAPEMIG pelo apoio financeiro durante o curso de mestrado.

A UNIFEI pela oportunidade de continuar minha formação profissional.

# Sumário

## Lista de Figuras

## Lista de Tabelas

## Lista de Grandezas

## Resumo 01

## Abstract 02

## 1.Introdução 03

### 1.1-Motivação 03

### 1.2-Objetivos 03

### 1.3-Estrutura do Trabalho 04

## 2.Estudo das Forças Magnetomotrizes em Transformadores 05

### 2.1-Introdução 05

### 2.2-Transformadores monofásicos 06

### 2.3-Transformadores trifásicos com dois circuitos 07

#### 2.3.1-Transformador com primário e secundário ligados em estrela 08

#### 2.3.2-Transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela 11

#### 2.3.3-Transformador com primário e secundário ligados em triângulo 13

#### 2.3.4-Transformador com primário ligado em estrela e secundário ligado em triângulo 16

### 2.4-Transformadores trifásicos com três circuitos 18

## 3.Configuração dos Conversores e Equações Básicas 22

### 3.1-Introdução 22

### 3.2-Conversores monofásicos 22

#### 3.2.1-Conversor monofásico de meia onda com carga resistiva 22

##### a-Conversor não controlado

##### b-Conversor controlado

#### 3.2.2-Conversor ligado em ponte monofásica com carga resistiva 28

##### a-Conversor não controlado

##### b-Conversor controlado

#### 3.2.3-Conversor ligado em ponte monofásica com carga indutiva 33

##### a-Conversor não controlado

##### b-Conversor controlado

### 3.3-Conversores trifásicos 38

#### 3.3.1-Conversor trifásico ligado em estrela com carga indutiva 39

##### a-Conversor não controlado

##### b-Conversor controlado

3.3.2-Convertor ligado em ponte trifásica	46
a-Ponte trifásica não controlada com carga resistiva	
b-Ponte trifásica controlada com carga resistiva	
c-Ponte trifásica não controlada com carga indutiva	
d-Ponte trifásica controlada com carga indutiva	
e-Ponte trifásica controlada com carga ativa	
e.1-Convertor operando como retificador	
e.2-Convertor operando como inversor	
3.3.3-Convertores de 12 pulsos	68
<b>4.Formas de Onda e Valores Eficazes das Correntes nos Circuitos Primário e Secundário dos Transformadores</b>	<b>73</b>
4.1-Introdução	73
4.2-Transformadores trifásicos com dois circuitos	73
4.2.1-Convertor trifásico ligado em estrela alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga indutiva	73
a – <u>Convertor não controlado</u>	
b – <u>Convertor controlado</u>	
4.2.2-Convertor trifásico ligado em ponte trifásica alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga resistiva	80
a- <u>Convertor não controlado</u>	
b- <u>Convertor controlado</u>	
4.2.3-Convertor trifásico ligado em ponte trifásica alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga indutiva	88
a- <u>Convertor não controlado</u>	
b- <u>Convertor controlado</u>	
4.2.4-Convertor trifásico ligado em ponte trifásica alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga ativa	95
a- <u>Convertor não controlado</u>	
b- <u>Convertor controlado</u>	
4.3-Convertor de 12 pulsos alimentado por transformador trifásico com três circuitos	103
<b>5.Conclusões</b>	<b>108</b>
<b>6.Bibliografia</b>	<b>110</b>

## Lista de Figuras

- Figura 01** Fluxo de tensão e corrente no transformador
- Figura 02** Esquema básico do transformador monofásico
- Figura 03** Circuitos primário e secundário representados no núcleo de um transformador trifásico
- Figura 04** Transformador com os circuitos primário e secundário ligados em estrela
- Figura 05** Transformador com o primário ligado em triângulo e o secundário ligado em estrela
- Figura 06** Transformador com o primário e secundário ligados em triângulo
- Figura 07** Transformador com o primário ligado em estrela e o secundário ligado em triângulo
- Figura 08** Transformador trifásico com três circuitos
- Figura 09** Conversor não controlado monofásico de meia onda com carga resistiva
- Figura 10** Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_d$  e  $i_d$  no circuito mostrado na Figura 09
- Figura 11** Conversor controlado monofásico de meia onda com carga resistiva
- Figura 12** Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  no circuito mostrado na Figura 11
- Figura 13** Conversor não controlado ligado em ponte monofásica com carga resistiva
- Figura 14** Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_d$  e  $i_d$  no circuito mostrado na Figura 13
- Figura 15** Conversor controlado ligado em ponte monofásica com carga resistiva
- Figura 16** Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  no circuito mostrado na Figura 15
- Figura 17** Conversor monofásico não controlado ligado em ponte monofásica com carga indutiva
- Figura 18** Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_d$  e  $i_d$  no circuito mostrado na Figura 17
- Figura 19** Conversor controlado ligado em ponte monofásica com carga indutiva
- Figura 20** Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  para  $\alpha < 90^\circ$  no circuito mostrado na Figura 19

- Figura 21** Conversor não controlado ligado em estrela com carga indutiva
- Figura 22** Formas de onda das tensões de fase no lado de corrente alternada e no lado de corrente contínua do conversor
- Figura 23** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 24** Conversor controlado ligado em estrela com carga indutiva
- Figura 25** Formas de onda das tensões de fase no lado de corrente alternada e no lado de corrente contínua do conversor
- Figura 26** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 27** Conversor não controlado ligado em ponte trifásica com carga resistiva
- Figura 28** Formas e onda das tensões de linha no lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor
- Figura 29** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 30** Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga resistiva
- Figura 31** Formas de onda das tensões de linha no lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor para o ângulo de disparo  $\alpha$
- Figura 32** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 33** Conversor não controlado ligado em ponte trifásica com carga indutiva
- Figura 34** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 35** Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga indutiva
- Figura 36** Formas de onda das tensões de linha no lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor em função do ângulo de disparo  $\alpha$
- Figura 37** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 38** Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga ativa operando como retificador

- Figura 39** Formas de onda das tensões no lado de corrente alternada, da força eletromotriz da carga e da tensão no lado de corrente contínua do conversor em função do ângulo de disparo  $\alpha$
- Figura 40** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 41** Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga ativa operando como inversor
- Figura 42** Formas de onda das tensões no lado de corrente alternada, da força eletromotriz da carga e da tensão no lado de corrente contínua do conversor em função do ângulo de disparo  $\alpha$
- Figura 43** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 44** Conversor de 12 pulsos
- Figura 45** Formas de onda das tensões no lado de corrente alternada e no lado de corrente contínua do conversor
- Figura 46** Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor
- Figura 47** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor não controlado ligado em estrela - carga indutiva
- Figura 48** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador
- Figura 49** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em estrela - carga indutiva
- Figura 50** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador
- Figura 51** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor não controlado ligado em ponte trifásica - carga resistiva
- Figura 52** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador
- Figura 53** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica - carga resistiva
- Figura 54** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador

**Figura 55** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor não controlado ligado em ponte trifásica - carga indutiva

**Figura 56** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador

**Figura 57** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica - carga indutiva

**Figura 58** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador

**Figura 59** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica - carga ativa

**Figura 60** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador

**Figura 61** Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica - carga ativa

**Figura 62** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador

**Figura 63** Transformador com primário em triângulo e secundários em estrela e triângulo alimentando conversor de 12 pulsos – carga indutiva

**Figura 64** Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador

## Lista de Tabelas

- Tabela 01 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor não controlado **ligado** em estrela- carga indutiva
- Tabela 02 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor controlado **ligado** em estrela- carga indutiva
- Tabela 03 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor não controlado **ligado** em ponte trifásica - carga resistiva
- Tabela 04 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor controlado **ligado** em ponte trifásica - carga resistiva
- Tabela 05-** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor não controlado **ligado** em ponte trifásica - carga indutiva
- Tabela 06 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor controlado **ligado** em ponte trifásica - carga indutiva
- Tabela 07-** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor controlado **ligado** em ponte trifásica - carga ativa, operação como retificador
- Tabela 08 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundário em estrela alimentando conversor controlado **ligado** em ponte trifásica - carga ativa, operação como inversor
- Tabela 09 -** Correntes de fase e de linha do transformador com primário em **triângulo** e secundários em estrela e triângulo alimentando conversor de **doze pulsos**

## Lista de Grandezas

- $f_{MIM(1)}$  Valor instantâneo da força magnetomotriz produzida pelo circuito primário do transformador
- $f_{MIM(2)}$  Valor instantâneo da força magnetomotriz produzida pelo circuito secundário do transformador
- F.P.** Fator de potência
- $i_0$  Valor instantâneo da corrente a vazio do primário do transformador
- $i_1$  Valor instantâneo da corrente do primário do transformador
- $i_2$  Valor instantâneo da corrente do secundário do transformador
- $i_{aa'}$  Valor instantâneo da corrente na fase aa' do secundário do transformador
- $i_{bb'}$  Valor instantâneo da corrente na fase bb' do secundário do transformador
- $i_{cc'}$  Valor instantâneo da corrente na fase cc' do secundário do transformador
- $i_{AA'}$  Valor instantâneo da corrente na fase AA' do primário do transformador
- $i_{BB'}$  Valor instantâneo da corrente na fase BB' do primário do transformador
- $i_{CC'}$  Valor instantâneo da corrente na fase CC' do primário do transformador
- $i_a$  Valor instantâneo da corrente de linha da fase aa' do secundário do transformador
- $i_b$  Valor instantâneo da corrente de linha da fase bb' do secundário do transformador
- $i_c$  Valor instantâneo da corrente de linha da fase cc' do secundário do transformador
- $i_A$  Valor instantâneo da corrente de linha da fase AA' do primário do transformador
- $i_B$  Valor instantâneo da corrente de linha da fase BB' do primário do transformador
- $i_C$  Valor instantâneo da corrente de linha da fase CC' do primário do transformador
- $i_2$  Valor instantâneo da corrente no lado de corrente alternada do conversor monofásico
- $I_2$  Valor eficaz da corrente no lado de corrente alternada do conversor
- $I_{1(f)}$  Valor eficaz da corrente de fase do primário do transformador

$I_1$	Valor eficaz da corrente de linha do primário do transformador
$i_d$	Valor instantâneo da corrente no lado de corrente contínua do conversor
$I_d$	Valor médio da corrente no lado de corrente contínua do conversor
$I_{d(ef)}$	Valor eficaz da corrente no lado de corrente contínua do conversor
$L$	Indutância
$N_1$	Número de espiras do circuito primário do transformador
$N_2$	Número de espiras do circuito secundário do transformador
$N_{21}$	Número de espiras do circuito secundário ligado em estrela do transformador com três circuitos
$N_{22}$	Número de espiras do circuito secundário ligado em triângulo do transformador com três circuitos
$P_R$	Potência dissipada na resistência
$P_E$	Potência absorvida ou fornecida pela carga ativa
$P_d$	Potência fornecida pelo conversor
$R_M$	Relutância do núcleo do transformador
$R$	Resistência da carga
$S$	Potência aparente
$u_a$	Valor instantâneo da tensão na fase a
$u_b$	Valor instantâneo da tensão na fase b
$u_c$	Valor instantâneo da tensão na fase c
$u_{ab}$	Valor instantâneo da tensão entre as fases a e b
$u_{bc}$	Valor instantâneo da tensão entre as fases b e c
$u_{ca}$	Valor instantâneo da tensão entre as fases c e a

$u_2$	Valor instantâneo da tensão no lado de corrente alternada do conversor monofásico
$u_d$	Valor instantâneo da tensão no lado de corrente contínua do conversor não controlado
$u_{d\alpha}$	Valor instantâneo da tensão no lado de corrente contínua do conversor controlado
$U_1$	Valor eficaz da tensão de linha do primário do transformador
$U_2$	Valor eficaz da tensão de linha do secundário do transformador ou lado de corrente alternada do conversor
$U_{2f}$	Valor eficaz da tensão de fase do secundário do transformador ou lado de corrente alternada do conversor
$U_d$	Valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor não controlado
$U_{d\alpha}$	Valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor controlado
$\alpha$	Ângulo de disparo do conversor controlado
$\phi_M$	Fluxo de magnetização

## RESUMO

Transformadores para conversores eletrônicos são mais solicitados que transformadores de uso convencional, pois a carga geralmente apresenta baixo fator de potência e seus circuitos são percorridos por correntes não senoidais. Isto significa que alguns cuidados devem ser tomados na sua especificação, principalmente com relação à potência. Deve-se observar que a potência do transformador será função do tipo de carga e da configuração do conversor. Existem, ainda, alguns casos onde as potências dos circuitos primário e secundário são diferentes.

Este trabalho pretende contribuir para a análise do comportamento e das solicitações em transformadores para conversores eletrônicos, apresentando métodos para obtenção do comportamento e dos valores eficazes das correntes de fase e de linha do primário e secundário do transformador. São também estabelecidas as equações de tensão, potências ativa e aparente e fator de potência, que são importantes na especificação do transformador.

Toda a análise é feita a partir da configuração do conversor, do tipo de carga e do tipo de transformador. É importante salientar que o trabalho, além de transformadores monofásicos usados na alimentação de conversores de meia onda e de pontes monofásicas, analisou transformadores trifásicos de dois circuitos alimentando conversores ligados em estrela e em ponte trifásica. O trabalho também abordou transformadores com um circuito primário e dois circuitos secundários usado na alimentação de conversores de 12 pulsos.

## ABSTRACT

Transformers for electronic converters are more demanded than transformers for conventional use, since their load usually shows a low power factor and their circuits are flown through non-sinusoidal currents. This means that some precaution must be taken concerning its specification, mainly in relation to its power. It must be observed that the power of the transformer will be a function of the type of load and the configuration of the converter. There are, still, cases in which the power of the primary and the secondary circuits are different.

This paper intends to contribute to the behavioral analysis and the demanding in transformers for electronic converters, showing methods for obtaining the behavior and the RMS values of the phase and the line currents of the primary and secondary of the transformer. The voltage equations, the active and apparent powers and the power factor are also established, which are all important in the specification of the transformer.

The whole analysis is made based on the configuration of the converter, the kind of load and the type of the transformer. It is important to mention that this work, besides the single-phase transformers used to feed the half-wave converters and the single-phase bridges, has analyzed three-phase transformers of two circuits feeding star-connected and three-phase bridge converters. The work has also covered transformers with a primary circuit and two secondary circuits used to feed converters of 12 pulses.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 - Motivação

Cargas não lineares, principalmente convertidas eletrônicas pela rede, provocam distorções nas formas de onda de corrente elétrica na rede de suprimento de energia dos mesmos. Correntes elétricas distorcidas, na rede de distribuição não são equilibradas, geralmente resultam na redução do fator de potência, o que significa o aumento da potência aparente exigida e sobrecarregamento dos equipamentos da rede de suprimento de energia elétrica. Adicionalmente, harmônicos de corrente podem provocar sobretensões nesses equipamentos.

No sistema de suprimento de energia elétrica de conversores, o transformador para converter a rede elétrica em dois equipamentos mais importantes.

A redução de fator de potência provoca o sobrecarregamento do transformador, enquanto que o conteúdo harmônico de corrente provoca sobreaquecimento dos enrolamentos do núcleo nos circuitos e no núcleo.

# Introdução

## 1.2 - Objetivo

O objetivo desta dissertação é analisar o comportamento das correntes de fase e de linha dos transformadores para conversores alimentados pela rede. Também serão estabelecidas equações que permitam determinar tensão, potência ativa e reativa e fator de potência do conjunto transformador-conversor-carga.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 - Motivação

Cargas não lineares, principalmente conversores comutados pela rede, provocam distorções nas formas de onda de correntes elétricas na rede de suprimento de energia dos mesmos. Correntes elétricas distorcidas, ou seja, de comportamento não senoidal, geralmente resultam na redução do fator de potência, o que significa o aumento da potência aparente, exigindo o sobredimensionamento dos equipamentos da rede de suprimento de energia elétrica. Adicionalmente, harmônicos de corrente podem provocar solicitações nestes equipamentos.

No sistema de suprimento de energia elétrica de conversores, o transformador para conversor é sem dúvida um dos equipamentos mais importantes.

A redução do fator de potência provoca o sobredimensionamento do transformador, enquanto que o conteúdo harmônico da corrente provoca sobreaquecimento devido ao aumento das perdas nos circuitos e no núcleo.

Com vistas a uma especificação otimizada do transformador, além da possibilidade da construção de transformadores especiais para conversores, o Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá está concretizando uma linha de pesquisa nesta área.

Isto motivou o desenvolvimento deste trabalho, no sentido de criar já algumas condições básicas para esta pesquisa.

## 1.2 - Objetivo

O objetivo desta dissertação é analisar o comportamento das correntes de fase e de linha dos transformadores para conversores comutados pela rede. Também serão estabelecidas equações que permitam determinar tensões, potências ativa e aparente e fator de potência do conjunto transformador-conversor-carga.

### 1.3 – Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 é analisado o balanço de forças magnetomotrizes no núcleo de transformadores monofásicos, trifásicos com 2 circuitos e trifásicos com 3 circuitos. Este balanço permite estabelecer equações que definem o comportamento da corrente do primário a partir da corrente do secundário do transformador.

No capítulo 3 são analisadas diversas configurações de conversores com o objetivo principal de determinar o comportamento da corrente no lado de corrente alternada do conversor. São também estabelecidas equações de potências ativa e aparente e de fator de potência.

No capítulo 4 são determinados os comportamentos e os valores eficazes das correntes de fase e de linha do transformador. São também determinadas as potências aparentes e o fator de potência do “ponto de vista” da rede de suprimento de energia.

O capítulo 5 apresenta conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

Magnetomotrizes em  
Transformadores

2.1 - Introdução

O transformador sempre eletromagneticamente dois circuitos elétricos (monofásicos ou trifásicos). A relação entre as tensões dos circuitos é definida pela Lei de Faraday, enquanto que a relação entre as correntes dos circuitos primário e secundário é definida pelo equilíbrio de forças magnetomotrizes no núcleo do transformador.

# Estudo das Forças Magnetomotrizes em Transformadores



Neste Capítulo pretende-se estabelecer as equações que definem a corrente no primário a partir da corrente no secundário através do balanço de forças magnetomotrizes.

- \* transformadores monofásicos
- \* transformadores trifásicos com dois circuitos
- \* transformadores trifásicos com três circuitos

## 2. ESTUDO DAS FORÇAS MAGNETOMOTRIZES EM TRANSFORMADORES

### 2.1 - Introdução

O transformador acopla eletromagneticamente dois circuitos elétricos (monofásicos ou polifásicos). A relação entre as tensões dos circuitos é definida pela Lei de Faraday, enquanto que a relação entre as correntes dos circuitos primário e secundário é definida pelo equilíbrio de forças magnetomotrizes no núcleo do transformador.

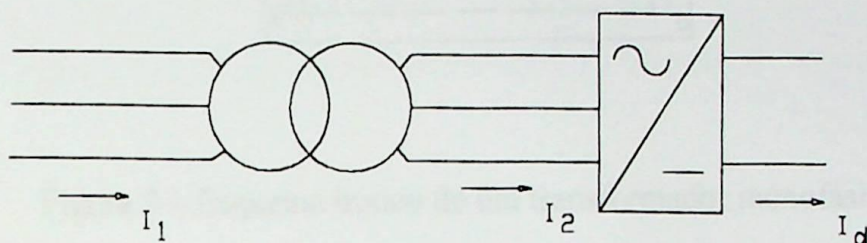


Figura 1. Transformador alimentando um conversor.

Conforme mostra a figura 1 para um transformador trifásico alimentando um conversor, um dos objetivos deste trabalho é definir os comportamentos das correntes do secundário e do primário do transformador, conhecido o comportamento da corrente no lado de corrente contínua do conversor. O comportamento da corrente no secundário depende do tipo do conversor e da carga do mesmo do mesmo. Já o comportamento da corrente do primário é obtido a partir da corrente do secundário, com o auxílio do balanço das forças magnetomotrizes no núcleo do transformador.

Neste Capítulo pretende-se estabelecer as equações que definem a corrente do primário a partir da corrente no secundário através do balanço de forças magnetomotrizes para:

- transformadores monofásicos
- transformadores trifásicos com dois circuitos
- transformadores trifásicos com três circuitos

## 2.2 – Transformadores Monofásicos

A Figura 2 mostra esquematicamente um transformador monofásico.

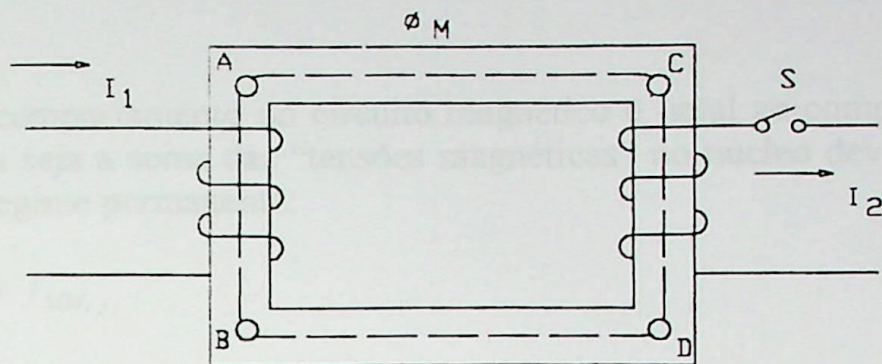


Figura 2 – Esquema básico de um transformador monofásico.

A relação entre os valores instantâneos das correntes do primário e do secundário pode ser determinada, conforme mostrado a seguir.

Se o transformador opera a vazio, ou seja com a chave S aberta, tem-se:

$$i_1 = i_0 \quad (1)$$

$$i_2 = 0 \quad (2)$$

A corrente a vazio produz entre os pontos A e B do núcleo do transformador, conforme mostrado na Figura 2, uma diferença de potencial magnética denominada força magnetomotriz, cujo valor instantâneo será:

$$f_{MM(1)} = N_1 \cdot i_0 \quad (3)$$

Esta força magnetomotriz tem como consequência a circulação do fluxo de magnetização pelo núcleo do transformador, definido por:

$$\phi_M = \frac{f_{MM(1)}}{R_M} \quad (4)$$

Considerando a equação (3) resulta:

$$\phi_M = \frac{N_1 \cdot i_0}{R_M} \quad (5)$$

A equação (5) permite concluir que a queda de tensão no núcleo ( $\phi_M \cdot R_M$ ) é igual a força magnetomotriz ( $N_1 \cdot i_0$ ).

Com o fechamento da chave S circula pelo circuito do secundário a corrente  $i_2$ , que produz entre os pontos C e D a força magnetomotriz, cujo valor instantâneo é dado por:

$$f_{MM(2)} = N_2 \cdot i_2 \quad (6)$$

O comportamento do circuito magnético é igual ao comportamento de um circuito elétrico, ou seja a soma das “tensões magnéticas” no núcleo deve ser nula. Desta forma resulta, em regime permanente.

$$f_{MM(1)} = \phi_M \cdot R_M + f_{MM(2)} \quad (7)$$

Desta forma, em regime permanente, a corrente no circuito primário cresce de  $i_0$  par  $i_1$ .

Considerando as equações anteriores, conclui-se que:

$$N_1 \cdot i_1 = \phi_M \cdot R_M + N_2 \cdot i_2 \quad (8)$$

ou ainda

$$N_1 \cdot i_1 = N_1 i_0 + N_2 i_2 \quad (9)$$

A corrente a vazio  $i_0$  é pequena, e pode ser desprezada sem que os objetivos deste trabalho sejam prejudicados. Desta forma, resulta:

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (10)$$

A equação (10) permite concluir que o comportamento da corrente do primário será igual ao comportamento da corrente do secundário do transformador.

## 2.3 – Transformadores Trifásicos com Dois Circuitos

A Figura 3 mostra esquematicamente o núcleo contendo os circuitos primário e secundário de um transformador trifásico.

### 2.3.1 – Transformadores com primário e secundário em estrela

A Figura 4 mostra esquematicamente a função de um transformador com os circuitos primário e secundário ligados em estrela.

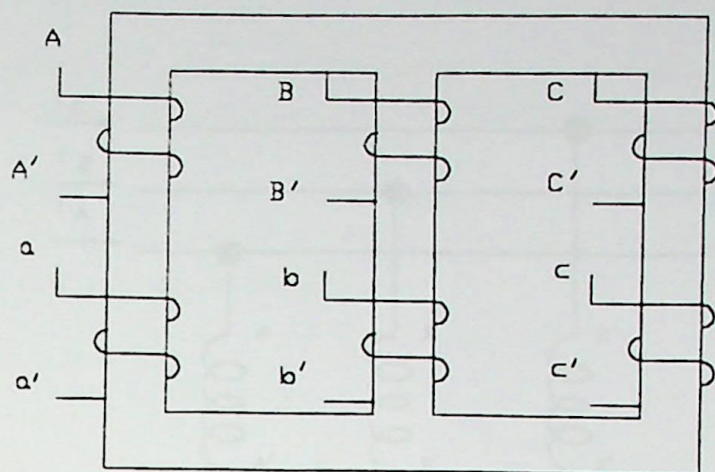


Figura 3 – Circuitos primário e secundário representados no núcleo de um transformador trifásico.

Na Figura 3 pode-se identificar que as três colunas do transformador, que contém respectivamente os circuitos primário e secundário de cada fase, estão “em paralelo”. O comportamento do circuito magnético é semelhante ao comportamento do circuito elétrico. Isto significa, que desprezando-se a queda de tensão ( $\phi_M \cdot R_M$ ) no núcleo do transformador, as forças magnetomotrizes resultantes nas três colunas devem ser iguais. Pode-se então concluir que em qualquer instante valem as relações

$$N_1 \cdot i_{AA'} - N_2 i_{aa'} = N_1 \cdot i_{BB'} - N_2 i_{bb'} = N_1 i_{CC'} - N_2 i_{cc'} \quad (11)$$

Para transformadores trifásicos, a determinação do comportamento da corrente do circuito primário em função do comportamento da corrente do circuito secundário através do balanço de forças magnetomotrizes, vai depender do tipo de conexão do transformador. Serão analisados:

- transformadores com primário e secundário em estrela
- transformadores com primário e triângulo e secundário em estrela
- transformadores com primário e secundário em triângulo
- transformadores com primário em estrela e secundário em triângulo

### 2.3.1 – Transformadores com primário e secundário em estrela

A Figura 4 mostra esquematicamente a ligação de um transformador com os circuitos primário e secundário ligados em estrela.

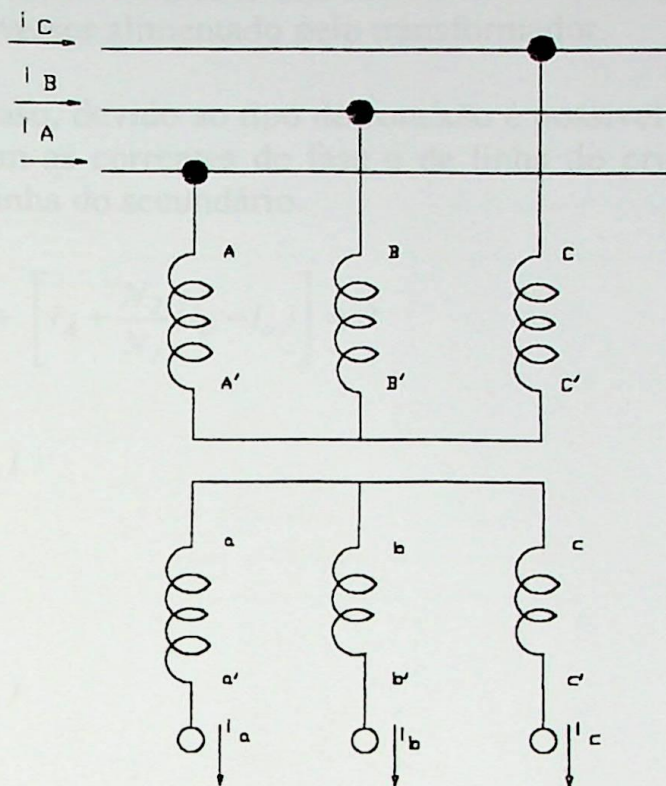


Figura 04 – Transformador com o primário e secundário ligados em estrela.

O balanço de forças magnetomotrizes, válido para qualquer forma de onda de corrente, define a relação entre as correntes do primário e secundário.

$$N_1 \cdot i_{AA'} - N_2 i_{aa'} = N_1 \cdot i_{BB'} - N_2 i_{bb'} = N_1 i_{CC'} - N_2 i_{cc} \quad (12)$$

Independente da forma de onda e comportamento das correntes do primário vale também a relação:

$$i_{AA'} + i_{BB'} + i_{CC'} = 0 \quad (13)$$

Para conexão estrela as correntes de fase e de linha são iguais. Desta forma tem-se:

$$i_{AA'} = i_A ; i_{BB'} = i_B ; i_{CC'} = i_C \quad (14)$$

$$i_{aa'} = i_a ; i_{bb'} = i_b ; i_{cc'} = i_c \quad (15)$$

Resultando para as equações (12) e (13)

$$N_1 i_A - N_2 i_a = N_1 i_B - N_2 i_b = N_1 i_C - N_2 i_c \quad (16)$$

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (17)$$

Os valores instantâneos das correntes de linha  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são definidos pela carga e pelo tipo de conversor alimentado pelo transformador.

Neste caso, devido ao tipo de conexão é possível estabelecer-se diretamente as equações que definem as correntes de fase e de linha do primário do transformador, a partir das correntes de linha do secundário.

$$i_A + \left[ i_A + \frac{N_2}{N_1} (i_b - i_a) \right] + \left[ i_A + \frac{N_2}{N_1} (i_c - i_a) \right] = 0$$

$$i_A = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_a - i_b - i_c) \quad (18)$$

analogamente obtém-se

$$i_B = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_b - i_a - i_c) \quad (19)$$

$$i_C = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_c - i_a - i_b) \quad (20)$$

No transformador com os circuitos do primário e secundário ligados em estrela a relação de espiras é igual a relação de transformação

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (21)$$

Desta forma, resulta

$$i_A = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (2i_a - i_b - i_c) \quad (22)$$

$$i_B = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (2i_b - i_a - i_c) \quad (23)$$

$$i_C = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (2i_c - i_a - i_b) \quad (24)$$

### 2.3.2 – Transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela

A Figura 5 mostra a ligação de um transformador com o primário ligado em triângulo e o secundário ligado em estrela.

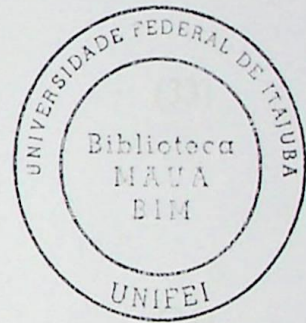
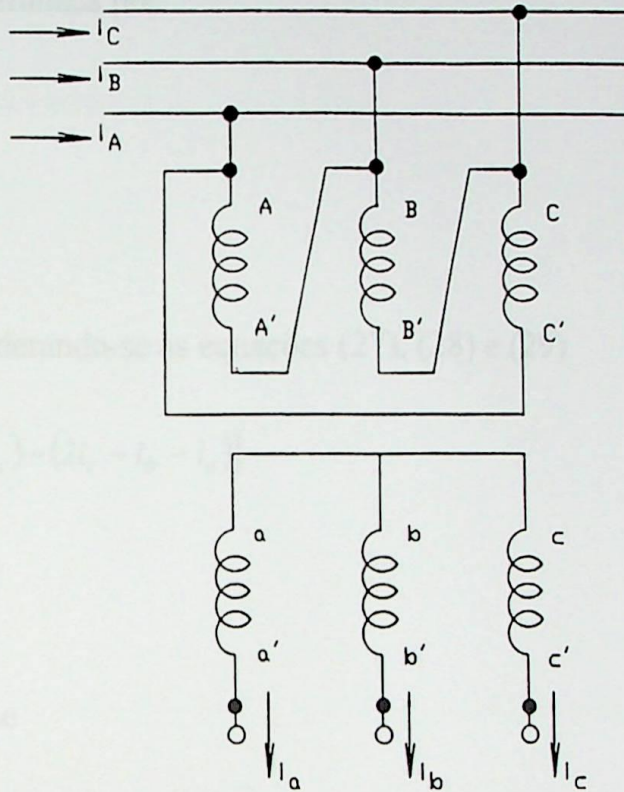


Figura 05 – Transformador com o primário ligado em triângulo e o secundário ligado em estrela.

Considerando que as correntes de linha e de fase do secundário são iguais, o balanço de forças magnetomotrizes fornece:

$$N_1 i_{AA'} - N_2 i_a = N_1 i_{BB'} - N_2 i_b = N_1 i_{CC'} - N_2 i_c \quad (25)$$

Para o circuito primário vale:

$$i_{AA'} + i_{BB'} + i_{CC'} = 0 \quad (26)$$

Conforme demonstrado anteriormente, as correntes de fase do primário do transformador em função das correntes de linha do secundário serão dadas por:

$$i_{AA'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_a - i_b - i_c) \quad (27)$$

$$i_{BB'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_b - i_a - i_c) \quad (28)$$

$$i_{CC'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_c - i_b - i_a) \quad (29)$$

Tomando como base a Figura 5, as correntes de linha do primário do transformador serão definidas por:

$$i_A = i_{AA'} - i_{CC'} \quad (30)$$

$$i_B = i_{BB'} - i_{AA'} \quad (31)$$

$$i_C = i_{CC'} - i_{BB'} \quad (32)$$

Considerando-se as equações (27), (28) e (29)

$$i_A = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} [(2i_a - i_b - i_c) - (2i_c - i_b - i_a)]$$

$$i_A = \frac{N_2}{N_1} (i_a - i_c) \quad (33)$$

analogamente obtém-se

$$i_B = \frac{N_2}{N_1} (i_b - i_a) \quad (34)$$

$$i_C = \frac{N_2}{N_1} (i_c - i_b) \quad (35)$$

No transformador com primário ligado em triângulo e o secundário ligado em estrela a relação de transformação em função da relação de espiras é dada por:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (36)$$

Desta forma, resultam para as correntes de fase do circuito primário

$$i_{AA'} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} (2i_a - i_b - i_c)$$

$$i_{AA'} = \frac{\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{U_2}{U_1} (2i_a - i_b - i_c) \quad (37)$$

analogamente obtém-se:

$$i_{BB'} = \frac{\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{U_2}{U_1} (2i_b - i_a - i_c) \quad (38)$$

$$i_{CC'} = \frac{\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{U_2}{U_1} (2i_c - i_a - i_b) \quad (39)$$

Para as correntes de linha tem-se:

$$i_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_a - i_c)$$

$$i_A = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_a - i_c) \quad (40)$$

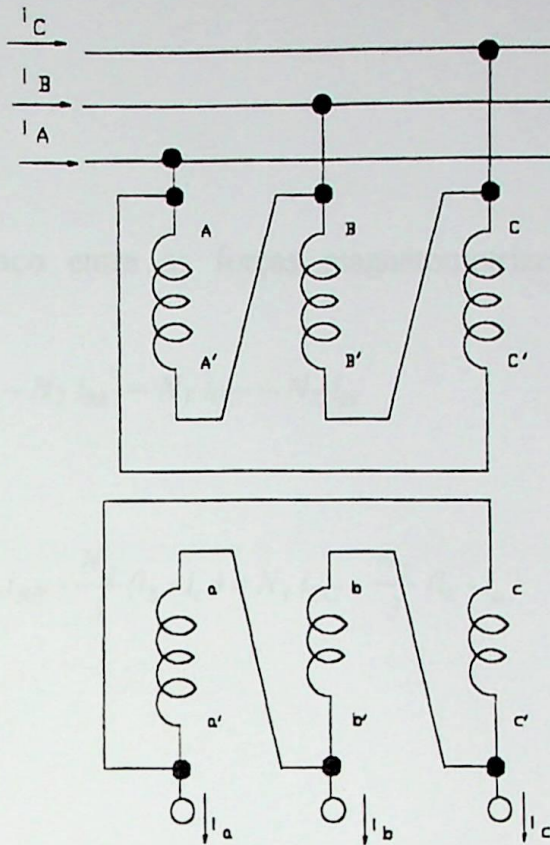
analogamente obtém-se

$$i_B = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_b - i_a) \quad (41)$$

$$i_C = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_c - i_b) \quad (42)$$

### 2.3.3 – Transformador com o primário e o secundário ligados em triângulo

A Figura 6 mostra a ligação de um transformador com o primário e o secundário ligados em triângulo.



Para as correntes de fase do primário do transformador resultam:

Figura 6 – Transformador com o primário e o secundário ligados em triângulo.

Para estabelecer o balanço das forças magnetomotrizes que vai definir a relação entre as correntes do primário e secundário é necessário que inicialmente sejam calculadas as correntes de fase do secundário do transformador, a partir das conhecidas correntes de linha.

Valem as relações:

$$i_{aa'} = i_a + i_{cc'} \quad (43)$$

$$i_{bb'} = i_b + i_{aa'} \quad (44)$$

$$i_{cc'} = i_c + i_{bb'} \quad (45)$$

$$i_{aa'} + i_{bb'} + i_{cc'} = 0 \quad (46)$$

Desta forma, para as correntes de fase do secundário do transformador resultam:

$$i_{aa'} = \frac{1}{3} (i_a - i_b) \quad (47)$$

$$i_{bb'} = \frac{1}{3} (i_b - i_c) \quad (48)$$

$$i_{cc'} = \frac{1}{3} (i_c - i_a) \quad (49)$$

O balanço entre as forças magnetomotrizes dos circuitos primário e secundário fornece:

$$N_1 \cdot i_{AA'} - N_2 i_{aa'} = N_1 \cdot i_{BB'} - N_2 i_{bb'} = N_1 i_{CC'} - N_2 i_{cc'} \quad (50)$$

ou ainda

$$N_1 \cdot i_{AA'} - \frac{N_2}{3} (i_a - i_b) = N_1 \cdot i_{BB'} - \frac{N_2}{3} (i_b - i_c) = N_1 i_{CC'} - \frac{N_2}{3} (i_c - i_a) \quad (51)$$

e

$$i_{AA'} + i_{BB'} + i_{CC'} = 0 \quad (52)$$

Para as correntes de fase do primário do transformador resultam:

$$i_{AA'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (i_a - i_b) \quad (53)$$

$$i_{BB'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (i_b - i_c) \quad (54)$$

$$i_{CC'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (i_c - i_a) \quad (55)$$

As correntes de linha do primário do transformador serão obtidas a partir das equações:

$$i_A = i_{AA'} - i_{CC'} \quad (56)$$

$$i_B = i_{BB'} - i_{AA'} \quad (57)$$

$$i_C = i_{CC'} - i_{BB'} \quad (58)$$

resultando:

$$i_A = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_a - i_b - i_c) \quad (59)$$

$$i_B = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_b - i_a - i_c) \quad (60)$$

$$i_C = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (2i_c - i_a - i_b) \quad (61)$$

Na conexão triângulo-triângulo a relação de transformação é igual a relação de espiras

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (62)$$

Desta forma resultam para as correntes de fase do primário:

$$i_{AA'} = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (i_a - i_b) \quad (63)$$

$$i_{BB'} = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (i_b - i_c) \quad (64)$$

$$i_{CC'} = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (i_c - i_a) \quad (65)$$

Para as correntes de linha:

$$i_A = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2i_a - i_b - i_c) \quad (66)$$

$$i_B = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2i_b - i_a - i_c) \quad (67)$$

$$i_C = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2i_c - i_a - i_b) \quad (68)$$

### 2.3.4 – Transformador com o primário ligado em estrela e o secundário ligado em triângulo

A Figura 7 mostra a ligação de um transformador com o primário ligado em estrela e o secundário ligado em triângulo.

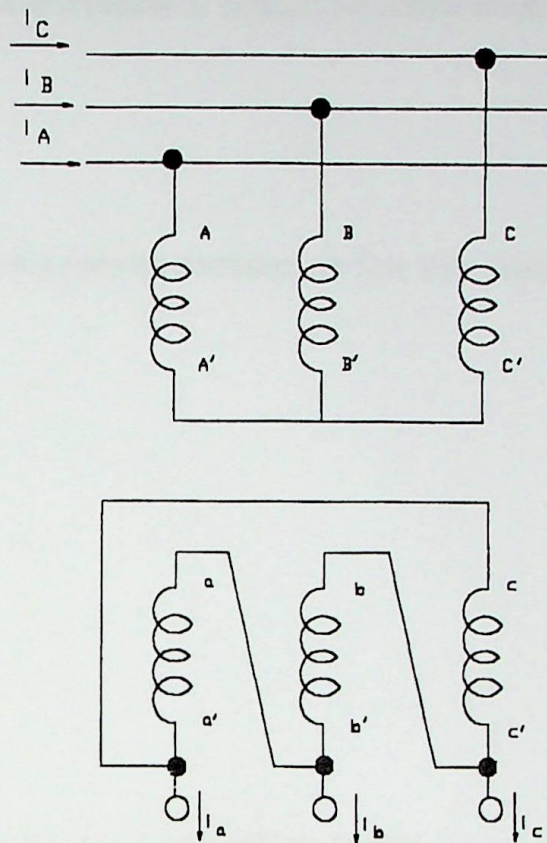


Figura 7 – Transformador com o primário ligado em estrela e o secundário ligado em triângulo.

Este caso é bastante semelhante ao caso anterior podendo-se concluir:

$$i_{aa'} = \frac{l}{3} (i_a - i_b) \quad (69)$$

$$i_{bb'} = \frac{l}{3} (i_b - i_c) \quad (70)$$

$$i_{cc'} = \frac{l}{3} (i_c - i_a) \quad (71)$$

$$i_A = i_{AA'} = \frac{l}{3} \frac{N_2}{N_1} (i_a - i_b) \quad (72)$$

$$i_B = i_{BB'} = \frac{l}{3} \frac{N_2}{N_1} (i_b - i_c) \quad (73)$$

$$i_C = i_{CC'} = \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} (i_c - i_a) \quad (74)$$

Neste transformador a relação de transformação em função da relação de espiras será:

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2} \quad (75)$$

Desta forma para as correntes de fase e de linha do primário resultam:

$$i_A = i_{AA'} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_a - i_b) \quad (76)$$

$$i_B = i_{BB'} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_b - i_c) \quad (77)$$

$$i_C = i_{CC'} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} (i_c - i_a) \quad (78)$$

## 2.4 – Transformadores trifásicos com três circuitos

Será tomado como base para análise o transformador mostrado esquematicamente na Figura 8.

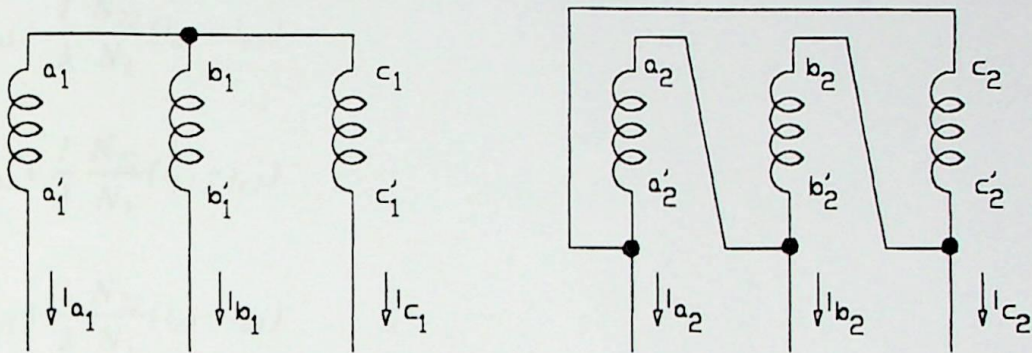
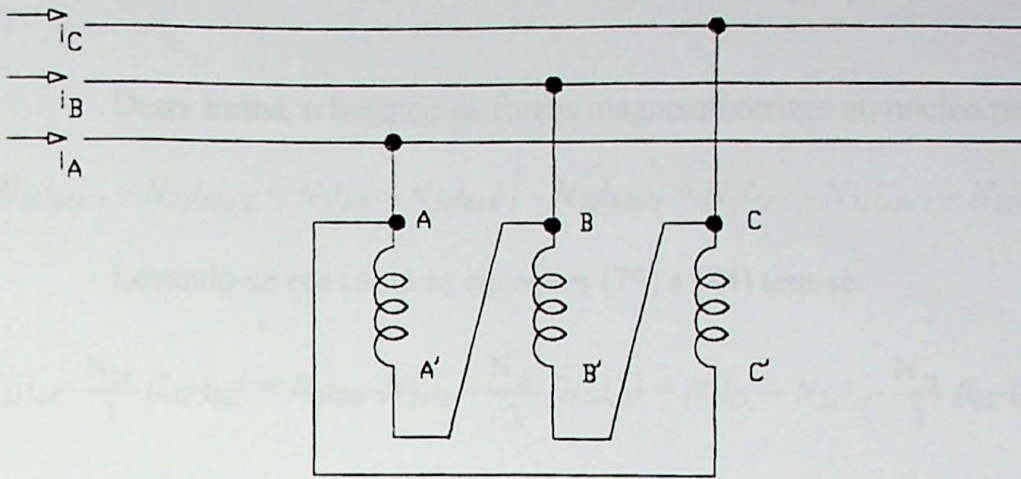


Figura 8 – Transformador trifásico com três circuitos (primário em triângulo e secundários em estrela e triângulo).

Para que o balanço de forças magnetomotrizes no núcleo do transformador seja estabelecido deve-se inicialmente determinar as correntes de fase do secundário ligado em triângulo o que já foi feito anteriormente (2.3.3).

$$i_{a_2 a'_2} = \frac{1}{3}(i_{a_2} - i_{b_2}) \quad (79)$$

$$i_{b_2 b'_2} = \frac{1}{3}(i_{b_2} - i_{c_2}) \quad (80)$$

$$i_{c_2 c'_2} = \frac{1}{3}(i_{c_2} - i_{a_2}) \quad (81)$$

No circuito secundário ligado em estrela tem-se:

$$i_{a_1 a'_1} = i_{a_1} \quad (82)$$

$$i_{b_1 b'_1} = i_{b_1} \quad (83)$$

$$i_{c'1} = i_{c1} \quad (84)$$

Desta forma, o balanço de forças magnetomotrizes no núcleo resulta:

$$N_1 i_{AA'} - N_{21} i_{a1a'1} - N_{22} i_{a2a'2} = N_1 i_{BB'} - N_{21} i_{b1b'1} - N_{22} i_{b2b'2} = N_1 i_{CC'} - N_{21} i_{c1c'1} - N_{22} i_{c2c'2} \quad (85)$$

Levando-se em conta as equações (79) a (84) tem-se:

$$N_1 i_{AA'} - N_{21} i_{a1} - \frac{N_{22}}{3} (i_{a2} - i_{b2}) = N_1 i_{BB'} - N_{21} i_{b1} - \frac{N_{22}}{3} (i_{b2} - i_{c2}) = N_1 i_{CC'} - N_{21} i_{c1} - \frac{N_{22}}{3} (i_{c2} - i_{a2}) \quad (86)$$

Obtém-se então para as correntes de fase do circuito primário.

$$i_{AA'} = \frac{N_{21}}{N_1} i_{a1} + \frac{1}{3} \frac{N_{22}}{N_1} (i_{a2} - i_{b2}) \quad (87)$$

$$i_{BB'} = \frac{N_{21}}{N_1} i_{b1} + \frac{1}{3} \frac{N_{22}}{N_1} (i_{b2} - i_{c2}) \quad (88)$$

$$i_{CC'} = \frac{N_{21}}{N_1} i_{c1} + \frac{1}{3} \frac{N_{22}}{N_1} (i_{c2} - i_{a2}) \quad (89)$$

As correntes de linha do primário do transformador serão dadas por:

$$i_A = \frac{N_{21}}{N_1} (i_{a1} - i_{c1}) + \frac{1}{3} \frac{N_{22}}{N_1} (2i_{a2} - i_{b2} - i_{c2}) \quad (90)$$

$$i_B = \frac{N_{21}}{N_1} (i_{b1} - i_{a1}) + \frac{1}{3} \frac{N_{22}}{N_1} (2i_{b2} - i_{a2} - i_{c2}) \quad (91)$$

$$i_C = \frac{N_{21}}{N_1} (i_{c1} - i_{b1}) + \frac{1}{3} \frac{N_{22}}{N_1} (i_{c2} - i_{a2} - i_{b2}) \quad (92)$$

Levando-se em conta o tipo de conexão, tem-se para as correntes de fase do circuito primário:

$$i_{AA'} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} i_{a1} + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (i_{a2} - i_{b2}) \quad (93)$$

$$i_{BB'} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} i_{b1} + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (i_{b2} - i_{c2}) \quad (94)$$

$$i_{CC'} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} i_{c1} + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (i_{c2} - i_{a2}) \quad (95)$$

Para as correntes de linha tem-se:

$$i_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} (i_{a1} - i_{c1}) + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2i_{a2} - i_{b2} - i_{c2}) \quad (96)$$

$$i_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} (i_{b1} - i_{a1}) + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2i_{b2} - i_{a2} - i_{c2}) \quad (97)$$

$$i_C = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{U_2}{U_1} (i_{c1} - i_{b1}) + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2i_{c2} - i_{a2} - i_{b2}) \quad (98)$$

Configurações dos

Conversores e Equações

Básicas

# **Configurações dos Conversores e Equações Básicas**

### 3. CONFIGURAÇÕES DOS CONVERSORES E EQUAÇÕES BÁSICAS

#### 3.1 – Introdução

Conforme já afirmado anteriormente, o comportamento das correntes dos circuitos primário e secundário do transformador de um conversor depende da corrente da carga, que por sua vez é função da configuração do conversor.

Por outro lado, a potência do transformador não depende apenas da potência da carga, porém também da configuração do conversor. O mesmo ocorre com a relação de transformação do transformador, pois sua tensão secundária é função da tensão da carga e da configuração do conversor.

Desta forma, este capítulo vai apresentar os conversores usuais e determinar tanto as formas de onda de corrente do lado de corrente alternada destes conversores, quanto estabelecer as equações das grandezas que possam auxiliar na determinação das solicitações as quais o transformador do conversor será submetido.

#### 3.2 – Conversores monofásicos

##### 3.2.1 – Conversor monofásico de meia onda com carga resistiva

###### a – Conversor não controlado

A Figura 9 mostra um conversor não controlado de meia onda alimentando uma carga de caráter resistivo.

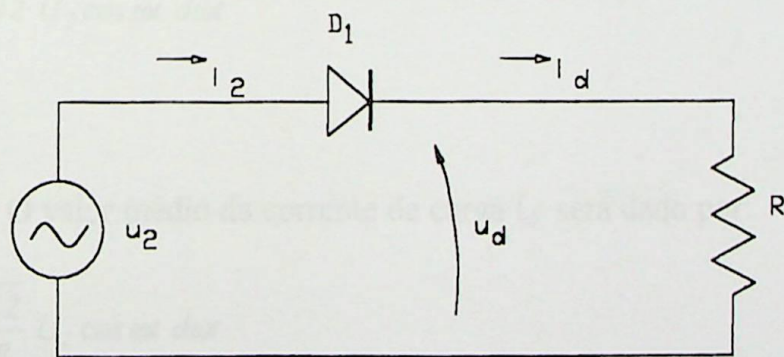


Figura 9 – Conversor não controlado monofásico de meia onda com carga resistiva.

A forma de onda da tensão  $u_d$  no lado de corrente contínua do conversor vai depender do comportamento da corrente de carga  $i_d$ , uma vez que o bloqueio do diodo  $D_1$  depende da anulação da corrente. Como a carga tem caráter resistivo  $u_d$  e  $i_d$  estão em fase.

A Figura 10 mostra os comportamentos de  $u_2$  e  $i_2$  no lado de corrente alternada e de  $u_d$  e  $i_d$  no lado de corrente contínua do conversor. Observe que  $i_2$  é igual a  $i_d$ .

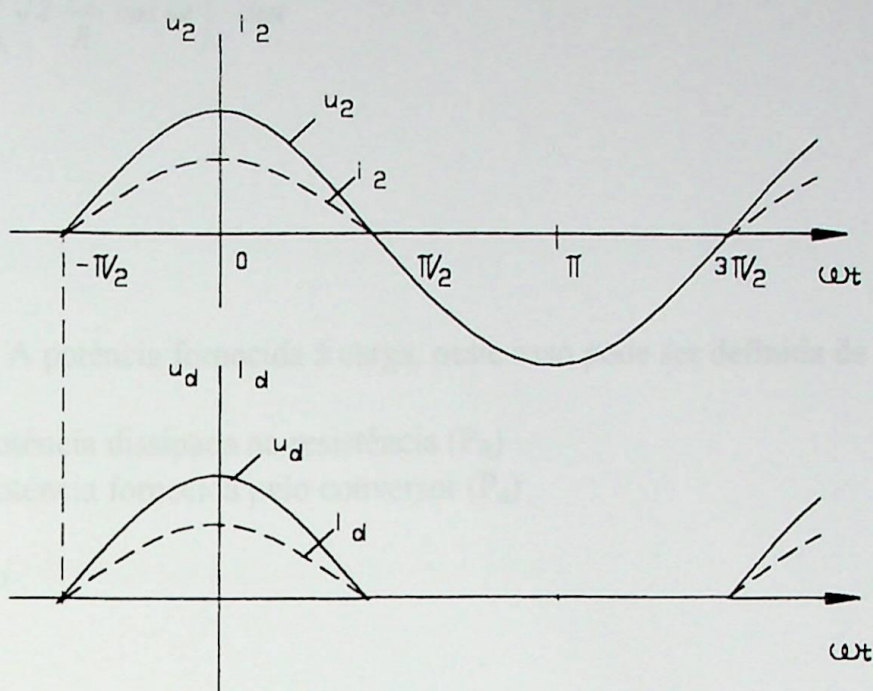


Figura 10 – Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $d_2$ ,  $u_d$  e  $i_d$  do circuito mostrado na Figura 9.

Usualmente o valor eficaz da tensão do secundário do transformador  $u_2$  é definido em função do valor médio da tensão de saída do conversor  $u_d$ .

Da Figura 10 pode-se definir a relação entre o valor médio  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$ .

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (99)$$

$$U_d = 0,45 U_2 \quad (100)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será dado por:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\sqrt{2}}{R} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (101)$$

$$I_d = 0,45 \frac{U_2}{R} \quad (102)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (103)$$

O valor eficaz da corrente no lado de corrente alternada do conversor será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 d\omega t} \quad (104)$$

que resulta:

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{2}R} \quad (105)$$

A potência fornecida à carga, neste caso pode ser definida de duas formas:

- através da potência dissipada na resistência ( $P_R$ )
- através da potência fornecida pelo conversor ( $P_d$ )

onde, neste caso

$$P_R = P_d \quad (106)$$

A potência  $P_R$  dissipada na resistência é dada por:

$$P_R = R \cdot I_{d(ef)}^2 \quad (107)$$

Como  $I_{d(ef)} = I_2$ , resulta:

$$P_R = R I_2^2 \quad (108)$$

$$P_R = \frac{U_2^2}{2R} \quad (109)$$

A potência fornecida pelo conversor é dada por:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_b^f u_d \cdot i_d dt \quad (110)$$

Dentro do período considerado tem-se:

$$u_d = u_2 = \sqrt{2} U_2 \cos \omega t$$

$$i_d = i_2 = \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t$$

Desta forma, resulta:

$$P_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right) d\omega t \quad (111)$$

$$P_d = \frac{U_2^2}{2R} \quad (112)$$

A potência aparente requisitada pelo conversor é dada por

$$S = U_2 I_2 \quad (113)$$

$$S = \frac{U_2^2}{\sqrt{2} \cdot R} \quad (114)$$

O fator de potência do conversor será:

$$F . P = \frac{P_d}{S_T} \quad (115)$$

$$F . P = \frac{U_2^2 / 2R}{U_2^2 / \sqrt{2} R} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 \quad (116)$$

### **b – Conversor controlado**

A Figura 11 mostra um conversor controlado monofásico de meia onda alimentando uma carga de caráter resistivo.

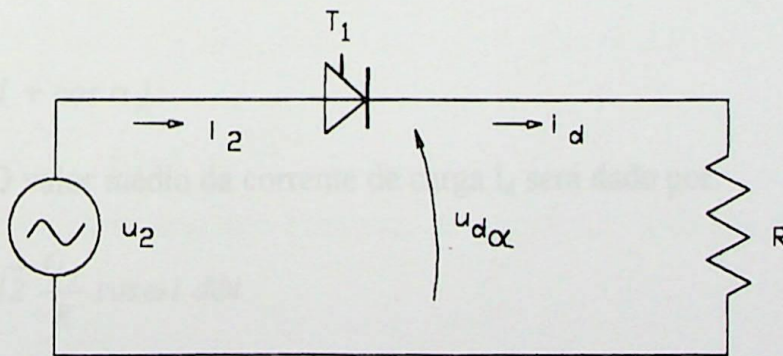


Figura 11 – Conversor controlado monofásico de meia onda com carga resistiva.

A forma de onda da tensão  $U_{d\alpha}$  no lado de corrente contínua do conversor vai depender do comportamento da corrente de carga  $i_d$  e do ângulo de disparo  $\alpha$  (que é contado a partir do instante no qual um diodo no lugar do tiristor entraria em condução).

A Figura 12 mostra os comportamentos de  $u_2$  e  $i_2$  no lado de corrente alternada e de  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  no lado de corrente contínua do conversor. Do mesmo modo que anteriormente,  $i_2$  é igual a  $i_d$ .

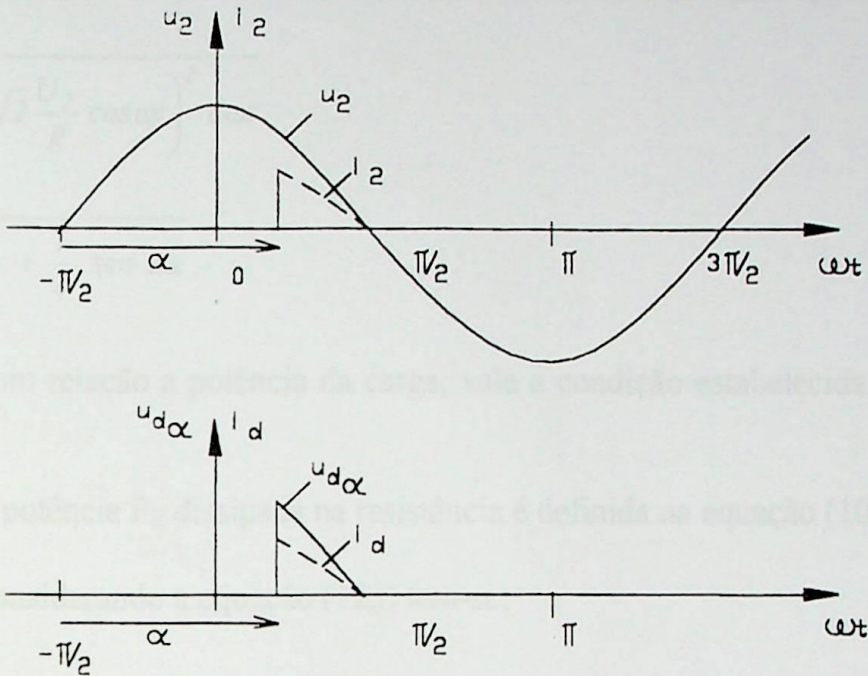


Figura 12 – Comportamento das grandezas  $U_2$ ,  $i_2$ ,  $U_{d\alpha}$  e  $i_d$  do circuito mostrado na Figura 11.

A relação entre o valor médio  $U_{d\alpha}$  e o valor eficaz  $U_2$  é obtida a partir de:

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (117)$$

$$U_{d\alpha} = 0,225 U_2 (1 + \cos \alpha) \quad (118)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será dado por:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \, d\omega t \quad (119)$$

$$I_d = 0,225 \frac{U_2}{R} (1 + \cos \alpha) \quad (120)$$

ou ainda

$$I_d = \frac{U_{d\alpha}}{R} \quad (121)$$

O valor eficaz da corrente do secundário do transformador  $I_2$  será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{l}{2\pi} \int_{\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 d\omega t} \quad (122)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{l}{4} \text{sen } 2\alpha} \quad (123)$$

Com relação a potência da carga, vale a condição estabelecida na equação (106).

A potência  $P_R$  dissipada na resistência é definida na equação (108).

Considerando a equação (123) tem-se:

$$P_R = \frac{U_2^2}{R \cdot \pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{l}{4} \text{sen } 2\alpha \right) \quad (124)$$

A potência  $P_d$  fornecida pelo conversor é definida pela equação (110).

$$P_d = \frac{l}{2\pi} \int_{\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right) d\omega t \quad (125)$$

resultando:

$$P_d = \frac{U_2^2}{R \cdot \pi} \left( \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{l}{4} \text{sen } 2\alpha \right) \quad (126)$$

A potência aparente fornecida ao conversor, definida pela equação (113), será:

$$S = \frac{U_2^2}{R \cdot \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{l}{4} \text{sen } 2\alpha} \quad (127)$$

O fator de potência, definido pela equação (115) resultará:

$$\text{F.P} = 0,565 \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{l}{4} \text{sen } 2\alpha} \quad (128)$$

### 3.2.2 – Conversor ligado em ponte monofásica com carga resistiva

#### a – Conversor não controlado

A Figura 13 mostra um conversor não controlado ligado em ponte monofásica.

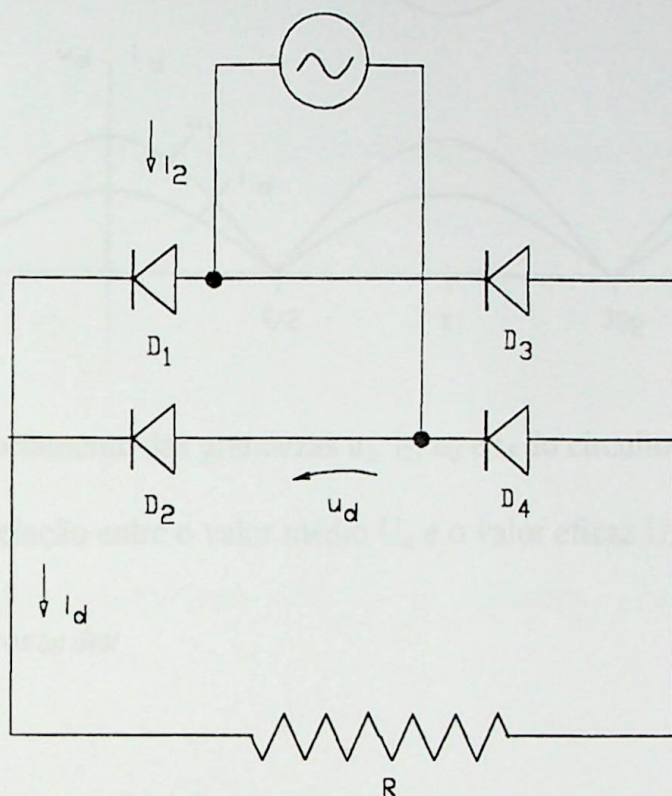


Figura 13 – Conversor não controlado ligado em ponte monofásica com carga resistiva.

A Figura 14 mostra os comportamentos de  $u_2$  e  $i_2$  no lado de corrente alternada e de  $u_d$  e  $i_d$  no lado de corrente contínua do conversor.

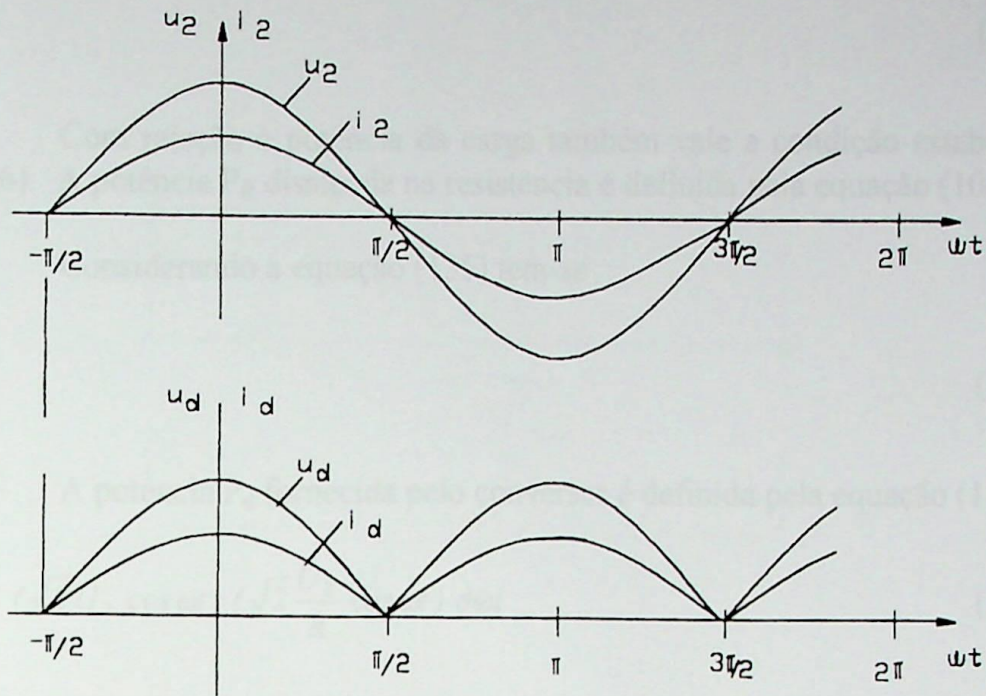


Figura 14 – Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_d$  e  $i_d$  do circuito mostrado na Figura 13.

A relação entre o valor médio  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$  é obtida a partir de

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (129)$$

$$U_d = 0,9 U_2 \quad (130)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \, d\omega t \quad (131)$$

$$I_d = \frac{0,9 U_2}{R} \quad (132)$$

ou ainda

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (133)$$

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador  $I_2$  será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 \, d\omega t} \quad (134)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R} \quad (135)$$

Com relação à potência da carga também vale a condição estabelecida na equação (106). A potência  $P_R$  dissipada na resistência é definida pela equação (108).

Considerando a equação (135) tem-se

$$P_R = \frac{U_2^2}{R} \quad (136)$$

A potência  $P_d$  fornecida pelo conversor é definida pela equação (110)

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right) d\omega t \quad (137)$$

resultando

$$P_d = \frac{U_2^2}{R} \quad (138)$$

A potência aparente fornecida ao conversor, definida pela equação (113) será:

$$S = \frac{U_2^2}{R} \quad (139)$$

O fator de potência será

$$F.P = \frac{\frac{U_2^2}{R}}{\frac{U_2^2}{R}} = 1 \quad (140)$$

### **b – Conversor controlado**

A Figura 15 mostra o conversor controlado ligado em ponte monofásica.

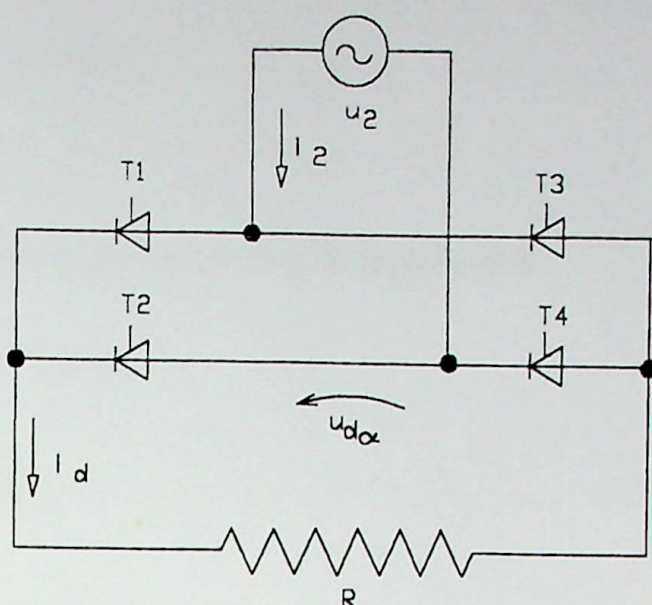


Figura 15 – Conversor controlado ligado em ponte monofásica com carga resistiva.

A forma de onda da tensão  $u_{d\alpha}$  no lado de corrente contínua do conversor vai depender do comportamento da corrente de carga  $i_d$  e do ângulo de disparo  $\alpha$ .

A Figura 16 mostra os comportamentos de  $u_2$  e  $i_2$  no lado de corrente alternada e de  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  no lado de corrente contínua do conversor.

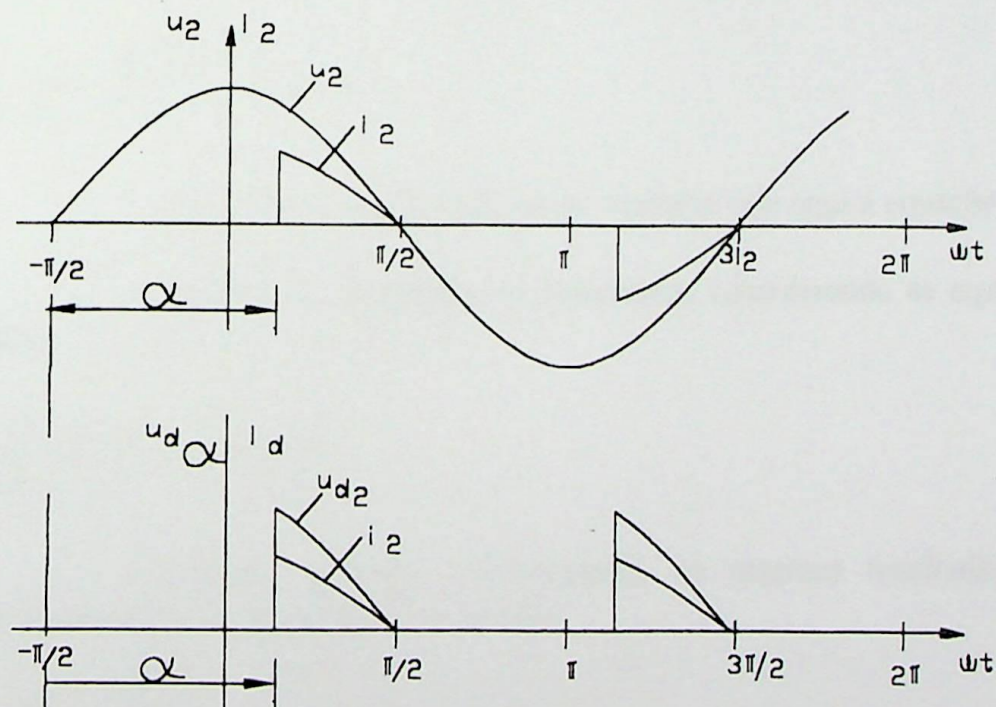


Figura 16 – Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  conforme circuito da Figura 15.

A relação entre o valor médio  $U_{d\alpha}$  e o valor eficaz  $U_2$  é dada por:

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t d\omega t \quad (141)$$

$$U_{d\alpha} = 0,45 U_2 (1 + \cos \alpha) \quad (142)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t d\omega t \quad (143)$$

$$I_d = \frac{0,45 U_2 (1 + \cos \alpha)}{R} \quad (144)$$

ou ainda

$$I_d = \frac{U_{d\alpha}}{R} \quad (145)$$

O valor eficaz da corrente do secundário do transformador  $I_2$  será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 d\omega t} \quad (146)$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{R \cdot \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \text{sen } 2\alpha} \quad (147)$$

Com relação a potência da carga, também vale aqui a equação (106).

A potência  $P_R$  dissipada na resistência, considerando as equações (108) e (147) será:

$$P_R = \frac{2U_2^2}{R \cdot \pi} \left[ \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \text{sen } 2\alpha \right] \quad (148)$$

Conforme mostrado anteriormente, os mesmos resultados valem para potência fornecida pelo conversor ( $P_d$ ), ou seja:

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2+\alpha}^{+\pi/2} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right) d\omega t \quad (149)$$

resultando:

$$P_d = \frac{2U_2^2}{R\pi} \left[ \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \text{sen } 2\alpha \right] \quad (150)$$

A potência aparente fornecida ao conversor será:

$$S = 0,798 \frac{U_2^2}{R} \left[ \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \text{sen } 2\alpha \right] \quad (151)$$

$$F.P = 0,798 \left[ \frac{\pi - \alpha}{2} + \frac{1}{4} \text{sen } 2\alpha \right] \quad (152)$$

### 3.2.3 – Conversor ligado em ponte monofásica com carga indutiva

#### a – Conversor não controlado

A Figura 17 mostra um conversor não controlado ligado em ponte monofásica. A carga é bastante indutiva ( $L \gg R$ ).

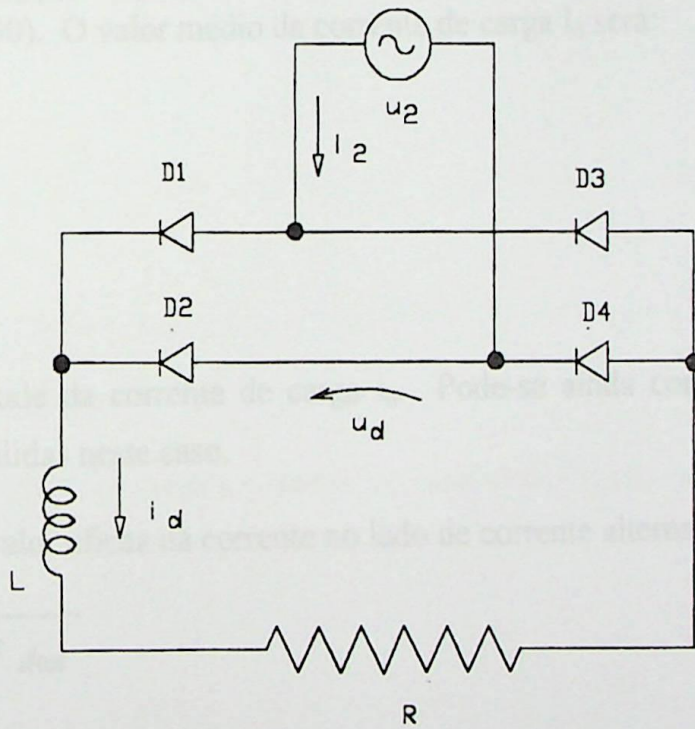


Figura 17 – Conversor não controlado ligado em ponte monofásica com carga indutiva.

A Figura 18 mostra os comportamentos de  $u_2$  e  $i_2$  no lado da corrente alternada e de  $u_d$  e  $i_d$  no lado de corrente contínua do conversor, em regime permanente.

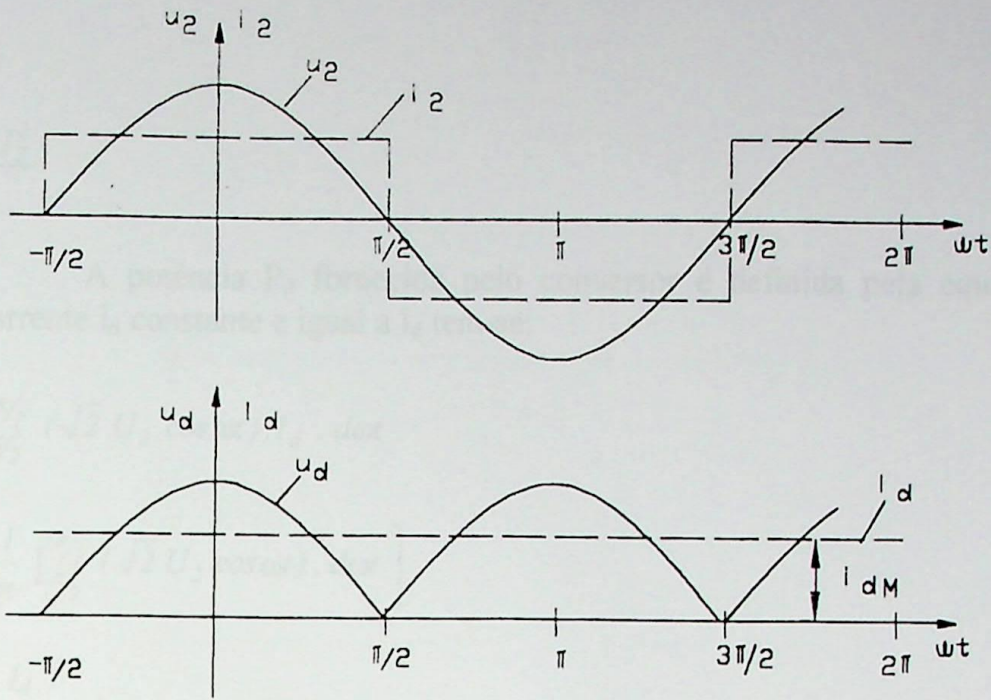


Figura 18 – Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_d$  e  $i_d$ , em regime permanente, do circuito mostrado na Figura 17.

A relação entre o valor médio  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$  é fornecido pelas equações (129) e (130). O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} I_{dM} d\omega t \quad (153)$$

$$I_d = I_{dM} \quad (154)$$

sendo  $I_{dM}$  a amplitude da corrente de carga  $i_d$ . Pode-se ainda concluir que as equações (132) e (133) são válidas neste caso.

O valor eficaz da corrente no lado de corrente alternada do conversor será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} (I_{dM})^2 d\omega t} \quad (155)$$

$$I_2 = I_{dM} \quad (156)$$

$$I_2 = \frac{0,9U_2}{R} \quad (157)$$

Com relação a potência da carga vale também a condição estabelecida na equação (106). A potência dissipada na resistência é definida pela equação (108). Considerando as equações (156) e (157) resulta:

$$P_R = R I_d^2 \quad (158)$$

$$P_R = \frac{0,81U_2^2}{R} \quad (159)$$

A potência  $P_d$  fornecida pelo conversor é definida pela equação (110). Sendo a corrente  $i_d$  constante e igual a  $I_d$  tem-se:

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \cdot I_d \cdot d\omega t \quad (160)$$

$$P_d = I_d \cdot \left[ \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) \cdot d\omega t \right] \quad (161)$$

$$P_d = U_d \cdot I_d \quad (162)$$

$$P_d = 0,9 U_2 I_2 \quad (163)$$

A potência aparente fornecida ao conversor será:

$$S = \frac{U_d}{0,9} \cdot I_d = 1,11 U_d \cdot I_d \quad (164)$$

$$S_T = 1,11 P_d \quad (165)$$

$$F.P. = \frac{P_d}{1,11 P_d} = 0,9 \quad (166)$$

### **b – Conversor controlado**

A Figura 19 mostra o conversor controlado ligado em ponte monofásica. A carga é indutiva ( $L \gg R$ ).

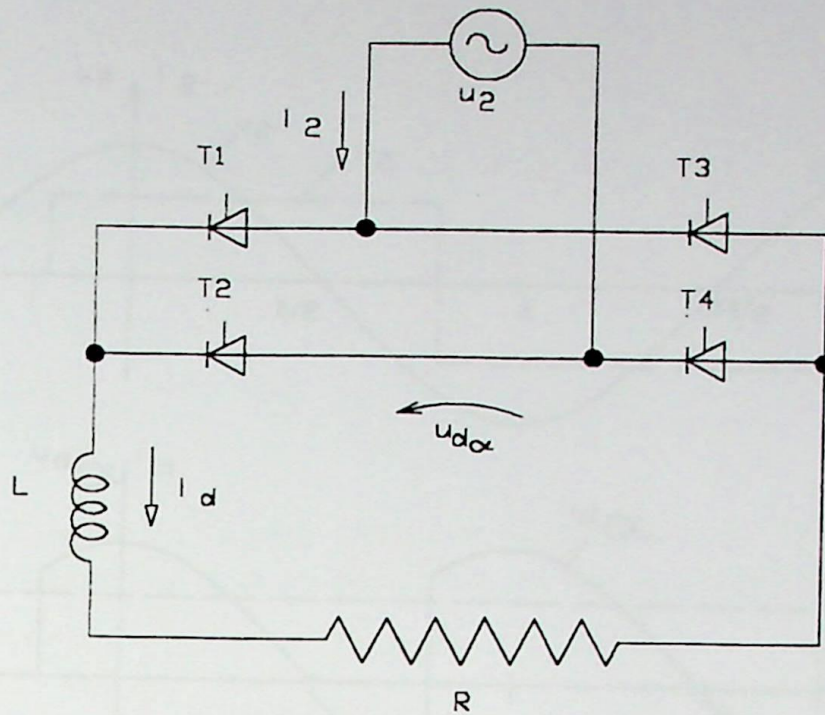


Figura 19 – Conversor controlado ligado em ponte monofásica com carga indutiva ( $L \gg R$ ).

A forma de onda da tensão  $u_{d\alpha}$  no lado de corrente contínua do conversor vai depender do comportamento da corrente  $i_d$ , que é alisada e do ângulo de disparo  $\alpha$ .

A Figura 20 mostra os comportamentos de  $u_2$  e  $i_2$  no lado de corrente alternada e de  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  no lado de corrente contínua do conversor para  $\alpha < 90^\circ$ , situação para qual não ocorre intermitência de corrente.

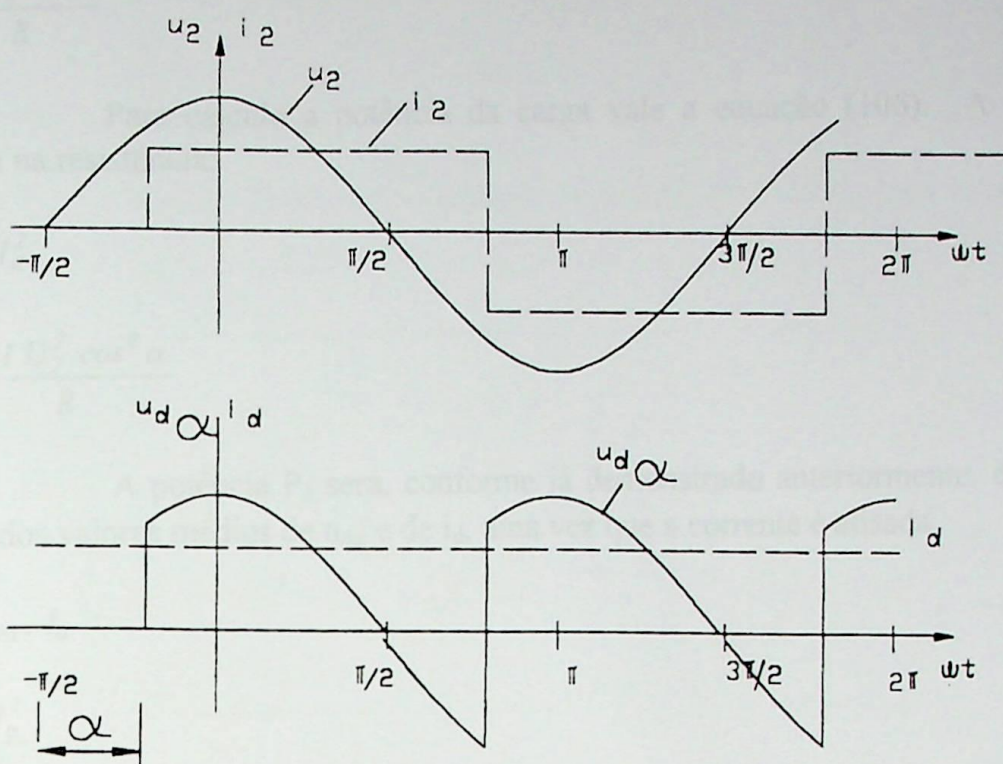


Figura 20 – Comportamento das grandezas  $u_2$ ,  $i_2$ ,  $u_{d\alpha}$  e  $i_d$  para  $\alpha < 90^\circ$ , conforme circuito mostrado na Figura 19.

A relação entre o valor médio  $U_{d\alpha}$  e o valor eficaz  $U_2$  é dada por:

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/2+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (167)$$

$$U_{d\alpha} = 0,9 U_2 \cos \alpha \quad (168)$$

O valor médio da corrente de carga

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/2+\alpha}^{\pi/2+\alpha} I_{d(M)} \, d\omega t \quad (169)$$

$$I_d = I_{dM} \quad (170)$$

Pode-se ainda concluir que as equações (132) e (133) são válidas neste caso.

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador  $I_2$  será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/2+\alpha}^{\pi/2+\alpha} (I_{dM})^2 \, d\omega t} \quad (171)$$

$$I_2 = I_d \quad (172)$$

$$I_2 = \frac{0,9U_2 \cos \alpha}{R} \quad (173)$$

Para cálculo a potência da carga vale a equação (106). A potência  $P_R$  dissipada na resistência:

$$P_R = R I_d^2 \quad (174)$$

$$P_R = \frac{0,81 U_2^2 \cos^2 \alpha}{R} \quad (175)$$

A potência  $P_d$  será, conforme já demonstrado anteriormente, definida pelo produto dos valores médios de  $u_{d\alpha}$  e de  $i_d$ , uma vez que a corrente é alisada.

$$P_d = U_{d\alpha} \cdot I_d \quad (176)$$

$$P_d = \frac{U d_\alpha^2}{R} \quad (177)$$

$$P_d = \frac{0,81 U_2^2 \cos^2 \alpha}{R} \quad (178)$$

A potência aparente fornecida ao conversor, será:

$$S = \frac{U_{d\alpha}}{0,9 \cos \alpha} \cdot I_d = 1,11 \frac{U_{d\alpha} \cdot I_d}{\cos \alpha} \quad (179)$$

O fator de potência será:

$$F.P. = \frac{P_d}{U_2 I_2} = 0,9 \cdot \cos \alpha \quad (180)$$

### 3.3 – Conversores trifásicos

Na análise a seguir para conversores trifásicos, será desprezado o efeito da comutação, ou seja, será admitido que a comutação de um par de diodos (ou tiristores) para o outro ocorre de forma instantânea.

### 3.3.1 – Conversor trifásico ligado em estrela, com carga indutiva

#### a – Conversor não controlado

A Figura 21 mostra o conversor ligado em estrela com carga indutiva ( $L \gg R$ )

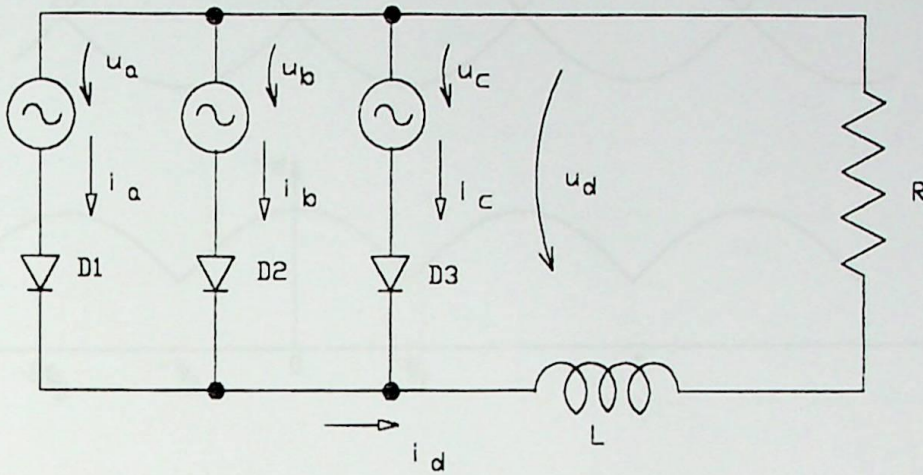


Figura 21 – Conversor não controlado ligado em estrela com carga indutiva.

A Figura 22 mostra as formas de onda das tensões no secundário do transformador ( $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ ) e no lado de corrente contínua do conversor ( $u_d$ ).

As tensões de fase de alimentação do conversor são definidas por:

$$u_a = \sqrt{2} U_{2f} \cos \omega t \quad (181)$$

$$u_b = \sqrt{2} U_{2f} \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (182)$$

$$u_c = \sqrt{2} U_{2f} \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (183)$$

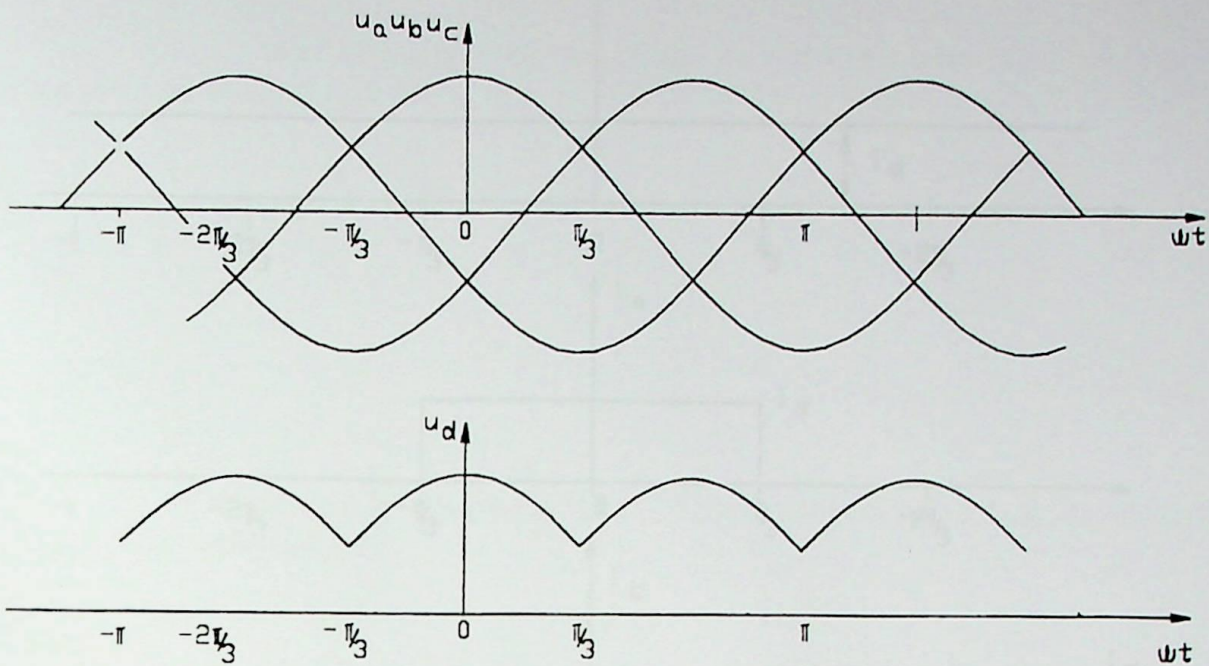


Figura 22 – Comportamento das tensões no lado de corrente alternada da tensão e no lado de corrente contínua do conversor.

Com base na Figura 22 pode-se determinar o comportamento da corrente  $i_d$  de carga (alisada) e das correntes no lado de corrente alternada do conversor  $i_a$ ,  $i_b$ , e  $i_c$ , mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Comportamento da corrente de carga  $i_d$  e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$  é dada por:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U_2 \sqrt{3} \cos \alpha \, d\omega t \quad (184)$$

$$U_d = 1,17 U_2 \cos \alpha \quad (185)$$

Em relação à tensão de linha  $U_L$ , tem-se:

$$U_d = 0,87 U_L \cos \alpha \quad (186)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  é:

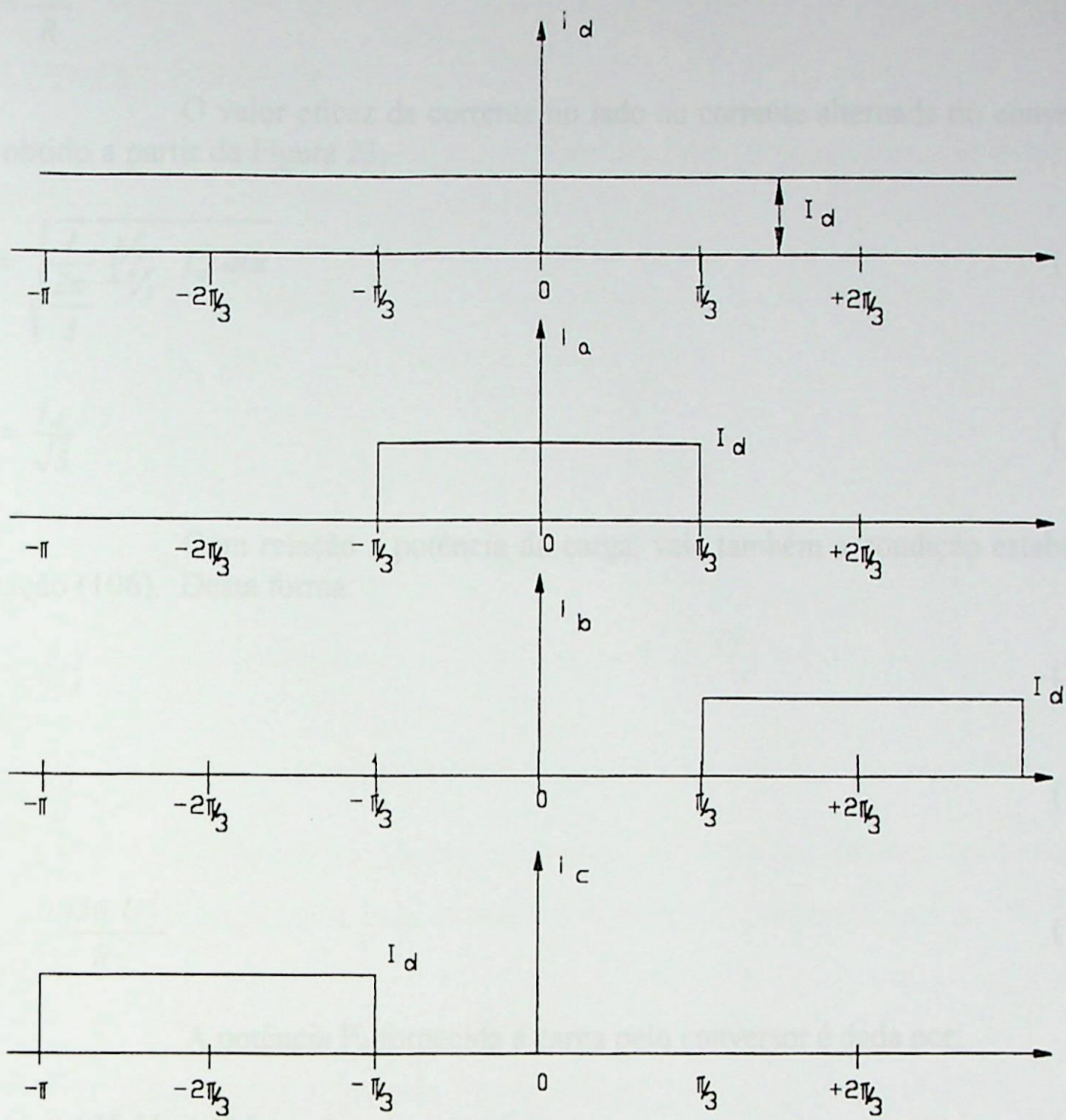


Figura 23 – Comportamento da corrente de carga  $i_d$  e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio de tensão  $U_d$  e o valor eficaz  $U_{2f}$  é dada por:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \sqrt{2} U_{2f} \cos \omega t \, d\omega t \quad (184)$$

$$U_d = 1,17 U_{2f} \quad (185)$$

Em relação à tensão de linha  $U_2$ , tem-se:

$$U_d = 0,675 U_2 \quad (186)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (187)$$

O valor eficaz da corrente no lado de corrente alternada do conversor pode ser obtido a partir da Figura 23.

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_d^2 d\omega t} \quad (188)$$

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \quad (189)$$

Com relação a potência da carga, vale também a condição estabelecida na equação (106). Desta forma:

$$P_R = RI_d^2 \quad (190)$$

$$P_R = \frac{U_d^2}{R} \quad (191)$$

$$P_R = \frac{0,456 U_2^2}{R} \quad (192)$$

A potência  $P_d$  fornecida à carga pelo conversor é dada por:

$$P_d = 0,675 U_2 \cdot \sqrt{3} I_2 \quad (193)$$

$$P_d = 1,17 U_2 I_2 \quad (194)$$

A potência aparente fornecida ao conversor será:

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (195)$$

$$S = 1,482 U_d I_d \quad (196)$$

$$S = 1,482 P_d \quad (197)$$

O fator de potência do conversor

$$F.P. = \frac{P_d}{1,482 P_d} = 0,675 \quad (198)$$

## b – Conversor controlado

A Figura 24 mostra o conversor ligado em estrela com carga indutiva ( $L \gg R$ ).

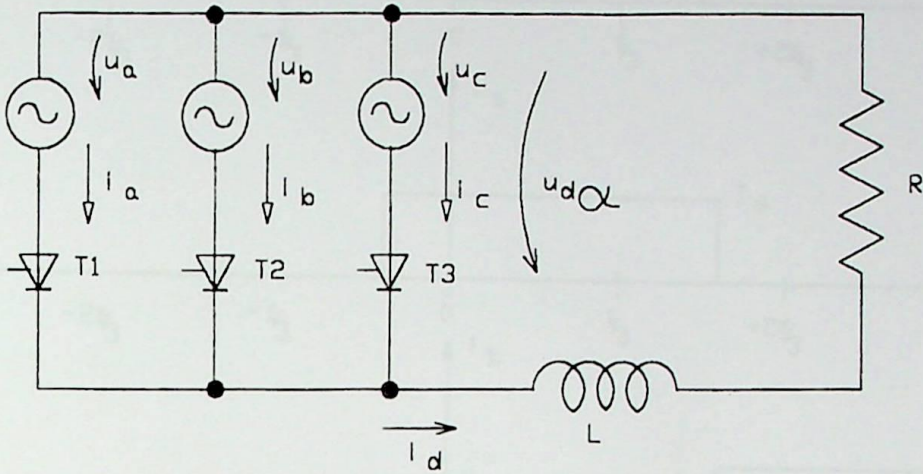


Figura 24 – Conversor controlado ligado em estrela com carga indutiva.

A Figura 25 mostra as formas de onda das tensões no secundário do transformador ( $u_a, u_b, u_c$ ) e no lado de corrente contínua do conversor para  $\alpha < 90^\circ$ .

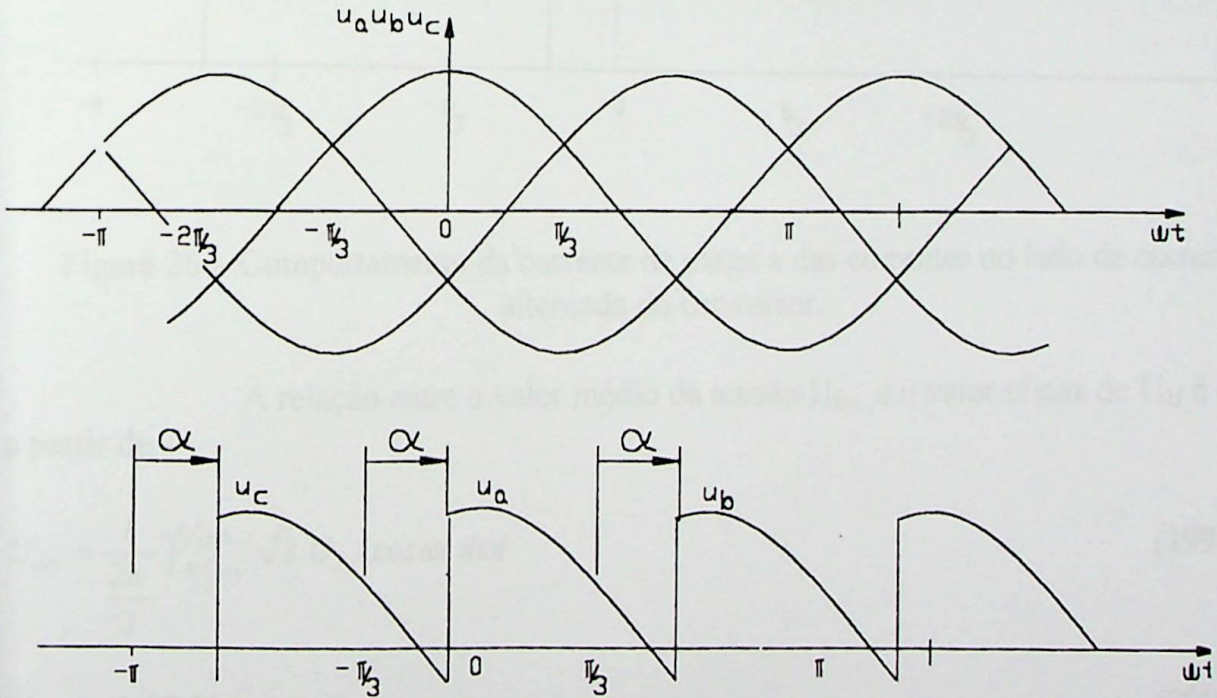


Figura 25 – Formas de onda das tensões de fase no lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor.

As correntes no lado de corrente contínua  $i_d$  e no lado de corrente alternada do conversor estão indicadas na Figura 26.

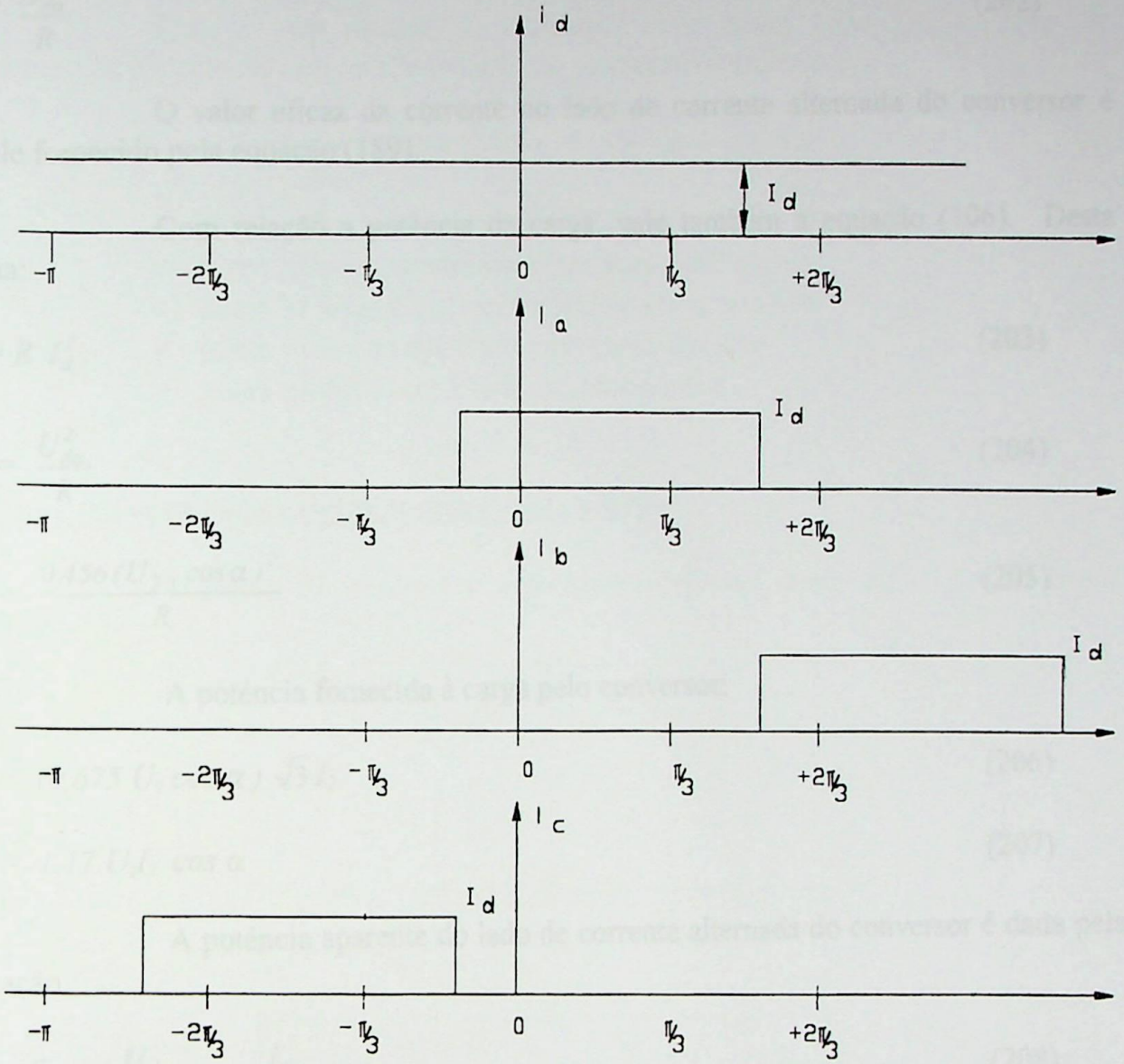


Figura 26 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_{d\alpha}$  e o valor eficaz de  $U_{2f}$  é obtido a partir de

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi/3+\alpha} \sqrt{2} U_{2f} \cos \omega t \, d\omega t \quad (199)$$

$$U_{d\alpha} = 1,17 U_{2f} \cos \alpha \quad (200)$$

ou, em relação à tensão de linha

$$U_{d\alpha} = 0,675 U_2 \cos \alpha \quad (201)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será

$$I_d = \frac{U_{d\alpha}}{R} \quad (202)$$

O valor eficaz da corrente no lado de corrente alternada do conversor é aquele fornecido pela equação (189).

Com relação a potência da carga, vale também a equação (106). Desta forma:

$$P_R = R I_d^2 \quad (203)$$

$$P_R = \frac{U_{d\alpha}^2}{R} \quad (204)$$

$$P_R = \frac{0,456 (U_2 \cdot \cos \alpha)^2}{R} \quad (205)$$

A potência fornecida à carga pelo conversor:

$$P_d = (0,675 U_2 \cos \alpha) \sqrt{3} I_2 \quad (206)$$

$$P_d = 1,17 U_2 I_2 \cos \alpha \quad (207)$$

A potência aparente do lado de corrente alternada do conversor é dada pela equação

$$S = \sqrt{3} \frac{U_{d\alpha}}{(0,675 \cos \alpha)} \cdot \frac{I_d}{\sqrt{3}} \quad (208)$$

$$S = 1,482 \frac{P_d}{\cos \alpha} \quad (209)$$

Quanto ao fator de potência no lado de corrente alternada do conversor , tem-se

$$F.P. = 0,675 \cos \alpha \quad (210)$$

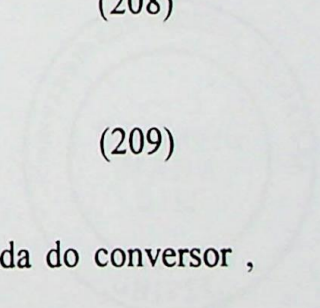
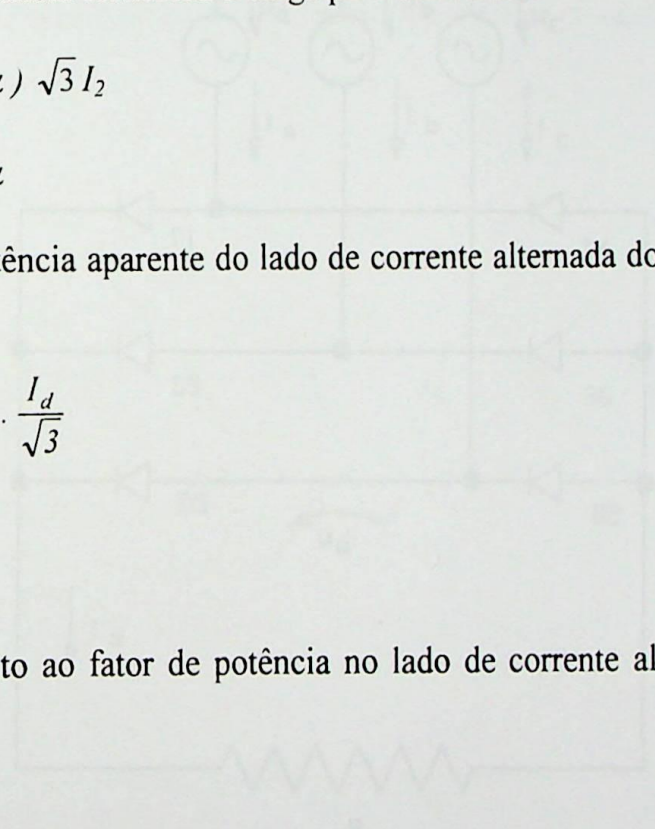


Figura 27 - Conversor não controlado ligado em ponte trífase com carga resistiva. A forma de operação de ponte trífase faz com que sempre dois componentes (diodos ou tiristores) estejam em condução. Sem considerar o efeito da comutação, sobre a carga sempre estará aplicada a tensão entre fases, ou seja, a tensão de linha.

### 3.3.2 – Conversor ligado em ponte trifásica

Trata-se sem dúvida do conversor mais usado tanto em sistemas de suprimento de energia, quanto na alimentação de acionamentos elétricos.

Desta forma, serão abordados diversos casos, a saber:

- ponte trifásica não controlada com carga resistiva
- ponte trifásica controlada com carga resistiva
- ponte trifásica não controlada com carga indutiva
- ponte trifásica controlada com carga indutiva
- ponte trifásica controlada com carga ativa

#### a – Ponte trifásica não controlada com carga resistiva

A Figura 27 mostra um conversor ligado em ponte trifásica com carga resistiva.

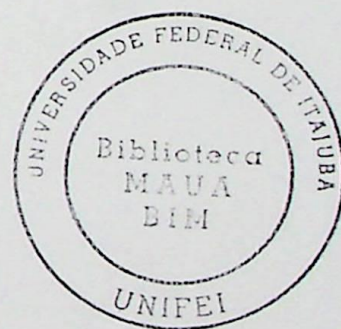
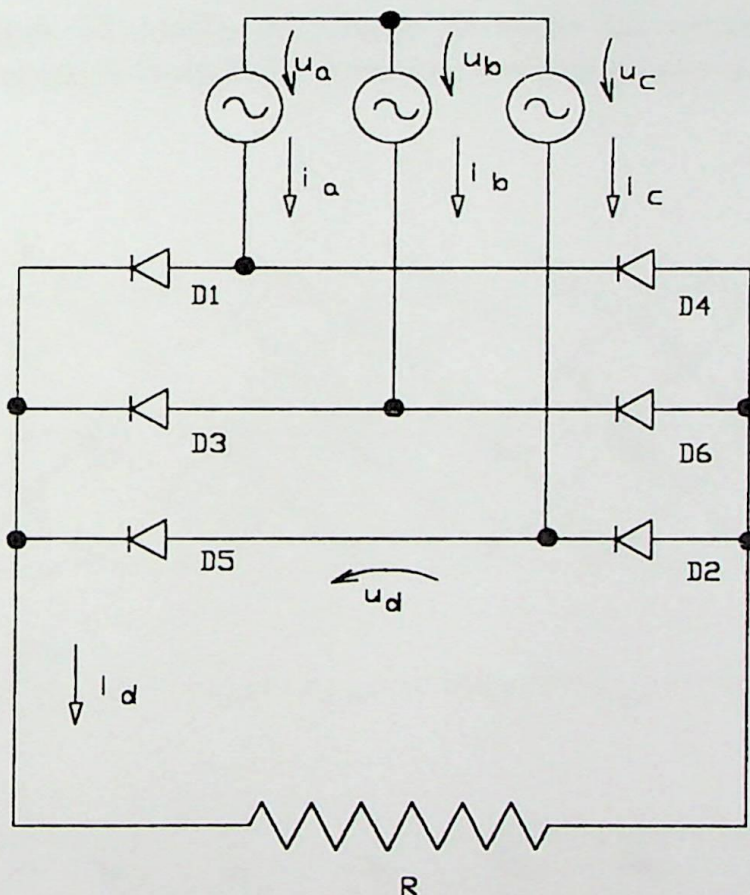


Figura 27 – Conversor não controlado ligado em ponte trifásica com carga resistiva.

A forma de operação da ponte trifásica faz com que sempre dois componentes (diodos ou tiristores) estejam em condução.

Sem considerar o efeito da comutação, sobre a carga sempre estará aplicada a tensão entre fases, ou seja, a tensão de linha.

Para a análise a seguir serão adotadas as seguintes tensões de linha:

$$u_{ab} = \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \quad (211)$$

$$u_{ac} = \sqrt{2} U_2 \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{3} \right) \quad (212)$$

$$u_{bc} = \sqrt{2} U_2 \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (213)$$

$$u_{ba} = \sqrt{2} U_2 \cos (\omega t - \pi) \quad (214)$$

$$u_{ca} = \sqrt{2} U_2 \cos \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (215)$$

$$u_{cb} = \sqrt{2} U_2 \cos \left( \omega t - \frac{5\pi}{3} \right) \quad (216)$$

A Figura 28 mostra as formas de onda das tensões de linha no lado de corrente alternada da tensão e no lado de corrente contínua do conversor.

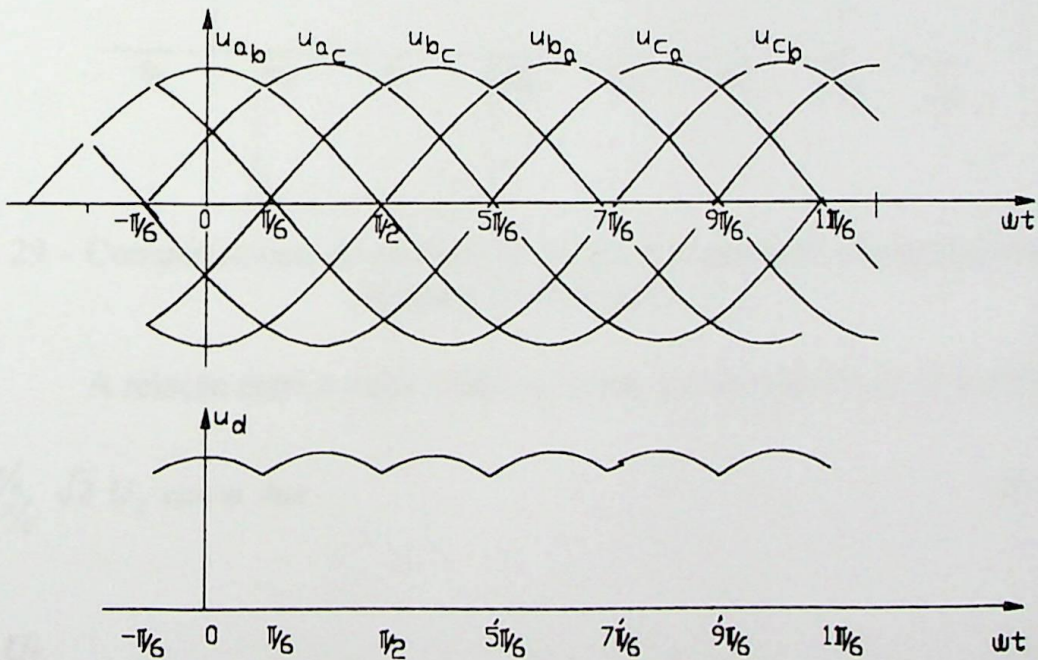


Figura 28 – Formas de onda das tensões de linha no lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor.

Com base na Figura 28 pode-se determinar o comportamento da corrente  $i_d$  de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

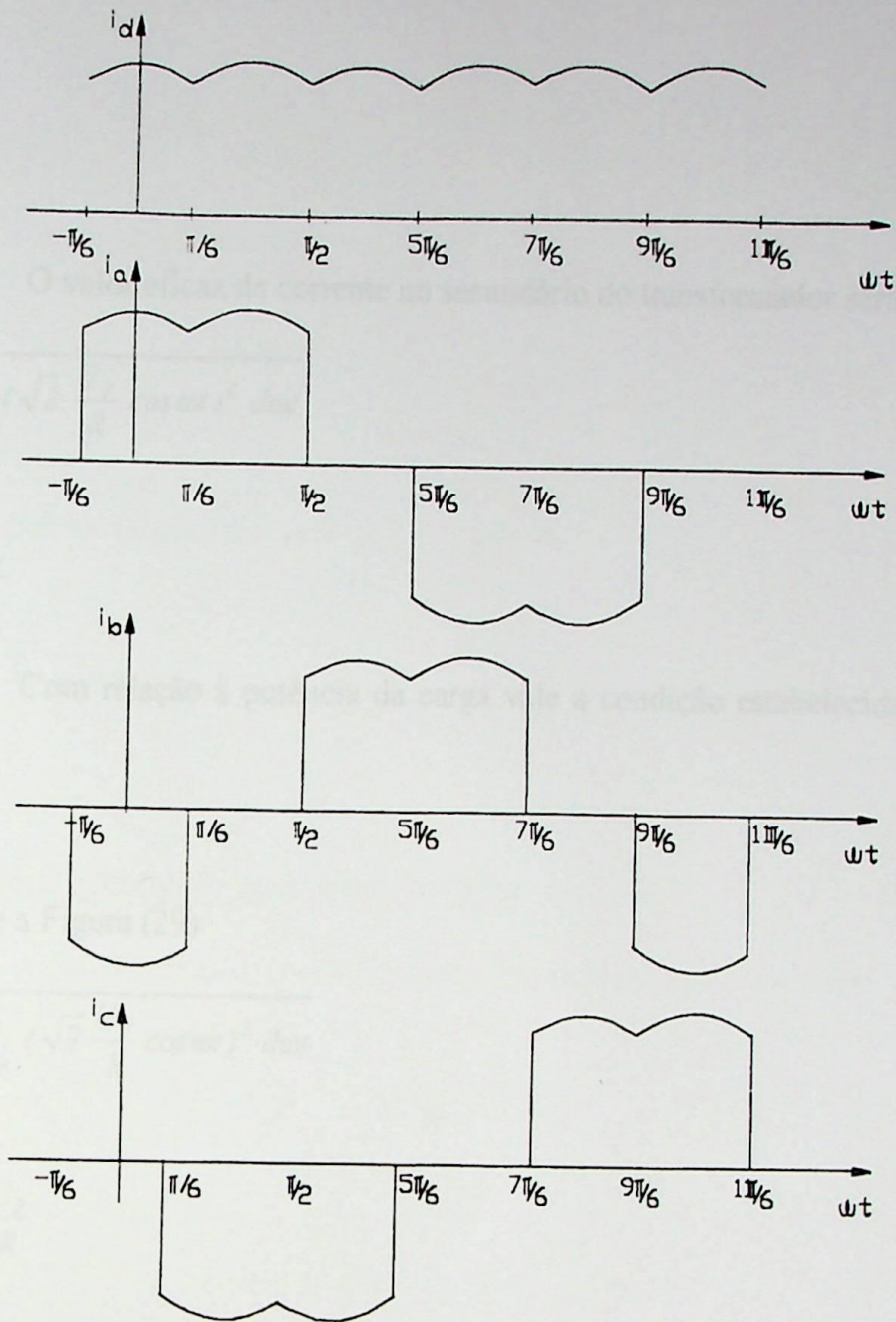


Figura 29 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$  é obtido:

$$U_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (217)$$

$$U_d = 1,35 U_2 \quad (218)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será:

$$I_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \, d\omega t \quad (219)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (220)$$

$$I_d = \frac{1,35 U_2}{R} \quad (221)$$

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 d\omega t} \quad (222)$$

$$I_2 = 1,104 \frac{U_2}{R} \quad (223)$$

Com relação à potência da carga vale a condição estabelecida na equação (106)

$$P_R = R I_{d(ef)}^2 \quad (224)$$

onde, conforme a Figura (29)

$$I_{d(ef)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 d\omega t} \quad (225)$$

$$I_{d(ef)} = 1,352 \frac{U_2}{R} \quad (226)$$

resultando então:

$$P_R = 1,827 \frac{U_2^2}{R} \quad (227)$$

Para potência  $P_d$ , tem-se

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left( \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \right) \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right) d\omega t \quad (228)$$

$$P_d = 1,827 \frac{U_2^2}{R} \quad (229)$$

A potência aparente fornecida ao conversor:

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (230)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot \frac{U_d}{1,35} 0,818 I_d \quad (231)$$

$$S = 1,05 \frac{U_d^2}{R} \quad (232)$$

$$S = 1,914 \frac{U_2^2}{R} \quad (233)$$

O fator de potência será

$$F.P. = \frac{1,827 \frac{U_2^2}{R}}{1,914 \frac{U_2^2}{R}} = 0,955 \quad (234)$$

### b – Ponte trifásica controlada com carga resistiva

A Figura 30 mostra um conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga resistiva.

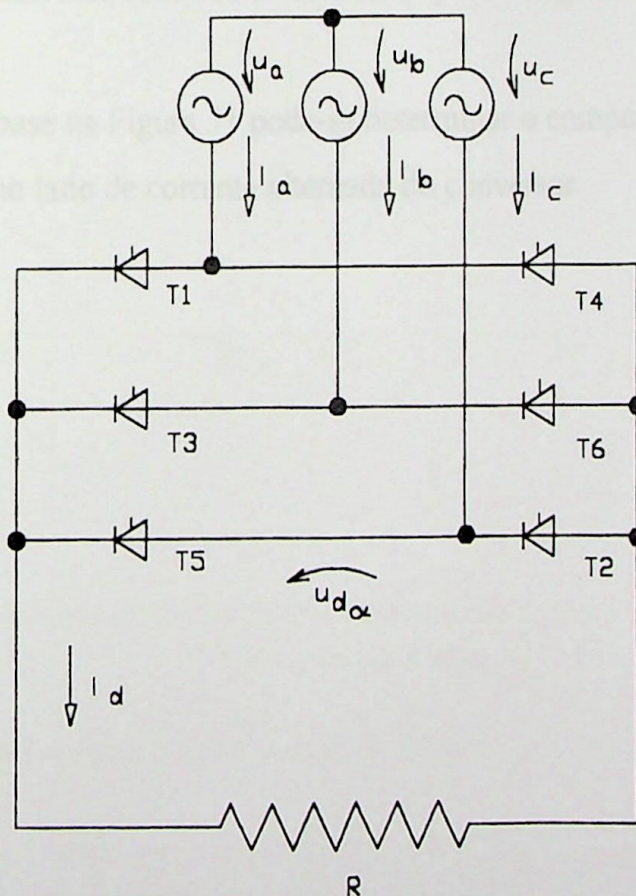


Figura 30 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga resistiva.

A Figura 31 mostra as formas de onda das tensões de linha do secundário do transformador e da tensão no lado de corrente contínua do conversor para o ângulo de disparo  $\alpha$ .

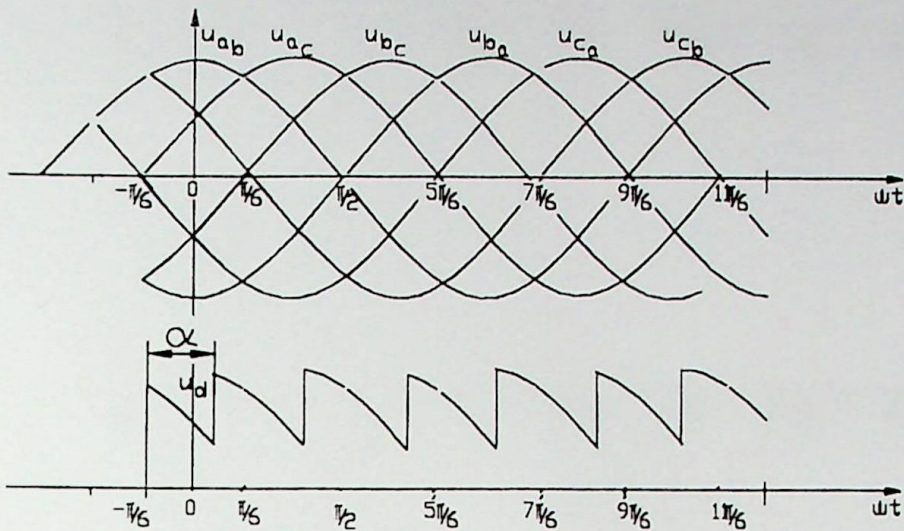


Figura 31 – Formas de onda das tensões de linha no lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor para o ângulo de disparo  $\alpha$ .

Com base na Figura 31 pode-se determinar o comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

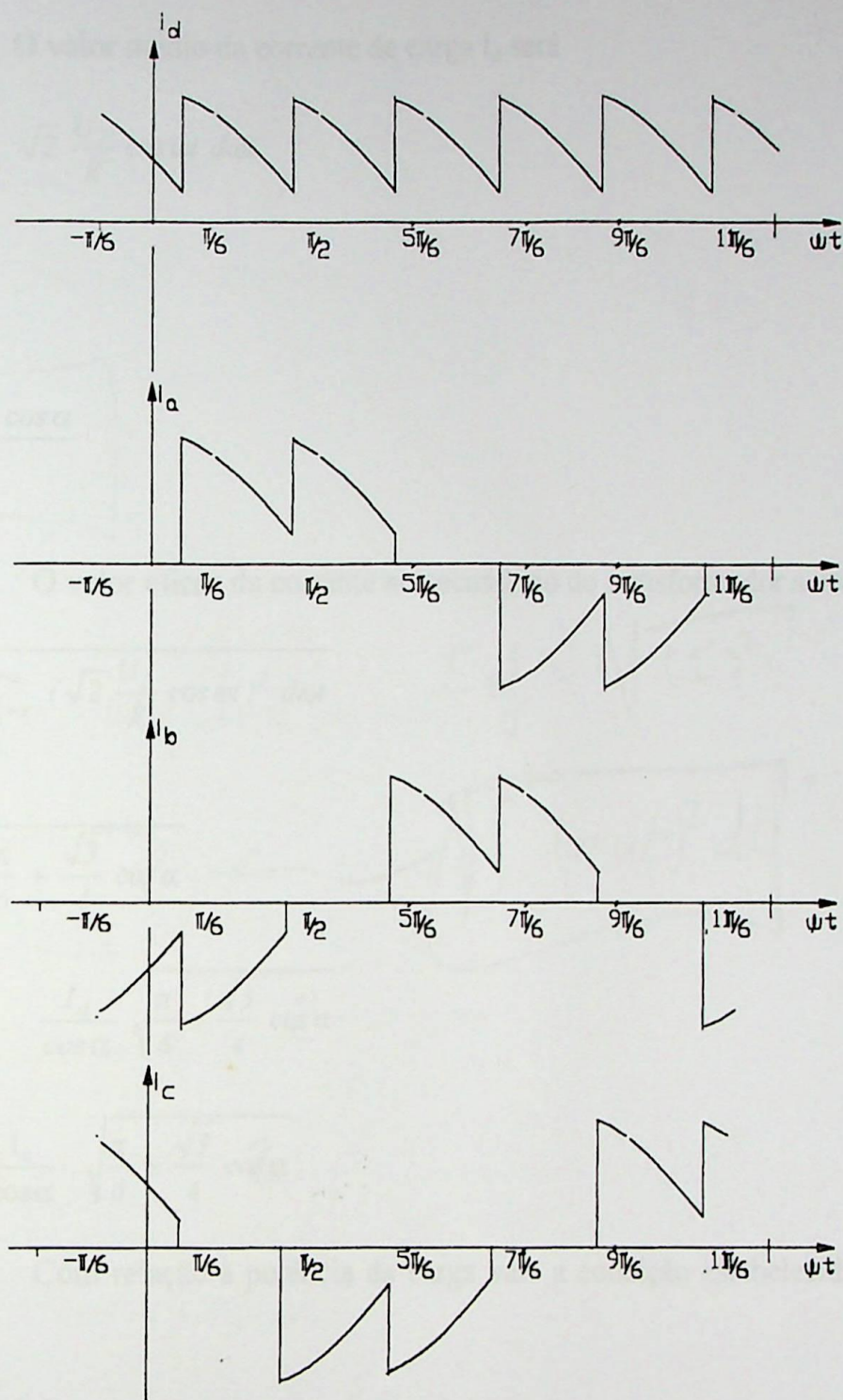


Figura 32 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_{d\alpha}$  e o valor eficaz  $U_2$  é obtido a partir de:

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d\omega t \quad (235)$$

$$U_{d\alpha} = 1,35 U_2 \cos \alpha \quad (236)$$

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  será

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \, d\omega t \quad (237)$$

$$I_d = \frac{U_{d\alpha}}{R} \quad (238)$$

$$I_d = \frac{1,35 U_2 \cos \alpha}{R} \quad (239)$$

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 \, d\omega t} \quad (240)$$

$I_{ef} = \sqrt{(I)^2}$

$$I_2 = \frac{2U_2}{\sqrt{\pi} \cdot R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (241)$$

$\int (\cos \omega t)^2 dt$

$$I_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot 1,35} \cdot \frac{I_d}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (242)$$

$$I_2 = 0,836 \frac{I_d}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \quad (243)$$

Com relação à potência da carga vale a condição estabelecida na equação (106):

$$P_R = R \cdot I_{d(ef)}^2 \quad (244)$$

onde

$$I_{d(ef)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \left( \sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t \right)^2 \, d\omega t} \quad (245)$$

$$I_{d(ef)} = \left( \frac{\sqrt{6} U_2}{\sqrt{\pi} R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha} \right) \quad (246)$$

resultando então:

$$U_{d2} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \cdot \pi \cdot \pi$$

$$P_R = 1,91 \frac{U_2^2}{R} \left[ \frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha \right] \quad (247)$$

Para potência  $P_d$  tem-se:

$$I_d = \frac{U_{d2}}{R}$$

$$P_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t) (\sqrt{2} \frac{U_2}{R} \cos \omega t) d\omega t \quad (248)$$

$$P_R = 1,91 \frac{U_2^2}{R} \left[ \frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha \right] \quad (249)$$

A potência aparente, será dada por:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_2 I_2 \quad (250)$$

$$S = 1,073 \frac{U_d \cdot I_d}{\cos^2 \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (251)$$

$$S = \frac{1,073 (1,35 U_2 \cos \alpha)}{\cos^2 \alpha} \cdot \frac{1,35 U_2 \cos \alpha}{R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (252)$$

$$S = 1,956 \frac{U_2^2}{R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (253)$$

O fator de potência será:

$$F.P. = \frac{1,91 \frac{U_2^2}{R} \left[ \frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha \right]}{1,956 \frac{U_2^2}{R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha}} \quad (254)$$

$$F.P. = 0,976 \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (255)$$

c – Ponte trifásica não controlada com carga indutiva

A Figura 33 mostra um conversor não controlado ligado em ponte trifásica com carga indutiva ( $L \gg R$ ).

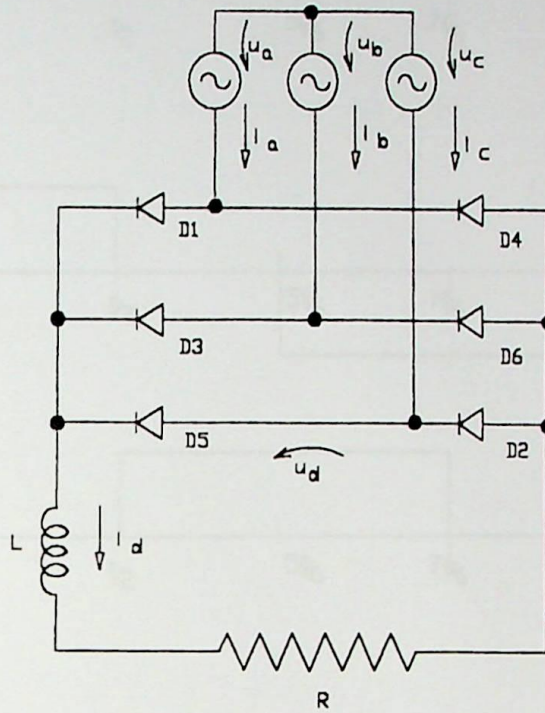


Figura 33 – Conversor não controlado ligado em ponte trifásica com carga indutiva

As formas de onda das tensões de linha do secundário do transformador e do lado de corrente contínua do conversor são iguais àquelas representadas na Figura 28. Pode-se determinar o comportamento da corrente de carga  $i_d$  e das correntes no lado de corrente alternada de conversor, indicados na Figura 34.

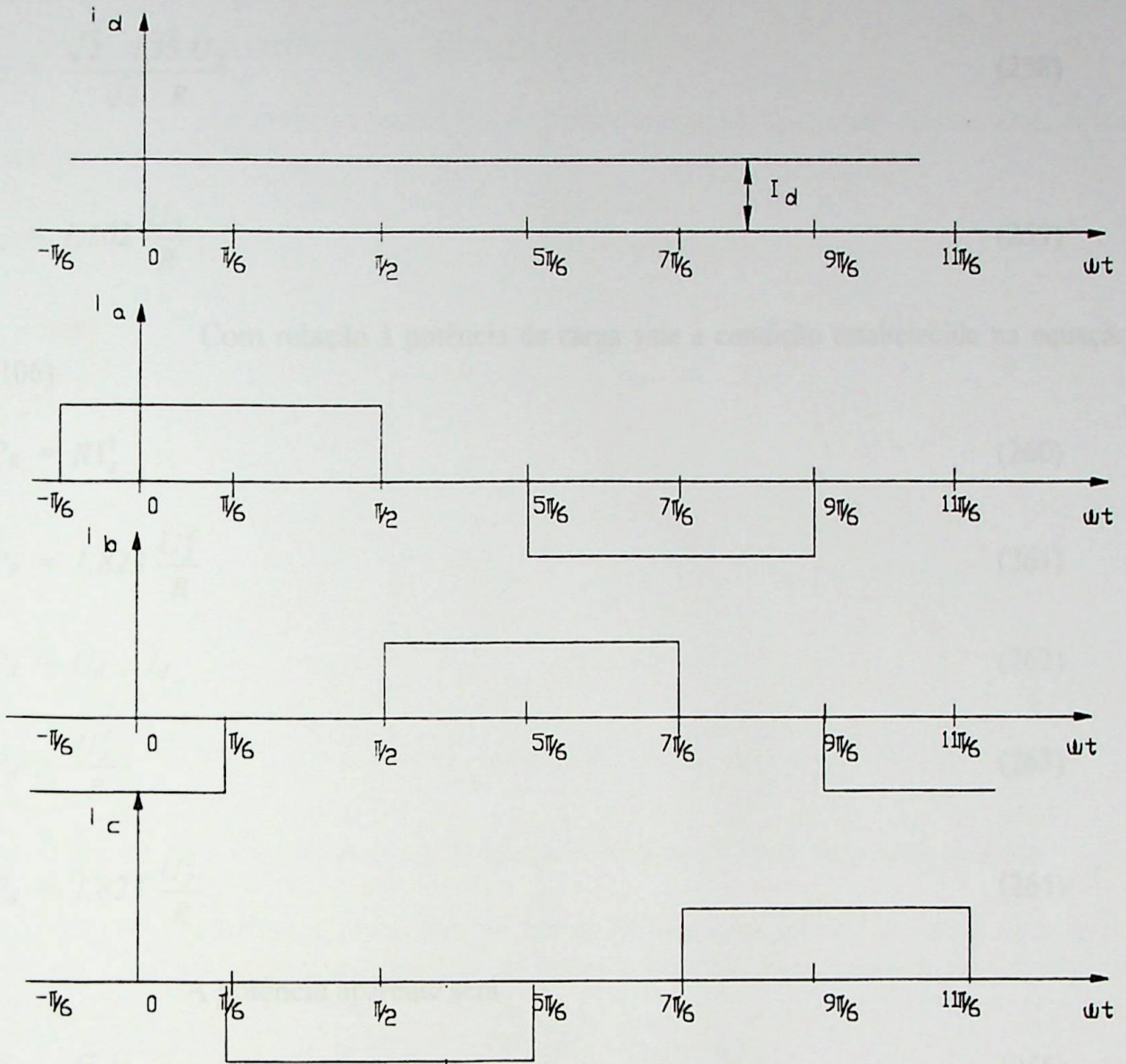


Figura 34 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado da corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$  é definido pela equação (218).

O valor médio da corrente de carga também é definido pelas equações (220) e (221).

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} I_d^2 (d\omega t)} \quad (256)$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_d \quad (257)$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,35 U_2}{\sqrt{3} \cdot R} \quad (258)$$

$$I_2 = 1,102 \frac{U_2}{R} \quad (259)$$

(106) Com relação à potência da carga vale a condição estabelecida na equação

$$P_R = R I_d^2 \quad (260)$$

$$P_R = 1,823 \frac{U_2^2}{R} \quad (261)$$

$$P_d = U_d \cdot I_d \quad (262)$$

$$P_d = \frac{U_d^2}{R} \quad (263)$$

$$P_d = 1,823 \frac{U_2^2}{R} \quad (264)$$

A potência aparente será

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (265)$$

$$S = 1,05 U_d I_d \quad (266)$$

$$S = 1,05 P_d \quad (267)$$

Com relação ao fator de potência tem-se

$$F.P. = \frac{P_d}{S} = \frac{1}{1,05} = 0,95 \quad (268)$$

#### d – Ponte trifásica controlada com carga indutiva

A Figura 35 mostra um conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga indutiva ( $L \gg R$ ).

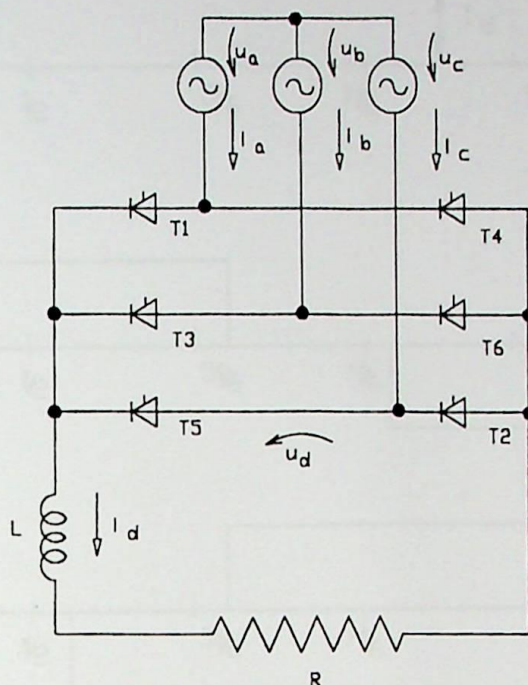


Figura 35 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga indutiva.

A Figura 36 mostra as formas de onda das tensões de linha do lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor para o ângulo de disparo  $\alpha$ .

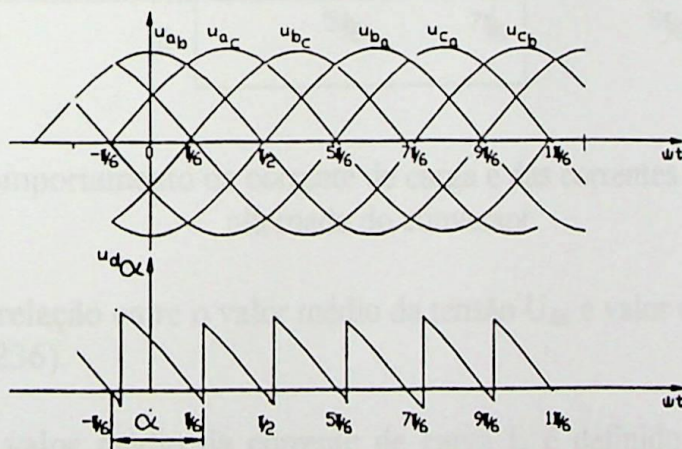


Figura 36 – Formas de onda das tensões de linha do lado de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor em função do ângulo de disparo  $\alpha$ .

Com base na Figura 36 pode-se determinar o comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

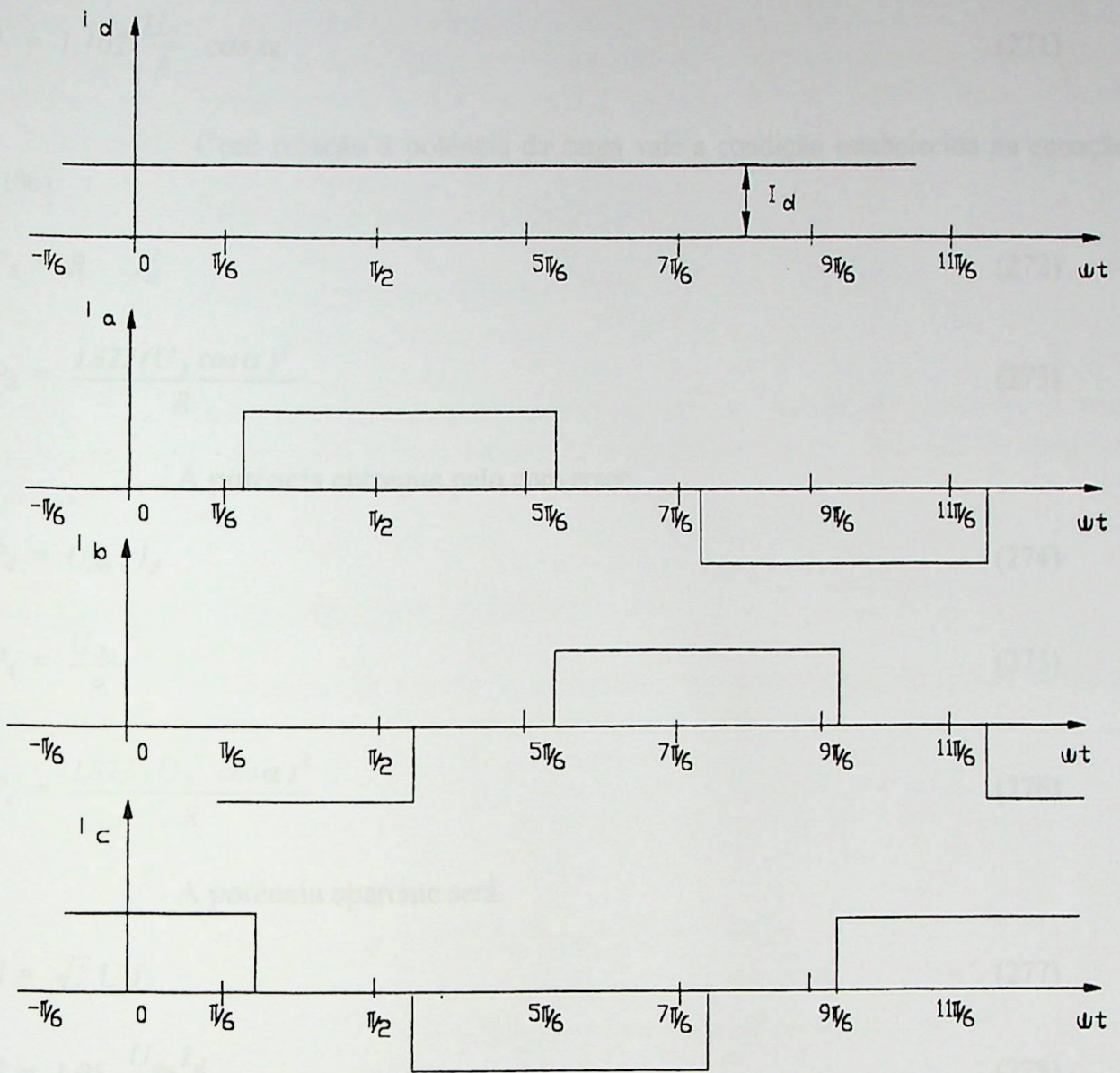


Figura 37 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_{d\alpha}$  e valor eficaz  $U_2$  é obtido pelas equações (235) e (236).

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  é definido pelas equações (237), (238) e (239).

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador é definido por:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} I_d^2 (d\omega t)} \quad (269)$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_d \quad (270)$$

$$I_2 = 1,102 \frac{U_2}{R} \cdot \cos \alpha \quad (271)$$

Com relação à potência da carga vale a condição estabelecida na equação (106).

$$P_R = R \cdot I_d^2 \quad (272)$$

$$P_R = \frac{1,823 (U_2 \cos \alpha)^2}{R} \quad (273)$$

A potência entregue pelo conversor

$$P_d = U_{d\alpha} \cdot I_d \quad (274)$$

$$P_d = \frac{U_{d\alpha}^2}{R} \quad (275)$$

$$P_d = \frac{1,827 (U_2 \cdot \cos \alpha)^2}{R} \quad (276)$$

A potência aparente será

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (277)$$

$$S = 1,05 \frac{U_{d\alpha} I_d}{\cos \alpha} \quad (278)$$

$$S = 1,05 \frac{P_d}{\cos \alpha} \quad (279)$$

O fator de potência será

$$F.P. = \frac{P_d}{S} = 0,95 \cdot \cos \alpha \quad (280)$$

### e - Ponte trifásica controlada com carga ativa

Uma carga é considerada ativa quando produz energia elétrica. Dentro deste conceito enquadram-se baterias e máquinas elétricas.

Um conversor ligado à uma carga ativa pode estar operando como retificador ou como inversor.

O conversor opera como retificador quando o fluxo de potência ativa é da rede de suprimento de energia elétrica para carga (por exemplo a máquina elétrica operando como motor). Se o fluxo de potência ativa é da carga para rede de suprimento de energia, o conversor opera como inversor (por exemplo a máquina elétrica operando como gerador durante o processo de frenagem regenerativa).

Serão abordados os dois casos:

- operação como retificador
- operação como inversor

A carga será representada por um circuito equivalente composto de uma resistência, uma indutância e uma bateria (que representa f.e.m. induzida na máquina elétrica).

### e.1 – Conversor operando como retificador

A Figura 38 mostra o conversor controlado ligado em ponte trifásica alimentando uma carga ativa. O conversor opera como retificador.

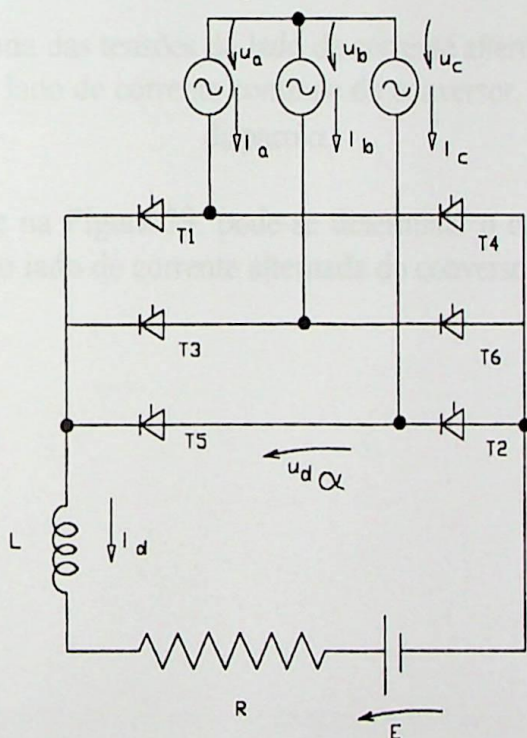


Figura 38 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga ativa operando como retificador.

A Figura 39 mostra as formas de onda das tensões de linha no lado de corrente alternada do conversor, da força eletromotriz da carga e da tensão no lado de corrente contínua do conversor.

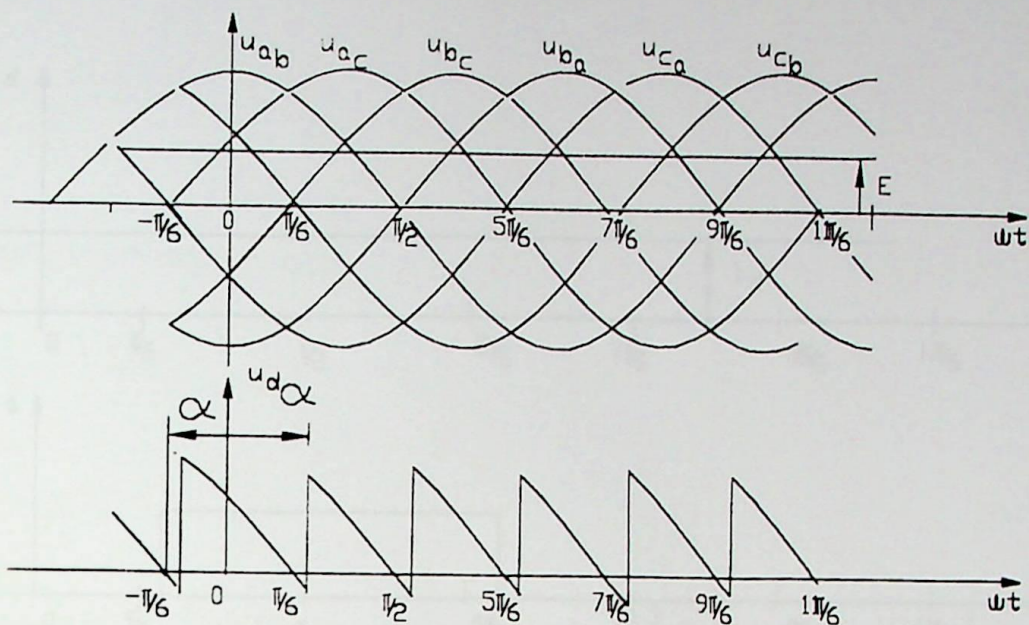


Figura 39 – Formas de onda das tensões do lado de corrente alternada, da força eletromotriz da carga e da tensão no lado de corrente contínua do conversor, em função do ângulo de disparo  $\alpha$ .

Com base na Figura 39, pode-se determinar o comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

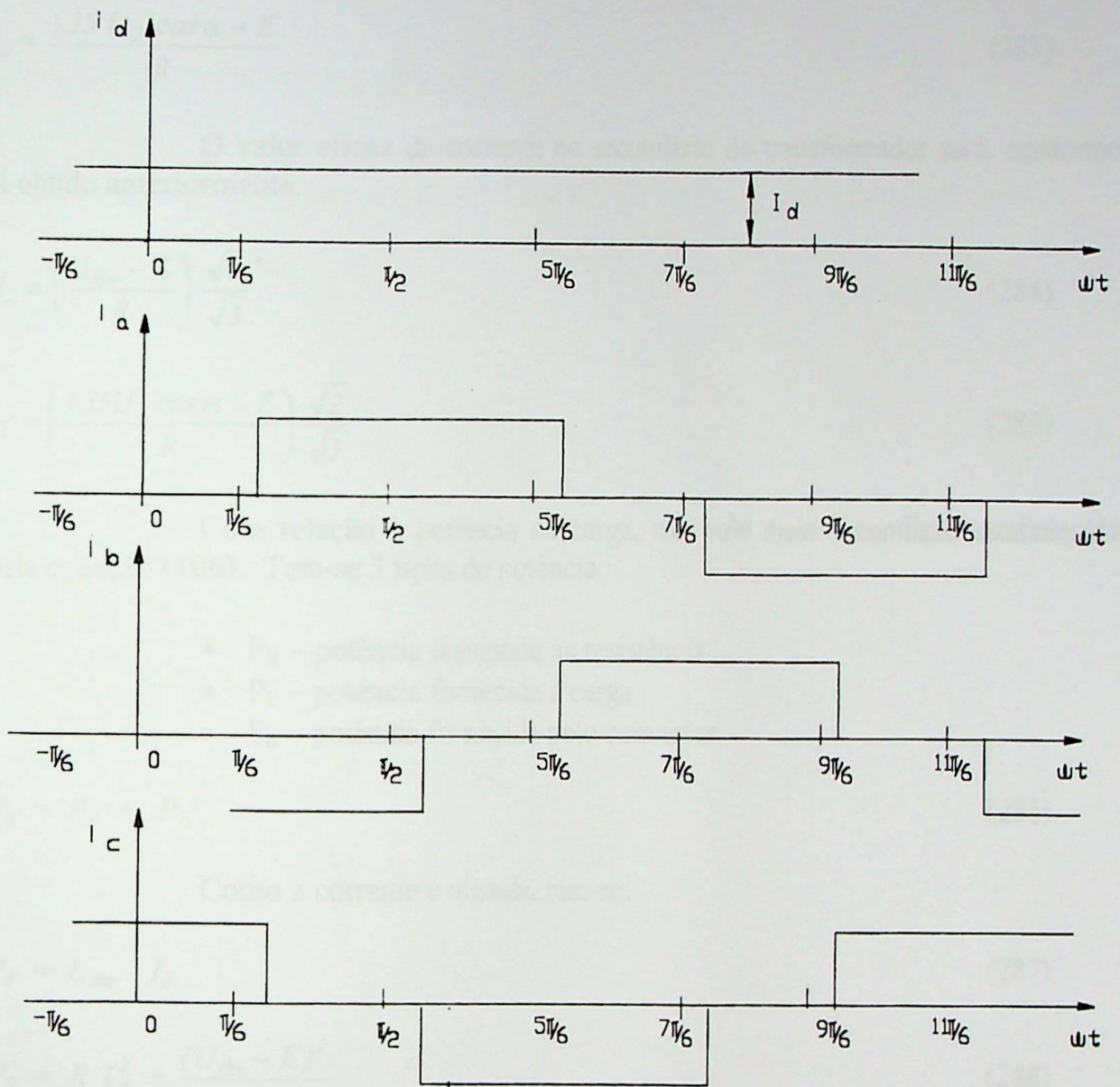


Figura 40 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_{da}$  e o valor eficaz  $U_2$  é obtida pelas equações (235) e (236).

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  é dado por:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \left( \frac{\sqrt{2} U_2 \cos \omega t - E}{R} \right) d\omega t \quad (281)$$

$$I_d = \frac{U_{d\alpha} - E}{R} \quad (282)$$

$$I_d = \frac{1,35 U_2 \cos \alpha - E}{R} \quad (283)$$

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador será, conforme já obtido anteriormente.

$$I_2 = \left( \frac{U_{d\alpha} - E}{R} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (284)$$

$$I_2 = \left( \frac{1,35 U_2 \cos \alpha - E}{R} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (285)$$

Com relação à potência da carga, não vale mais a condição estabelecida pela equação (106). Tem-se 3 tipos de potência:

- $P_R$  – potência dissipada na resistência
- $P_E$  – potência fornecida à carga
- $P_d$  – potência fornecida pelo conversor

$$P_d = P_R + P_E \quad (286)$$

Como a corrente é alisada, tem-se:

$$P_d = U_{d\alpha} \cdot I_d \quad (287)$$

$$P_R = R I_d^2 = \frac{(U_{d\alpha} - E)^2}{R} \quad (288)$$

$$P_E = E \cdot I_d = E \frac{(U_{d\alpha} - E)}{R} \quad (289)$$

A potência aparente será:

$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \quad (290)$$

$$S = 1,05 \frac{U_{d\alpha}}{\cos \alpha} \cdot I_d \quad (291)$$

$$S = 1,05 \frac{P_d}{\cos \alpha} \quad (292)$$

Com relação ao fator de potência, resulta

$$F.P. = \frac{P_d}{S} = 0,95 \cos \alpha \quad (293)$$

### e.2 – Conversor operando como inversor

A Figura 41 mostra o conversor controlado ligado em ponte trifásica conectado à carga ativa, que opera como gerador. O conversor opera como inversor.

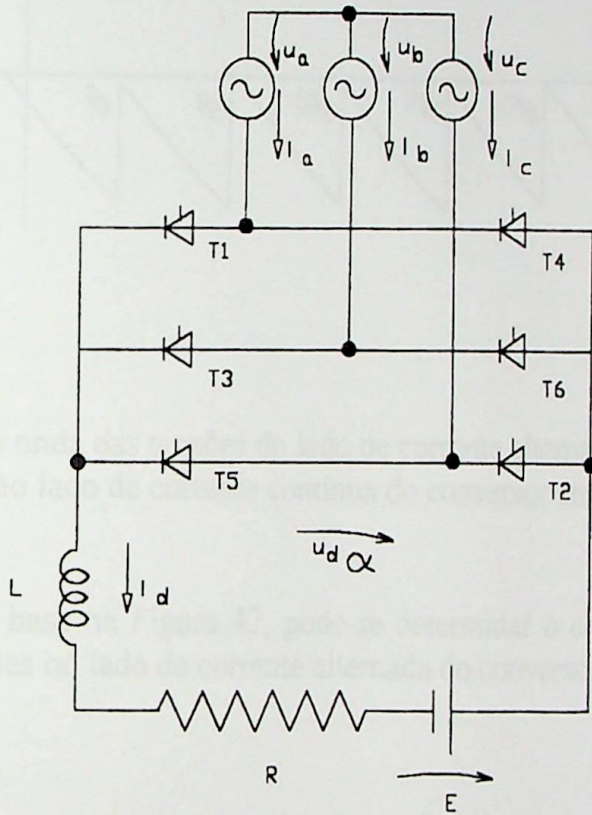


Figura 41 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica com carga ativa operando como inversor.

A Figura 42 mostra as formas de onda as tensões de linha no lado de corrente alternada do conversor, da força eletromotriz da carga e da tensão no lado de corrente contínua do conversor.

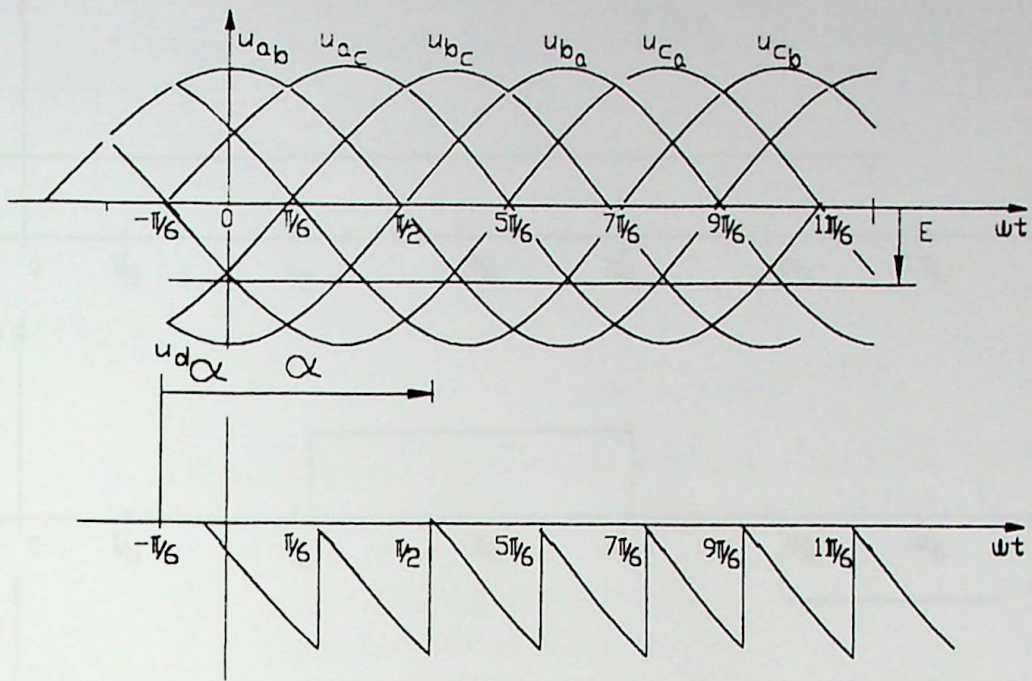


Figura 42 – Forma de onda das tensões do lado de corrente alternada, da força eletromotriz da carga e da tensão no lado de corrente contínua do conversor em função do ângulo de disparo  $\alpha$ .

Com base na Figura 42, pode-se determinar o comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

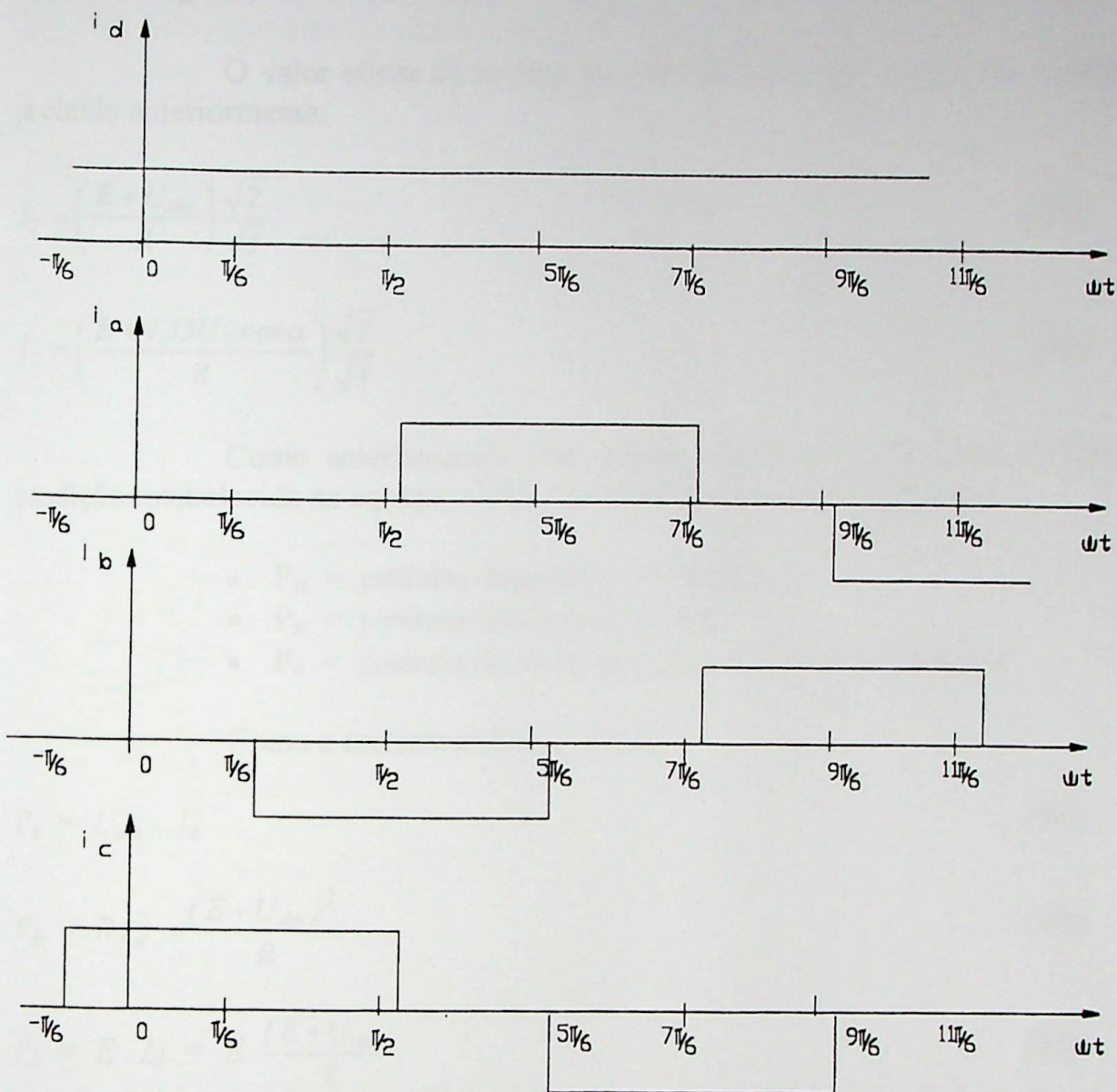


Figura 43 – Comportamento da corrente de carga e das correntes no lado de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_{d\alpha}$  e o valor eficaz  $U_2$  é obtida pelas equações (235) e (236).

O valor médio da corrente de carga  $I_d$  é dado por:

$$I_d = \frac{I}{\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\alpha} \frac{E + \sqrt{2}U_2 \cos \omega t}{R} d\omega t \quad (294)$$

$$I_d = \frac{E + U_{d\alpha}}{R} \quad (295)$$

$$I_d = \frac{E + 1,35U_2 \cos \alpha}{R} \quad (296)$$

O valor eficaz da corrente no secundário do transformador será, conforme já obtido anteriormente,

$$I_2 = \left( \frac{E + U_{d\alpha}}{R} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (297)$$

$$I_2 = \left( \frac{E + 1,35U_2 \cos \alpha}{R} \right) \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (298)$$

Como anteriormente, com relação a potência a carga não vale mais a condição estabelecida na equação (106). Do mesmo modo, tem-se as potências:

- $P_R$  = potência dissipada na resistência
- $P_E$  = potência fornecida pela carga
- $P_d$  = potência devolvida para rede de suprimento de energia

Como a corrente é alisada, tem-se:

$$P_d = U_{d\alpha} \cdot I_d \quad (299)$$

$$P_R = R I_d^2 = \frac{(E + U_{d\alpha})^2}{R} \quad (300)$$

$$P_E = E \cdot I_d = E \frac{(E + U_{d\alpha})}{R} \quad (301)$$

A potência aparente será a mesma definida pelas equações (290), (291) e (292). O mesmo ocorre com o fator de potência que é definido pela equação (293).

*Observação:* Na operação como inversor, o conversor opera com  $\alpha > 90^\circ$ . Desta forma o valor médio  $U_{d\alpha}$  é sempre negativo.

### 3.3.3 – Conversor de 12 pulsos

Conversores de 12 pulsos são obtidos a partir da ligação em série ou em paralelo de duas pontes trifásicas. A conexão em série é usada para sistema de tensão mais elevada, enquanto que a conexão em paralelo é usada para sistemas de alta corrente. A grande vantagem da utilização de conversores de 12 pulsos é a redução do conteúdo harmônico da corrente no lado de corrente alternada do conversor.

A Figura 44 mostra o conversor de 12 pulsos composto de duas pontes trifásicas ligadas em série. É importante observar que o defasamento angular entre os sistemas de suprimento de energia dos dois conversores deve ser de  $30^\circ$ .

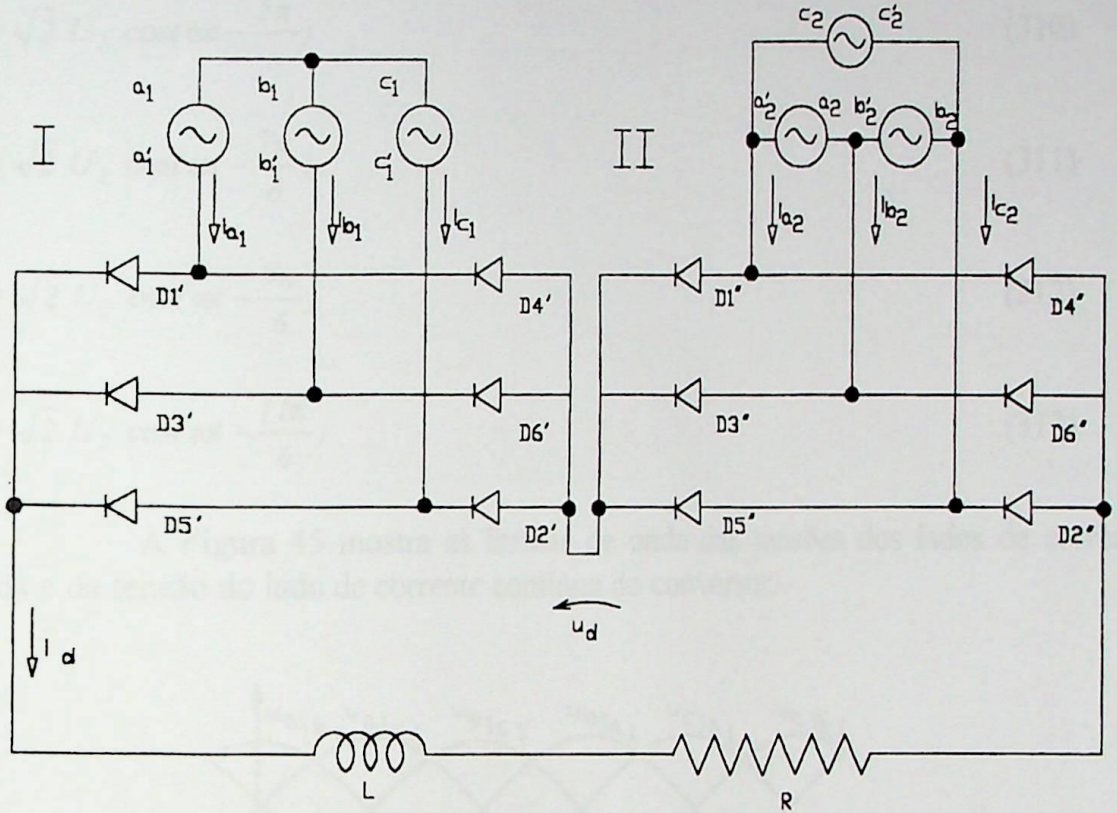


Figura 44 – Conversor de 12 pulsos.

O defasamento angular entre as duas fontes de suprimento de energia é de  $30^\circ$ , resultando para o conversor I:

$$u_{a_1 b_1} = \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \quad (302)$$

$$u_{a_1 c_1} = \sqrt{2} U_2 \cos (\omega t - \pi/3) \quad (303)$$

$$u_{b_1 c_1} = \sqrt{2} U_2 \cos (\omega t - 2\pi/3) \quad (304)$$

$$u_{b_1 a_1} = \sqrt{2} U_2 \cos (\omega t - \pi) \quad (305)$$

$$u_{c_1 a_1} = \sqrt{2} U_2 \cos (\omega t - 4\pi/3) \quad (306)$$

$$u_{c_1 b_1} = \sqrt{2} U_2 \cos (\omega t - 5\pi/3) \quad (307)$$

$$u_{a_2 b_2} = \sqrt{2} U_2 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad (308)$$

$$u_{a_2 c_2} = \sqrt{2} U_2 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (309)$$

$$u_{b_2 c_2} = \sqrt{2} U_2 \cos\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \quad (310)$$

$$u_{b_2 a_2} = \sqrt{2} U_2 \cos\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) \quad (311)$$

$$u_{c_2 a_2} = \sqrt{2} U_2 \cos\left(\omega t - \frac{9\pi}{6}\right) \quad (312)$$

$$u_{c_2 b_2} = \sqrt{2} U_2 \cos\left(\omega t - \frac{11\pi}{6}\right) \quad (313)$$

A Figura 45 mostra as formas de onda das tensões dos lados de corrente alternada e da tensão do lado de corrente contínua do conversor.

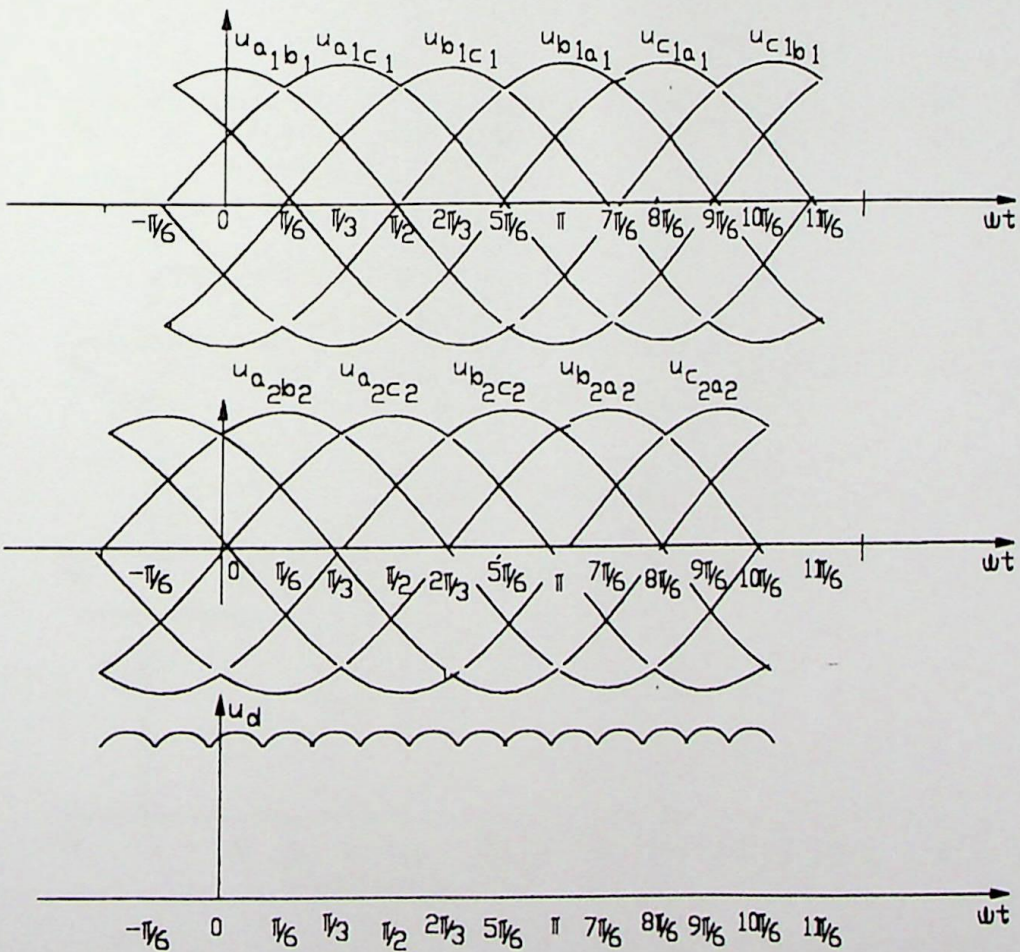


Figura 45 – Formas de ondas das tensões nos lados de corrente alternada e da tensão no lado de corrente contínua do conversor.

Com base na Figura 45 pode-se determinar o comportamento da corrente de carga e das correntes de linha dos secundários do transformador.

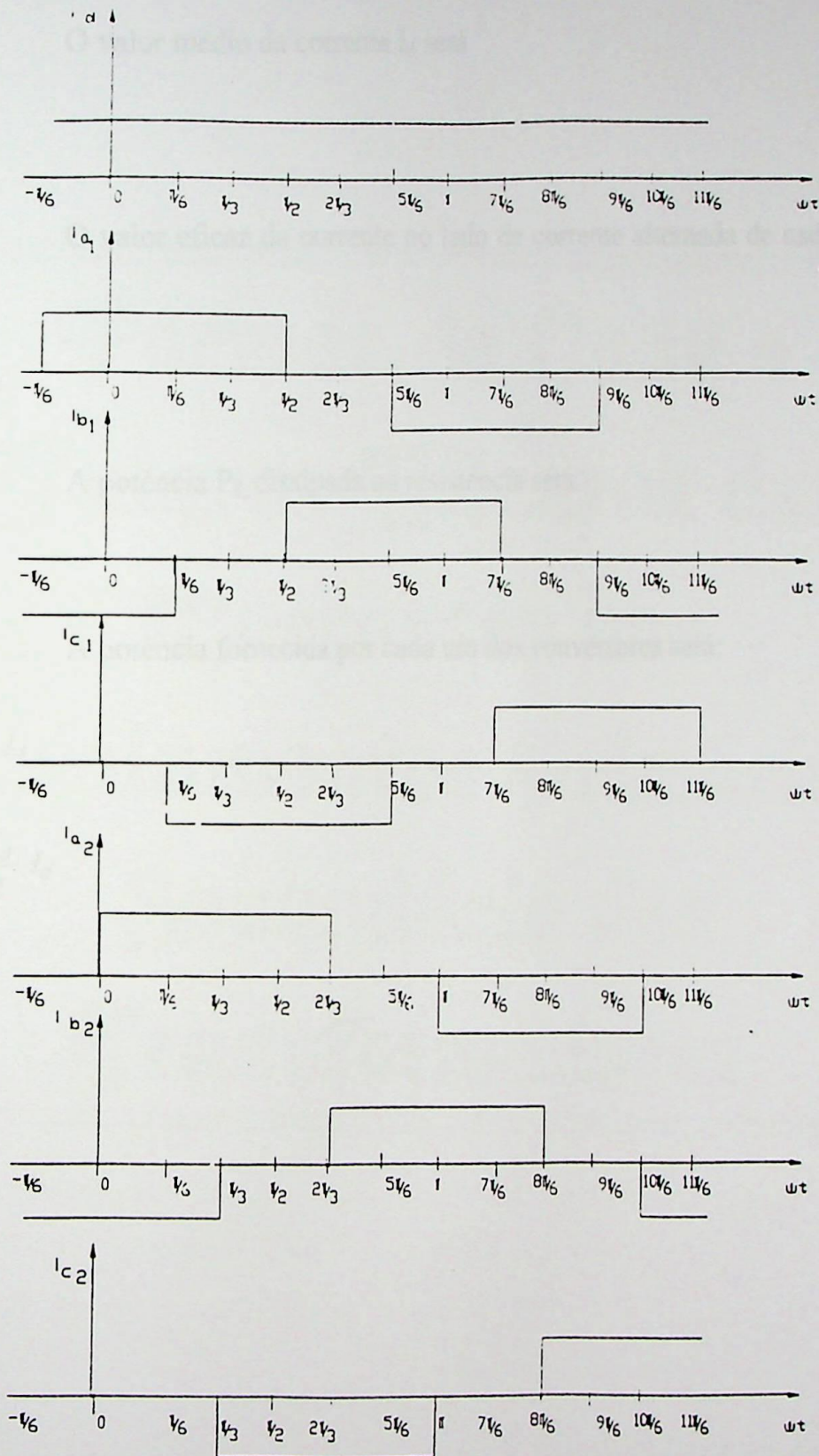


Figura 46 – Comportamento das correntes de carga e dos lados de corrente alternada do conversor.

A relação entre o valor médio da tensão  $U_d$  e o valor eficaz  $U_2$  é facilmente determinável, levando-se em conta que os conversores estão ligados em série. Desta forma, considerando-se a equação (236) resulta

$$U_d = 2,7 U_2 \quad (314)$$

O valor médio da corrente  $I_d$  será

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (315)$$

O valor eficaz da corrente no lado de corrente alternada de cada conversor será:

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_d \quad (316)$$

A potência  $P_R$  dissipada na resistência será

$$P_R = R I_d^2 \quad (317)$$

A potência fornecida por cada um dos conversores será:

$$P_d = \frac{U_d}{2} \cdot I_d \quad (318)$$

$$S = 1,05 \frac{U_d}{2} I_d \quad (319)$$

**Formas de Onda e  
Valores Eficazes das  
Correntes nos  
Enrolamentos Primário e  
Secundário dos  
Transformadores**

## **4. FORMAS DE ONDA E VALORES EFICAZES DAS CORRENTES NOS CIRCUITOS PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO DOS TRANSFORMADORES**

### **4.1 - Introdução**

No Capítulo 2 foram definidas relações entre as correntes nos circuitos do transformador e a corrente de carga usando o balanço de forças magnetomotrizes no núcleo do transformador. No Capítulo 3 foram, entre outros, estabelecidas as formas de onda e valores das correntes no lado de corrente alternada dos conversores.

Neste capítulo pretende-se estabelecer as formas de onda e valores eficazes das correntes nos circuitos de transformadores de conversores, usando as condições e equações obtidas nos capítulos anteriores. Serão analisados apenas os transformadores trifásicos, uma vez que nos transformadores monofásicos as correntes nos circuitos primário e secundário tem o mesmo comportamento.

### **4.2 – Transformadores trifásicos com dois circuitos**

#### **4.2.1 – Conversor trifásico ligado em estrela alimentado por um transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga indutiva**

##### **a – Conversor não controlado**

A Figura 47 mostra esquematicamente um conversor trifásico não controlado ligado em estrela alimentado por um transformador com o primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. A carga é indutiva.

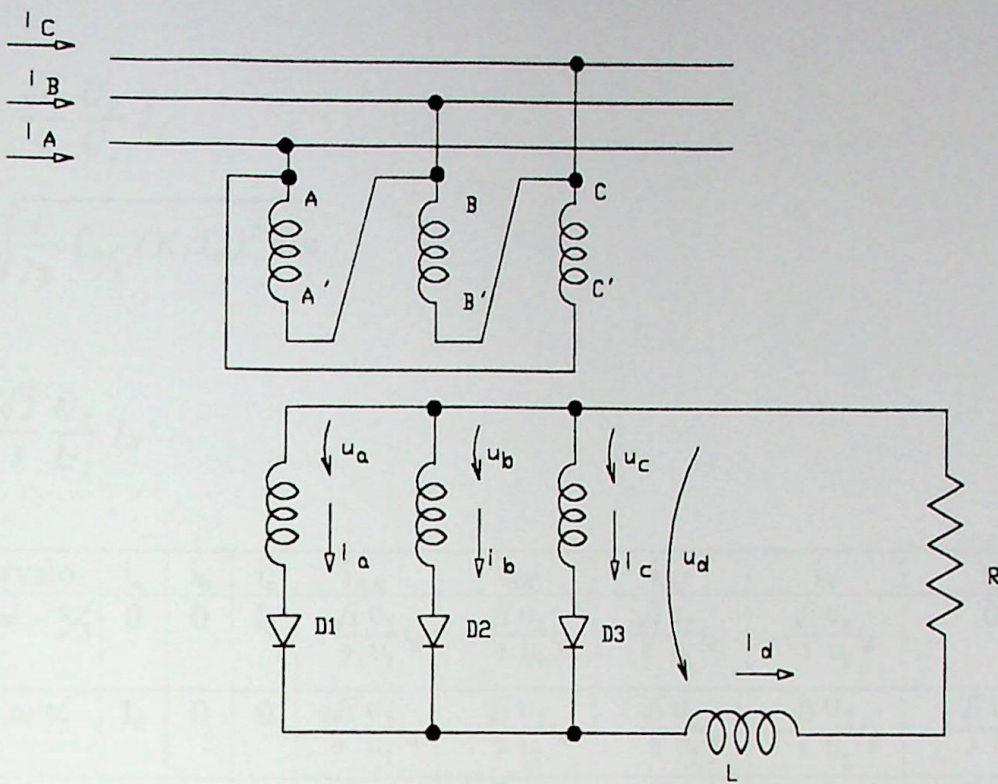


Figura 47 – Transformador triângulo-estrela alimentando conversor não controlado ligado em estrela - carga indutiva.

Neste caso a corrente no lado de corrente alternada do conversor é igual a corrente de fase (e de linha) do secundário do transformador. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 23. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita através das equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as correntes de linha, ao longo de um período. O resultado é mostrado na Tabela 01.

A Figura 48 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador. Para obtenção das formas de onda tomou-se:

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (320)$$

Os valores eficazes das correntes de fase ( $I_{1f}$ ) e de linha  $I_1$  do primário do transformador são dados por:

$$I_{1f} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_{-\pi}^{\pi/3} \left( -\frac{1}{3} K_1 I_d \right)^2 d\omega t + \int_{\pi/3}^{\pi} \left( \frac{2}{3} K_1 I_d \right)^2 d\omega t \right]} \quad (321)$$

$$I_{lf} = \frac{\sqrt{6}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d \quad (322)$$

$$I_l = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} (K_l I_d)^2 d\omega t} \quad (323)$$

$$I_l = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d \quad (324)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi$ até $-\pi/3$	0	0	$I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$-\pi/3$ até $\pi/3$	$I_d$	0	0	$\frac{2\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$+\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0
$\pi/3$ até $\pi$	0	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$

**Tabela 01** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor não controlado ligado em estrela. - Carga indutiva.

Como as formas de onda das correntes de fase dos circuitos primário e secundário do transformador são diferentes, as potências aparentes do primário e do secundário também o serão, o mesmo ocorrendo com o fator de potência.

A potência aparente  $S_2$  do secundário do transformador é igual a potência aparente fornecida ao conversor e definida pela equação (197).

$$S_2 = 1,482 P_d \quad (325)$$

Já a potência aparente do circuito primário será

$$S_l = \sqrt{3} U_l I_l \quad (326)$$

$$S_l = 1,21 P_d \quad (327)$$

Com relação aos fatores de potência do secundário ( $FP_{(2)}$ ) e do primário ( $FP_{(1)}$ ) tem-se:

$$FP_{(2)} = \frac{P_d}{1.482P_d} = 0.675 \quad (328)$$

$$FP_{(1)} = \frac{P_d}{1.21P_d} = 0.827 \quad (329)$$

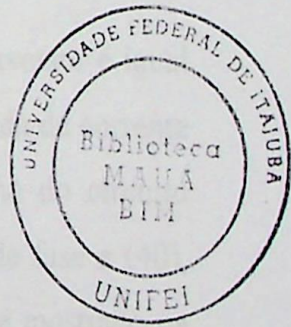
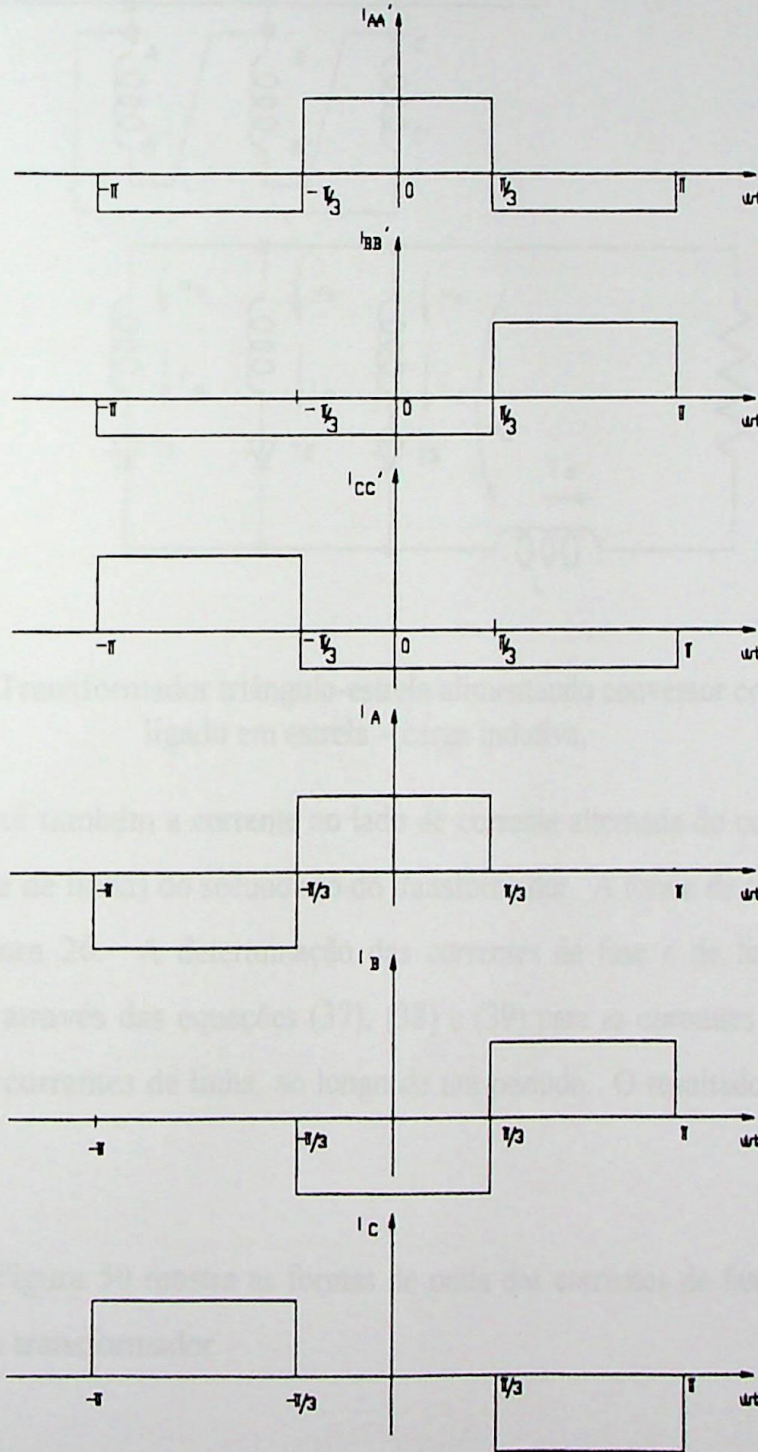


Figura 48 – Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

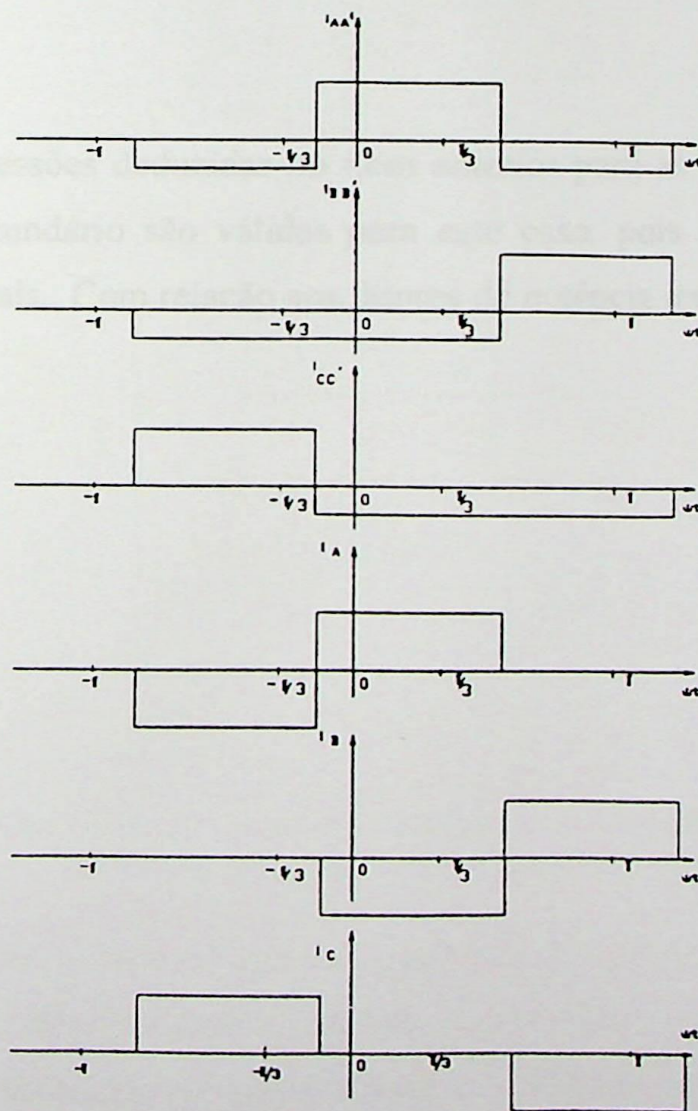


Para obtenção das formas de onda tomou-se:

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (330)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$\pi + \alpha$ até $-\pi/3 + \alpha$	0	0	$I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$
$-\pi/3 + \alpha$ até $\pi/3 + \alpha$	$I_d$	0	0	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	0
$\pi/3 + \alpha$ até $\pi + \alpha$	0	$I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{9 U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$

**Tabela 02** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor controlado ligado em estrela. Carga indutiva.



**Figura 50** – Comportamento das correntes de fase e de linha de primário de transformador.

Os valores eficazes das correntes de fase ( $I_{1f}$ ) e de linha  $I_1$  do primário do transformador são dados por:

$$I_{1f} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_{-\pi+\alpha}^{\pi/3+\alpha} \left(-\frac{1}{3} K_1 I_d\right)^2 d\omega t + \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi+\alpha} \left(\frac{2}{3} K_1 I_d\right)^2 d\omega t + \right]} \quad (331)$$

$$I_{1f} = \frac{\sqrt{6}}{9} \frac{U_2}{U_1} I_d \quad (332)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi+\alpha} (K_1 I_d)^2 d\omega t} \quad (333)$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d \quad (334)$$

As expressões deduzidas no item anterior para as potências aparentes dos circuitos primário e secundário são válidas para este caso, pois os valores eficazes das correntes de fase são iguais. Com relação aos fatores de potência tem-se:

$$FP_{(2)} = 0,675 \cos \alpha \quad (335)$$

$$FP_{(1)} = 0,827 \cos \alpha \quad (336)$$

## 4.2.2 – Conversor trifásico ligado em ponte trifásica alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga resistiva

### a – Conversor não controlado

A Figura 51 mostra esquematicamente um conversor trifásico não controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. A carga é resistiva.

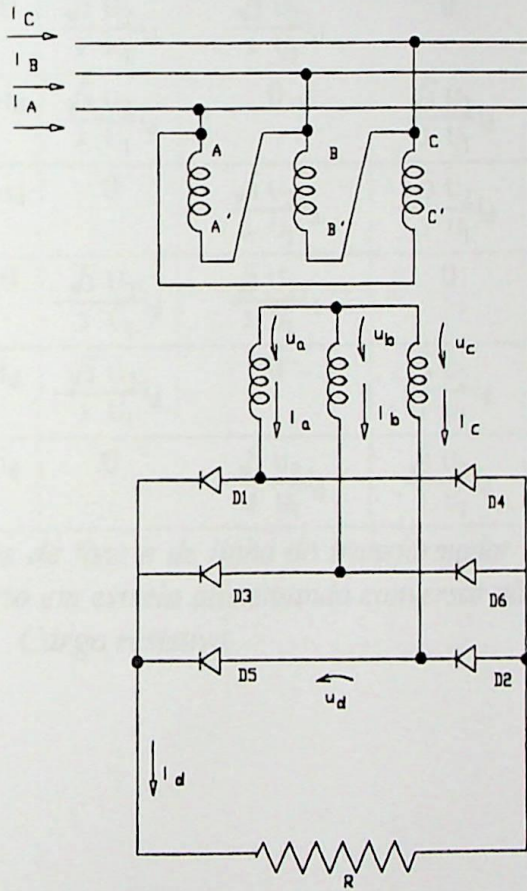


Figura 51 – Transformador triângulo-estrela alimentando conversor não controlado ligado em ponte trifásica – carga resistiva.

A corrente no lado de corrente alternada do conversor é igual a corrente de fase (e de linha) do secundário do transformador. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 29. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita através das equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as

correntes de linha, ao longo de um período.

O resultado é mostrado na Tabela 03. A Figura 52 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador.

Para obtenção das formas de onda tomou-se:

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (337)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi/6$ até $\pi/6$	$i_d$	$-i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\pi/6$ até $\pi/2$	$i_d$	0	$-i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\pi/2$ até $5\pi/6$	0	$i_d$	$-i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$5\pi/6$ até $7\pi/6$	$-i_d$	$i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$7\pi/6$ até $9\pi/6$	$-i_d$	0	$i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$3\pi/6$ até $11\pi/6$	0	$-i_d$	$i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$

**Tabela 03** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor não controlado ligado em ponte trifásica. Carga resistiva.

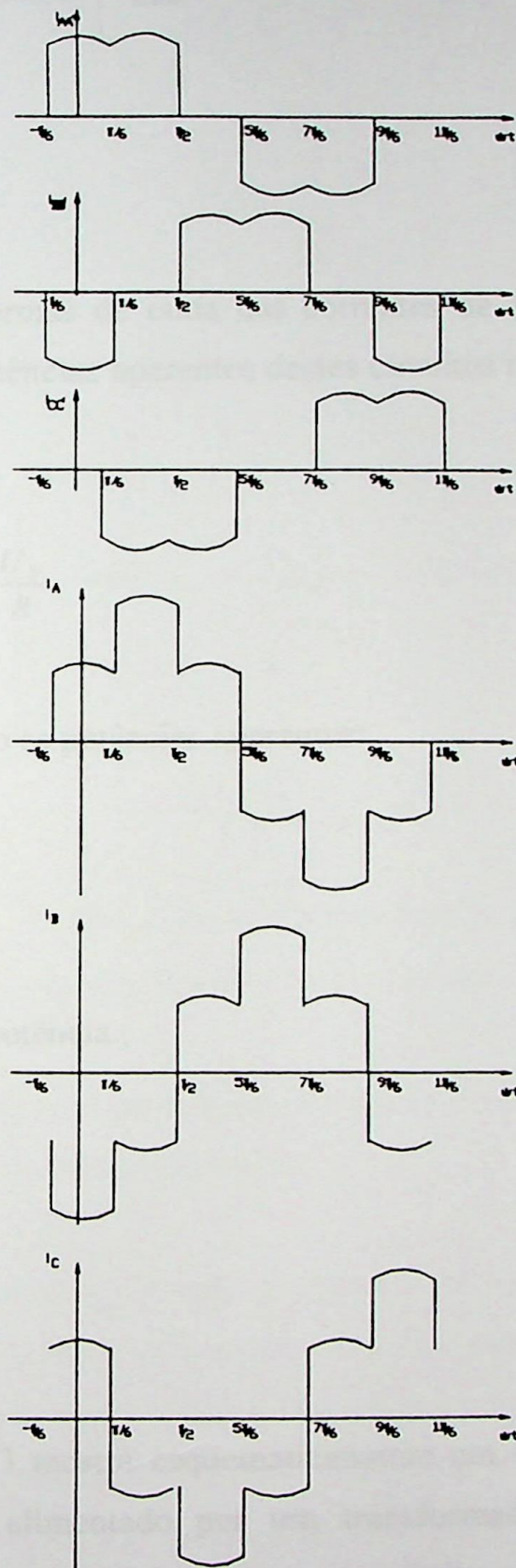


Figura 52 – Comportamento das correntes de fase e de linha do transformador.

O valor eficaz da corrente de fase ( $I_{1f}$ ) do primário do transformador é dado por:

$$I_{1f} = \sqrt{\frac{1}{\pi/2} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left( \frac{K_1 \cdot \sqrt{2} U_2 \cos \omega t}{R} \right)^2 d\omega t} \quad (338)$$

$$I_{1f} = 1,104 \left( \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \right) \cdot \frac{U_2}{R} \quad (339)$$

Como as formas de onda das correntes de fase dos circuitos primário e secundário são iguais, as potências aparentes destes circuitos também o serão. Desta forma pode-se concluir que:

$$I_1 = \left( \frac{U_2}{U_1} \right) I_2 = 1,104 \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot \frac{U_2}{R} \quad (340)$$

Com relação as potências aparentes:

$$S_1 = S_2 = 1,914 \frac{U_2^2}{R} \quad (341)$$

O fator de potência

$$F.P. = 0,955 \quad (342)$$

### b – Conversor controlado

A Figura 53 mostra esquematicamente um conversor trifásico controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. A carga é resistiva.

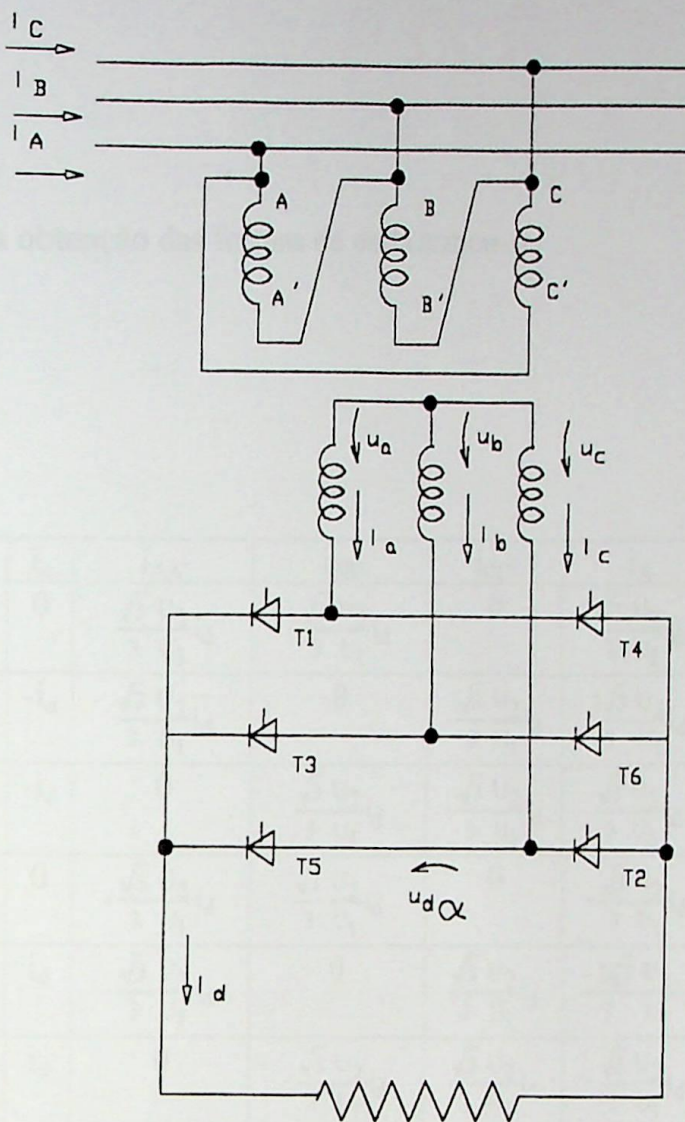


Figura 53 – Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica – carga resistiva.

A corrente no lado de corrente alternada do conversor é igual a corrente de fase ( e de linha) do secundário do transformador.

A forma de onda a corrente é mostrada na Figura 32. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita através das equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as correntes de linha, ao longo do período. O resultado é mostrado na Tabela 04. A Figura 54 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador.

Para obtenção das formas de onda tomou-se:

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (343)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\frac{\pi}{6} + \alpha$ até $\frac{\pi}{6} + \alpha$	$i_d$	$-i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\frac{\pi}{6} + \alpha$ até $\frac{\pi}{2} + \alpha$	$i_d$	0	$-i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\frac{\pi}{2} + \alpha$ até $\frac{5\pi}{6} + \alpha$	0	$i_d$	$-i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\frac{5\pi}{6} + \alpha$ até $\frac{7\pi}{6} + \alpha$	$-i_d$	$i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\frac{7\pi}{6} + \alpha$ até $\frac{9\pi}{6} + \alpha$	$-i_d$	0	$i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$
$\frac{9\pi}{6} + \alpha$ até $\frac{11\pi}{6} + \alpha$	0	$-i_d$	$i_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} i_d$

**Tabela 04** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica - carga resistiva.

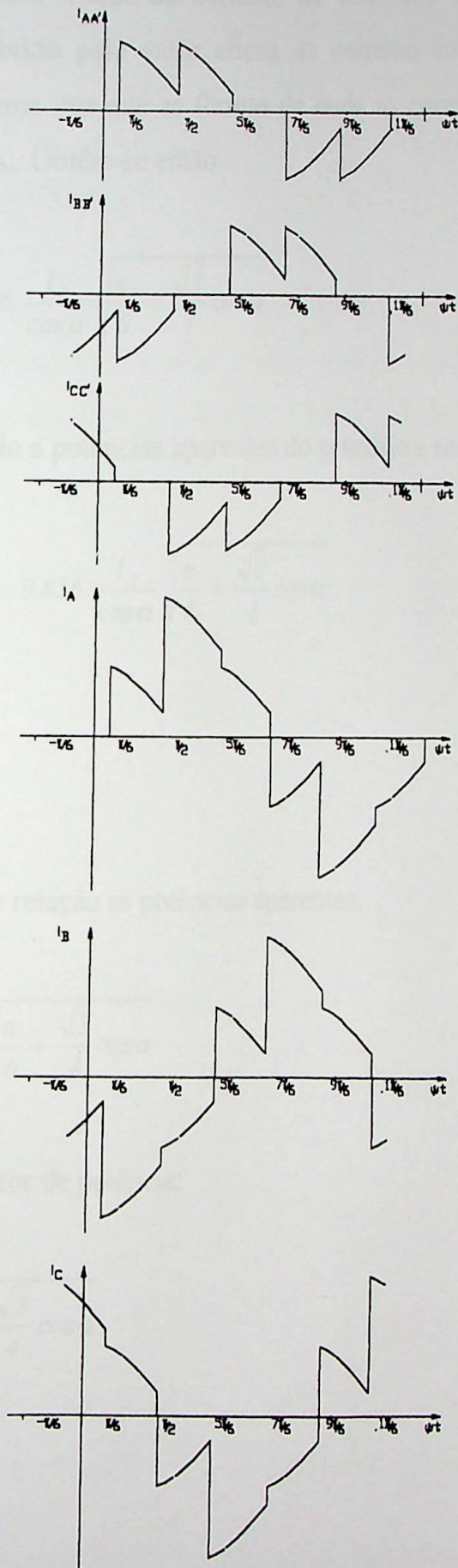


Figura 54 – Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

O valor eficaz da corrente de fase ( $I_{1f}$ ) do primário do transformador também pode ser obtido pelo valor eficaz da corrente do secundário multiplicado pela relação de espiras, uma vez que as formas de onda das correntes de fase do primário e do secundário são iguais. Obtém-se então:

$$I_{1f} = \left( \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot 0,836 \frac{I_d}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (344)$$

Sendo as potências aparentes do primário e secundário iguais, obtém-se

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot 0,836 \frac{I_d}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (345)$$

Com relação às potências aparentes:

$$S_1 = S_2 = 1,956 \frac{U_2^2}{R} \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (346)$$

O fator de potência;

$$F.P. = 0,976 \sqrt{\frac{\pi}{6} + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \alpha} \quad (347)$$

### 4.2.3 – Conversor trifásico ligado em ponte trifásica alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga indutiva

#### a – Conversor não controlado

A Figura 55 mostra esquematicamente um conversor trifásico não controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. Carga é indutiva.

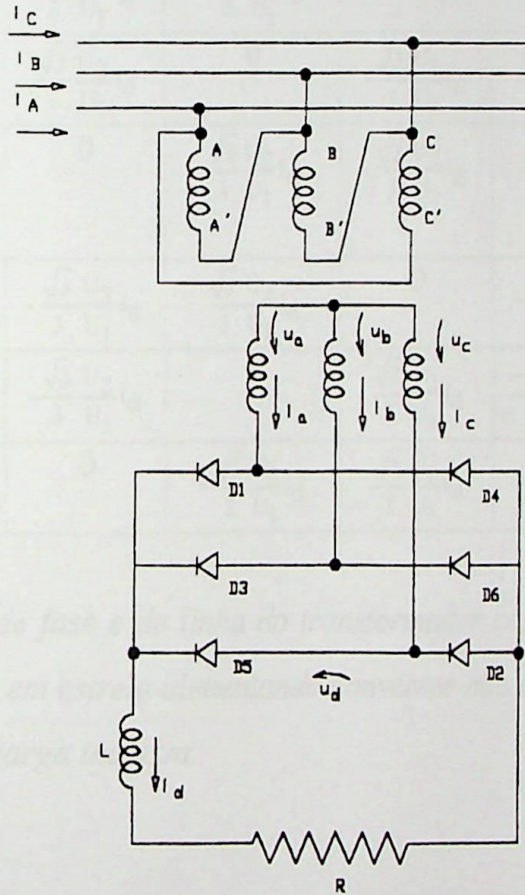


Figura 55 – Transformador triângulo-estrela alimentando conversor não controlado ligado em ponte trifásica. Carga indutiva.

A corrente no lado de corrente alternada do conversor é igual a **corrente de fase** (e de linha) do secundário do transformador. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 34. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita

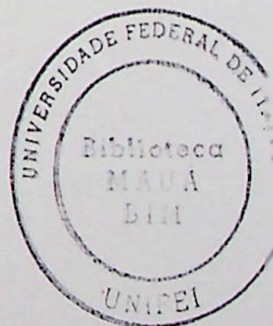
através das equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as correntes de linha, ao longo de um período.

O resultado é mostrado na Tabela 05. A Figura 56 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador. Para obtenção das formas de onda tomou-se

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (348)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi/6$ até $\pi/6$	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$
$\pi/6$ até $\pi/2$	$I_d$	0	$-I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$
$\pi/2$ até $5\pi/6$	0	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$
$5\pi/6$ até $7\pi/6$	$I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$
$7\pi/6$ até $9\pi/6$	$I_d$	0	$I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$
$9\pi/6$ até $11\pi/6$	0	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3} U_2}{3 U_1} I_d$

**Tabela 05** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor não controlado ligado em ponte trifásica - carga indutiva.



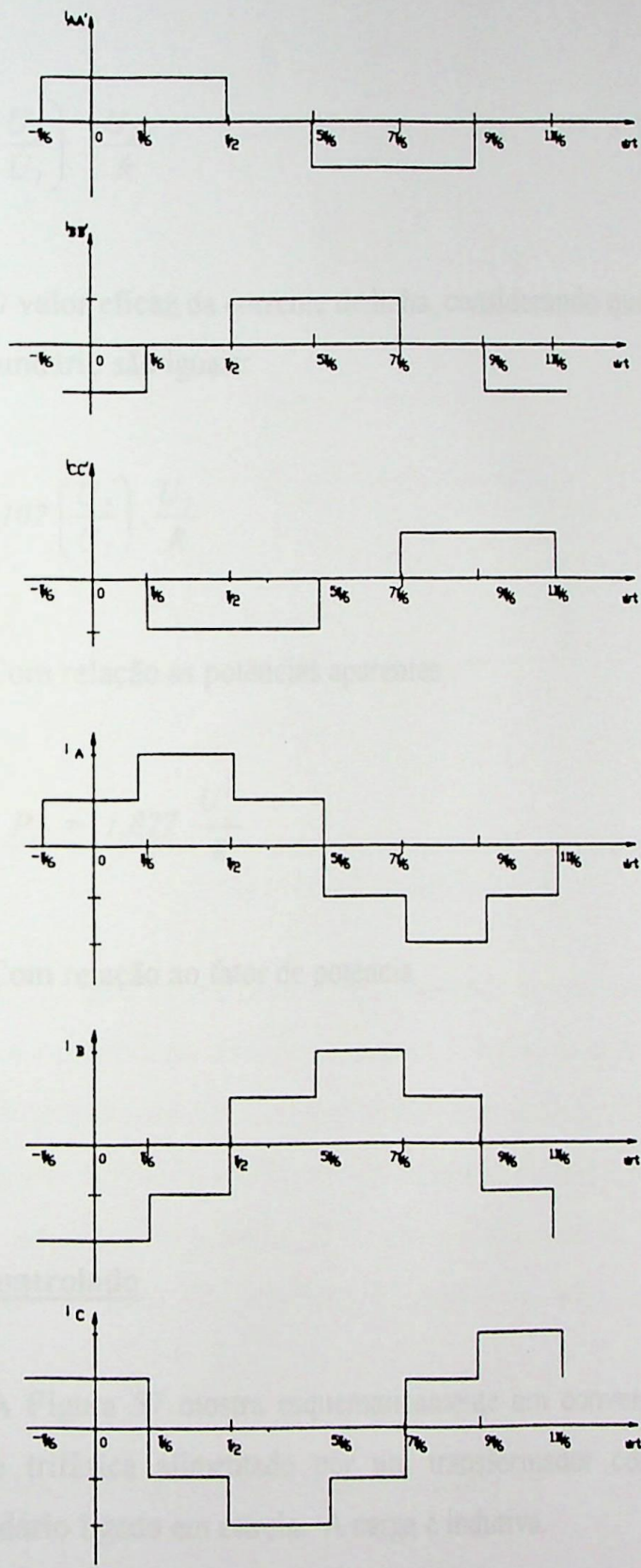


Figura 56 – Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

O valor eficaz da corrente de fase do primário do transformador pode ser obtido multiplicando-se o valor eficaz da corrente do secundário pela relação de espiras, uma vez que as formas de onda das correntes de fase do primário e do secundário são iguais. Obtém-se então:

$$I_{1f} = 1,102 \left( \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot \frac{U_2}{R} \quad (349)$$

O valor eficaz da corrente de linha, considerando que as potências aparentes do primário e secundário são iguais:

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = 1,102 \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot \frac{U_2}{R} \quad (350)$$

Com relação as potências aparentes

$$S_1 = S_2 = 1,05 P_d = 1,827 \frac{U^2}{R} \quad (351)$$

Com relação ao fator de potência

$$F.P. = 0,95 \quad (352)$$

### **b – Conversor controlado**

A Figura 57 mostra esquematicamente um conversor trifásico controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. A carga é indutiva.

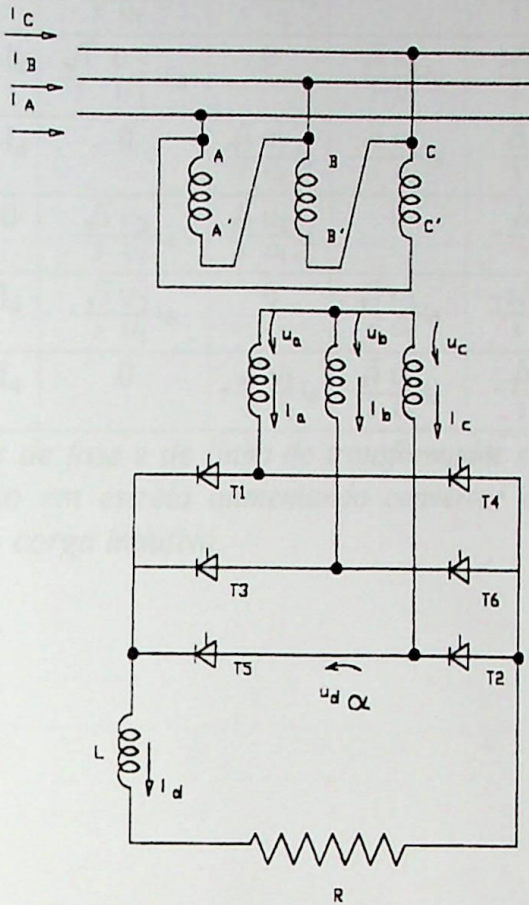


Figura 57 – Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica. carga indutiva.

A corrente no lado de corrente alternada do conversor é igual a corrente de fase (e de linha) do secundário do transformador. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 37. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita através das equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as corrente de linha, ao longo do período. O resultado é mostrado na Tabela 06. A Figura 58 mostras as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador.

Para obtenção das formas de onda tomou-se

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (353)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi/6 + \alpha$ até $\pi/6 + \alpha$	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$\pi/6 + \alpha$ até $\pi/2 + \alpha$	$I_d$	0	$-I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$\pi/2 + \alpha$ até $5\pi/6 + \alpha$	0	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$5\pi/6 + \alpha$ até $7\pi/6 + \alpha$	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$7\pi/6 + \alpha$ até $9\pi/6 + \alpha$	$-I_d$	0	$I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$9\pi/6 + \alpha$ até $11\pi/6 + \alpha$	0	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$

**Tabela 06** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica - carga indutiva.

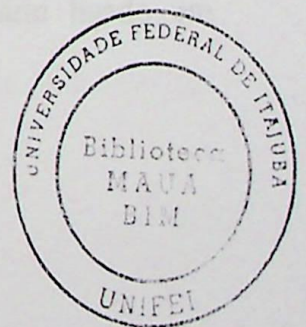
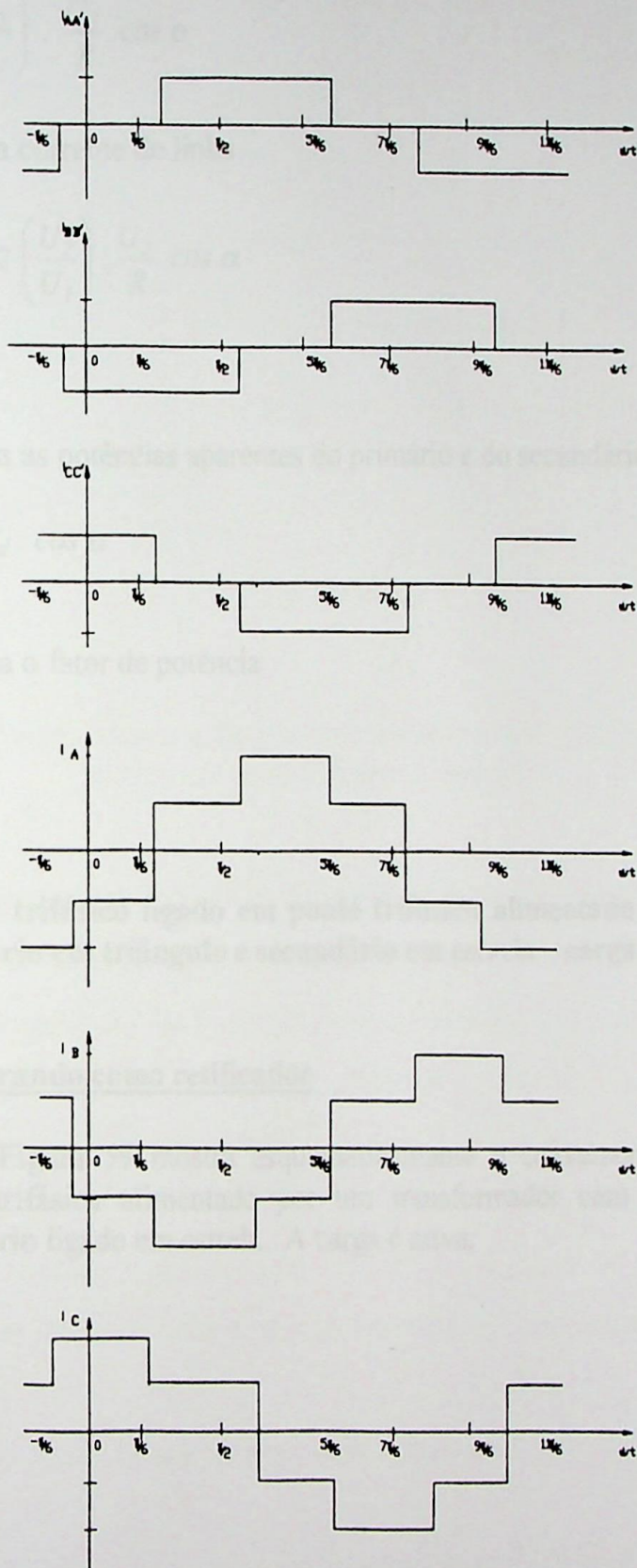


Figura 58 – Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

O valor eficaz da corrente de fase do primário é obtido conforme descrito anteriormente.

$$I_{1f} = 1,102 \left( \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot \frac{U_2}{R} \cos \alpha \quad (354)$$

Para corrente de linha

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = 1,102 \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \cdot \frac{U_2}{R} \cos \alpha \quad (355)$$

Para as potências aparentes do primário e do secundário

$$S_1 = S_2 = 1,05 P_d \cdot \cos \alpha \quad (356)$$

Para o fator de potência

$$F.P. = 0,95 \cos \alpha \quad (357)$$

#### **4.2.4 – Conversor trifásico ligado em ponte trifásica alimentado por transformador com primário em triângulo e secundário em estrela – carga ativa**

##### **a – Conversor operando como retificador**

A Figura 59 mostra esquematicamente o conversor trifásico controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. A carga é ativa.

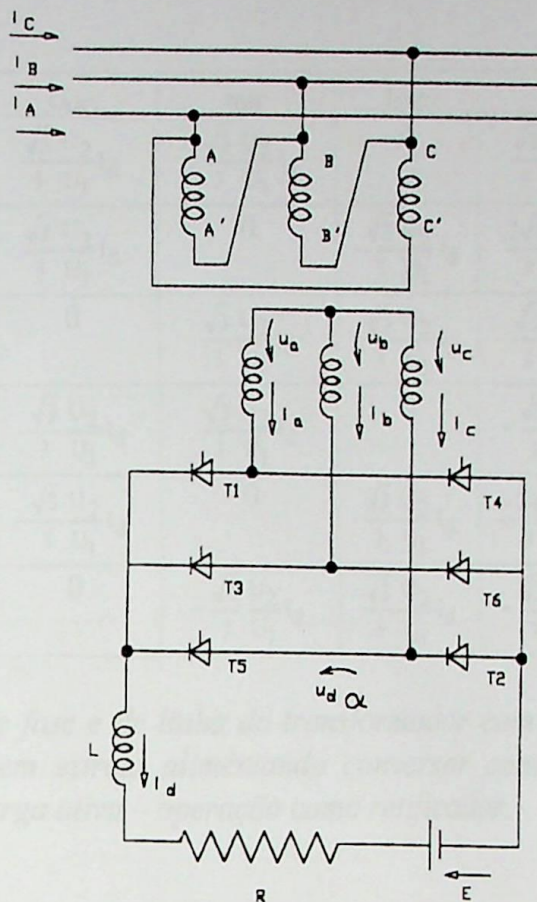


Figura 59 - Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica. Carga ativa.

A corrente no lado de corrente alternada do conversor é igual a corrente de fase (e de linha) do secundário do transformador. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 40. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita através equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as correntes de linha, ao longo de um período.

O resultado é mostrado na Tabela 07. A Figura 60 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador.

Para obtenção das formas e onda tomou-se:

$$K_I = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \quad (358)$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi/6 + \alpha$ até $\pi/6 + \alpha$	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$\pi/6 + \alpha$ até $\pi/2 + \alpha$	$I_d$	0	$-I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$\pi/2 + \alpha$ até $5\pi/6 + \alpha$	0	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$5\pi/6 + \alpha$ até $7\pi/6 + \alpha$	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$7\pi/6 + \alpha$ até $9\pi/6 + \alpha$	$-I_d$	0	$I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$9\pi/6 + \alpha$ até $11\pi/6 + \alpha$	0	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$

**Tabela 07** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica. Carga ativa – operação como retificador.

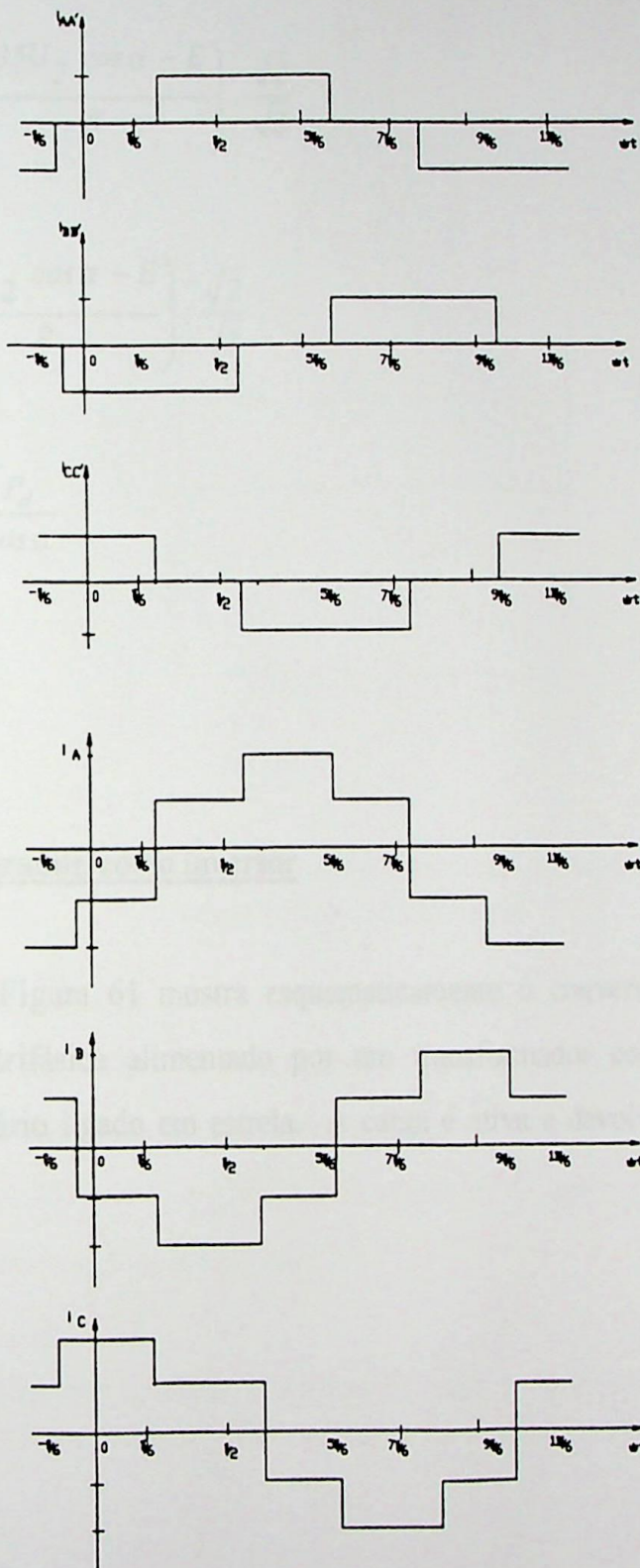


Figura 60 – Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

Como todas as formas de onda são iguais as do caso anterior valem as mesmas considerações. Desta forma, tem-se:

$$I_{if} = \left( \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} \right) \left( \frac{1,35U_2 \cos \alpha - E}{R} \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (359)$$

$$I_i = \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \left( \frac{1,35U_2 \cos \alpha - E}{R} \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (360)$$

$$S_1 = S_2 = 1,05 \frac{P_d}{\cos \alpha} \quad (361)$$

$$F.P. = 0,95 \cos \alpha \quad (362)$$

### **b – Conversor operando como inversor**

A Figura 61 mostra esquematicamente o conversor trifásico controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um transformador com primário ligado em triângulo e secundário ligado em estrela. A carga é ativa e devolve energia para rede de suprimento.

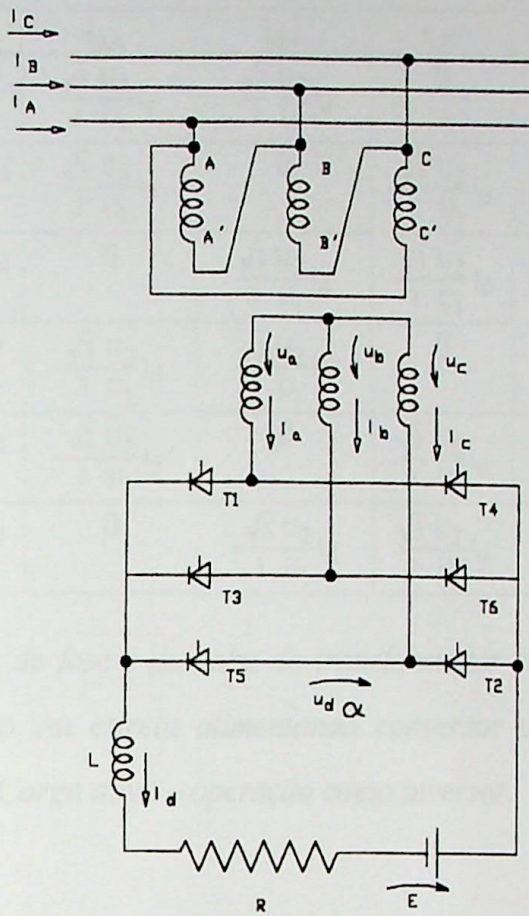


Figura 61 – Transformador triângulo-estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica. Carga ativa.

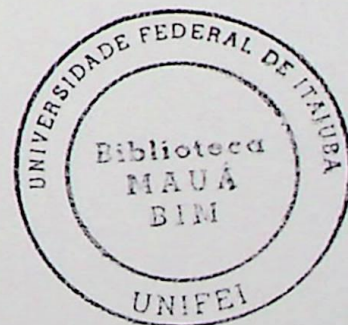
A corrente do lado de corrente alternada do conversor é igual a corrente de fase (e de linha) do secundário do transformador. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 43. A determinação das correntes de fase e de linha do circuito primário será feita através das equações (37), (38) e (39) para as correntes de fase e (40), (41) e (42) para as correntes de linha, ao longo de um período.

A Figura 62 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do circuito primário do transformador. Para obtenção da forma de onda tomou-se:

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} U_2}{3 U_1} \tag{363}$$

Intervalo	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi/6 + \alpha$ até $\pi/6 + \alpha$	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$\pi/6 + \alpha$ até $\pi/2 + \alpha$	$I_d$	0	$-I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$\pi/2 + \alpha$ até $5\pi/6 + \alpha$	0	$I_d$	$-I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$5\pi/6 + \alpha$ até $7\pi/6 + \alpha$	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$7\pi/6 + \alpha$ até $9\pi/6 + \alpha$	$-I_d$	0	$I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$
$9\pi/6 + \alpha$ até $11\pi/6 + \alpha$	0	$-I_d$	$I_d$	0	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$-\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$	$\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d$

**Tabela 08** – Correntes de fase e de linha do transformador com primário em triângulo e secundário em estrela alimentando conversor controlado ligado em ponte trifásica. Carga ativa – operação como inversor.



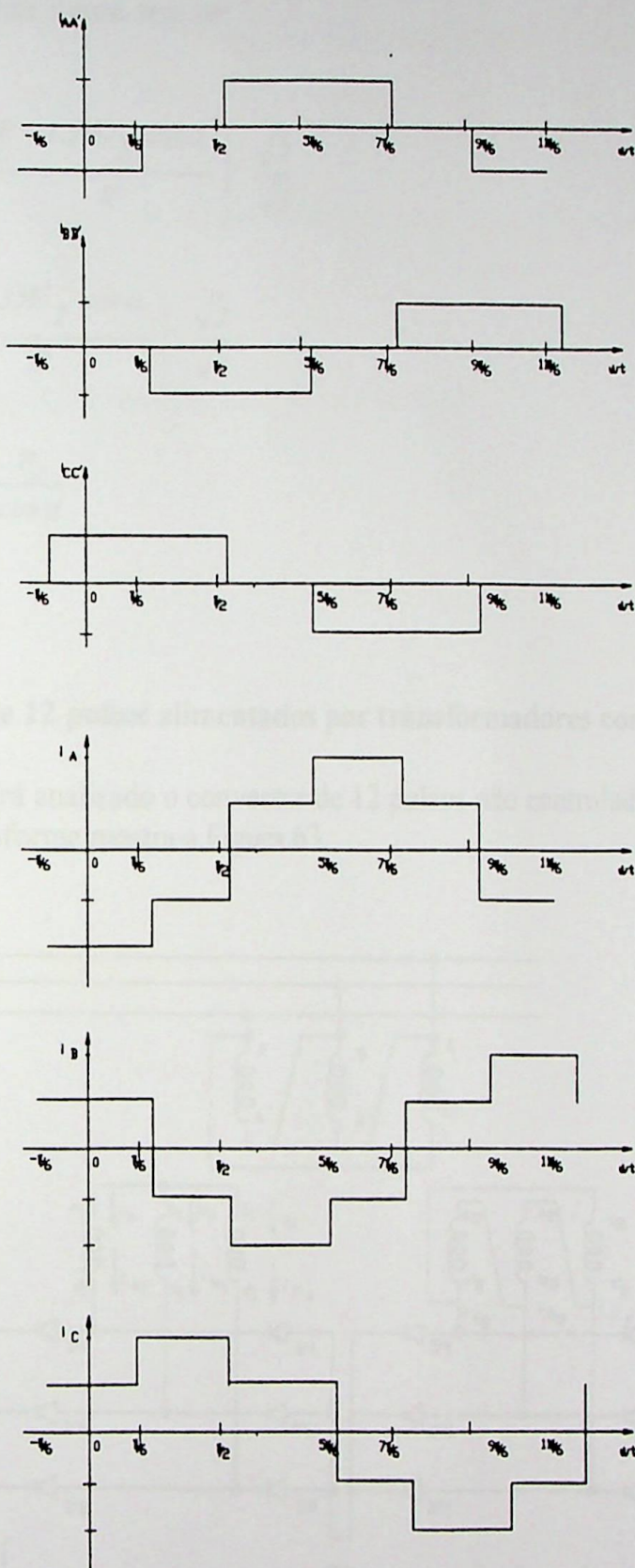


Figura 62 – Comportamento das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

Como todas as formas de onda são iguais as do caso anterior, valem as mesmas considerações. Desta forma, tem-se:

$$I_{lf} = \left( \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{U_2}{U_1} \right) \left( \frac{E + 1,35U_2 \cos \alpha}{R} \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (364)$$

$$I_l = \left( \frac{U_2}{U_1} \right) \left( \frac{E + 1,35U_2 \cos \alpha}{R} \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (365)$$

$$S_1 = S_2 = 1,05 \frac{P_d}{\cos \alpha} \quad (366)$$

$$F. P. = 0,95 \cos \alpha \quad (367)$$

### 4.3 – Conversor de 12 pulsos alimentados por transformadores com 3 circuitos

Será analisado o conversor de 12 pulsos não controlado alimentando uma carga indutiva, conforme mostra a Figura 63.

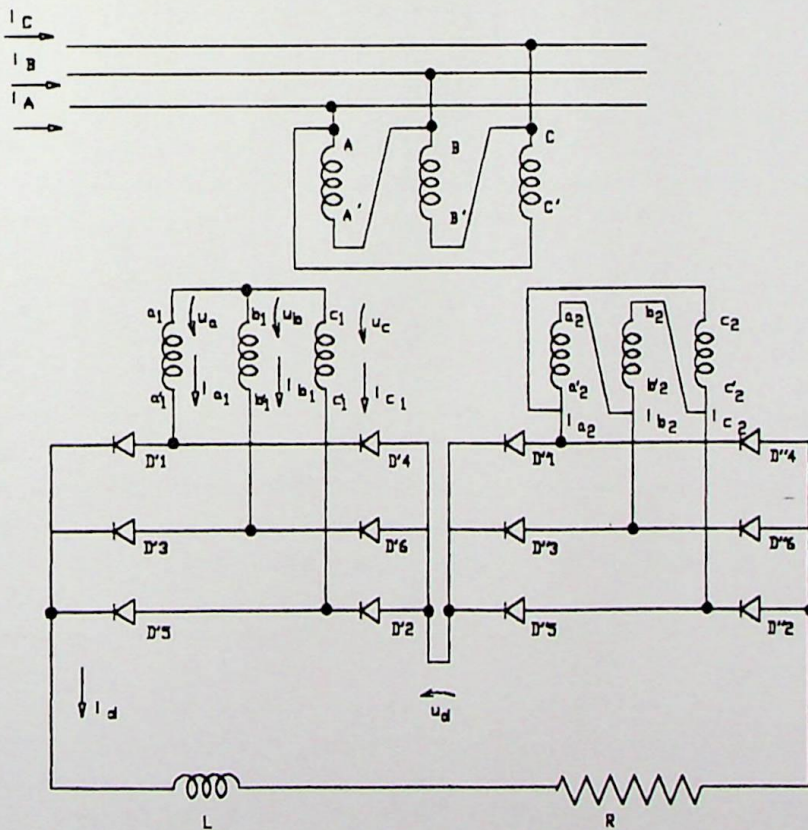


Figura 63 – Transformador em primário em triângulo e secundários em estrela e triângulo alimentando conversor de 12 pulsos – carga indutiva.

Considerando-se as equações (93), (94) e (95) obtém-se as correntes de fase do circuito primário. As correntes de linha são obtidas a partir das equações (96), (97) e (98). A Tabela 09 mostra os valores das correntes de fase e de linha.

A Figura 64 mostra as formas de onda das correntes de fase e de linha do primário do transformador.

Para determinação das curvas tomou-se:

$$K_1 = \frac{1 U_2}{3 U_1} \quad (368)$$

Intervalo	$i_{a1}$	$i_{b1}$	$i_{c1}$	$i_{a2}$	$i_{b2}$	$i_{c2}$	$i_{AA'}$	$i_{BB'}$	$i_{CC'}$	$i_A$	$i_B$	$i_C$
$-\pi/6$ até $0$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 3I_d)$
$0$ até $\pi/6$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$
$\pi/6$ até $\pi/3$	$I_d$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(3I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$
$\pi/3$ até $\pi/2$	$I_d$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$-I_d$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(3I_d + 3I_d)$
$\pi/2$ até $2\pi/3$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$-I_d$	$\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$
$2\pi/3$ até $5\pi/6$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(3I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$
$5\pi/6$ até $\pi$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(3I_d + 3I_d)$
$\pi$ até $7\pi/6$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$
$7\pi/6$ até $4\pi/3$	$-I_d$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(3I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$
$4\pi/3$ até $9\pi/6$	$-I_d$	$0$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$I_d$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 3I_d)$
$9\pi/6$ até $10\pi/6$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$-I_d$	$0$	$I_d$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$
$10\pi/6$ até $11\pi/6$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$0$	$-I_d$	$I_d$	$\frac{1U_2}{3U_1}I_d$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + 2I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(\sqrt{3}I_d + I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$	$-\frac{1U_2}{3U_1}(3I_d + 3I_d)$	$\frac{1U_2}{3U_1}(2\sqrt{3}I_d + 3I_d)$

**Tabela 09** – Correntes de fase e de linha de transformador com primário em triângulo e secundário em estrela-triângulo alimentando conversor de 12 pulsos.

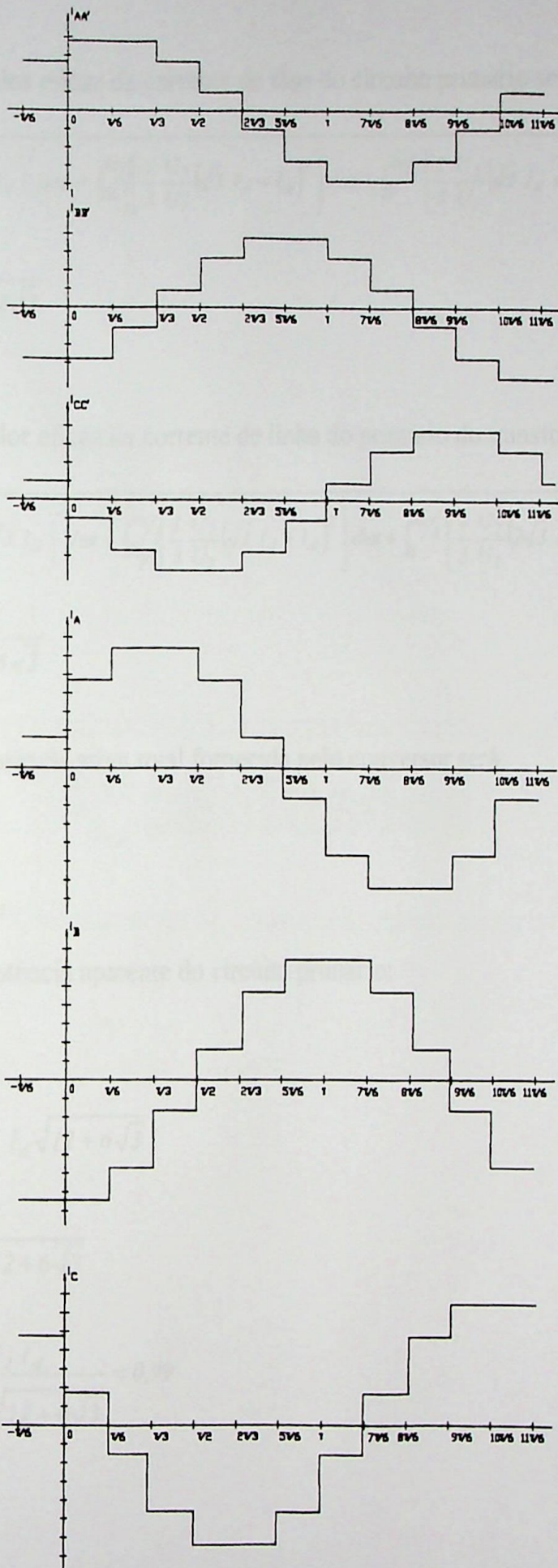


Figura 64 – Comportamento das correntes de fase e de linha do transformador.

O valor eficaz da corrente de fase do circuito primário será:

$$I_{1f} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{2\pi/3} \left( \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} I_d \right)^2 d\omega t + \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} \left[ \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (\sqrt{3} I_d + I_d) \right]^2 d\omega t + \int_0^{2\pi/3} \left[ \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (\sqrt{3} I_d + 2I_d) \right]^2 d\omega t \right]} \quad (369)$$

$$I_{1f} = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} \cdot I_d \sqrt{4 + 2\sqrt{3}} \quad (370)$$

O valor eficaz da corrente de linha do primário do transformador será:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{2\pi/3} \left( \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} \sqrt{3} I_d \right)^2 d\omega t + \int_{2\pi/3}^{4\pi/3} \left[ \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (\sqrt{3} I_d + I_d) \right]^2 d\omega t + \int_0^{2\pi/3} \left[ \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} (2\sqrt{3} I_d + I_d) \right]^2 d\omega t \right]} \quad (371)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} \cdot I_d \sqrt{12 + 6\sqrt{3}} \quad (372)$$

A potência ativa total fornecida pelo conversor será:

$$P_{d(total)} = U_d I_d \quad (373)$$

$$P_{d(total)} = 2,7 U_2 \cdot I_d \quad (374)$$

A potência aparente do circuito primário:

$$S_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \quad (375)$$

$$S_1 = \sqrt{3} U_1 \cdot \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} \cdot I_d \sqrt{12 + 6\sqrt{3}} \quad (376)$$

$$S_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} U_2 \cdot I_d \sqrt{12 + 6\sqrt{3}} \quad (377)$$

$$F.P.(1) = \frac{2,7 U_2 \cdot I_d}{\frac{\sqrt{3}}{3} U_2 I_d \sqrt{12 + 6\sqrt{3}}} = 0,99 \quad (378)$$

Das conclusões importantes são as seguintes:

1. Na transformação convencional, o comportamento da corrente de fase e de linha dos circuitos primário e secundário de transformadores subtransmissores e transformadores de linha com cargas tipo de corrente direta, sob as formas determinadas em função do sistema de linha de transmissão de transmissão, de fase, de corrente de carga.

2. No sistema para os transformadores de corrente de fase e de valores instantâneos das correntes de linha de corrente alternada de transformadores sob diversas condições e vários tipos de carga. Também foram estabelecidas equações que permitem o cálculo para a conversão das potências ativa e reativa, de modo que o valor médio da tensão na linha

# Conclusões

Na transformação convencional, o comportamento da corrente de fase e de linha dos circuitos primário e secundário de transformadores subtransmissores e transformadores de linha com cargas tipo de corrente direta, sob as formas determinadas em função do sistema de linha de transmissão de transmissão, de fase, de corrente de carga.

As conclusões mais importantes que resultaram desta investigação são as seguintes:

1. Na transformação convencional, o comportamento da corrente de fase e de linha dos circuitos primário e secundário de transformadores subtransmissores e transformadores de linha com cargas tipo de corrente direta, sob as formas determinadas em função do sistema de linha de transmissão de transmissão, de fase, de corrente de carga.
2. Na transformação de fase e de valores instantâneos das correntes de fase e de linha de transformadores sob diversas condições e vários tipos de carga. Os valores instantâneos das correntes de fase e de linha do primário do transformador dependem dos valores instantâneos da corrente de carga e também da relação de espiras dos circuitos primário e secundário. A utilização de um dispositivo adequado no transformador para controle rígido do ângulo de partida de linha primária em um fase, pode permitir a atuação dos circuitos de fase de corrente de fase e de linha no primário, com o objetivo de controlar o volume e conteúdo harmônico da corrente. Fica mais evidente para os seguintes:

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou três partes distintas:

- Na primeira parte foram determinadas as relações entre as correntes de fase e de linha dos circuitos primário e secundário de transformadores monofásicos e transformadores trifásicos com vários tipos de **conexão**. Estas relações foram determinadas em função da corrente de linha do secundário do transformador, ou seja, da corrente de carga.
- Na segunda parte do trabalho, foram determinadas as formas de **onda** e os valores eficazes das correntes do lado de corrente alternada de **conversores** com diversas configurações e vários tipos de carga. Também foram estabelecidas equações que permitem o cálculo para o conversor das potências ativa e aparente, da relação entre o valor médio da tensão **no lado** de corrente contínua e do valor eficaz do lado de corrente alternada e do fator de potência.
- Na terceira parte foram utilizadas as relações estabelecidas anteriormente para determinar as formas de onda e os valores eficazes das **correntes** de fase e de linha do transformador em função do tipo do transformador, da configuração do conversor e do tipo de carga.

As conclusões mais importantes que resultaram deste desenvolvimento são apresentadas a seguir:

1. Em transformadores monofásicos, o comportamento da corrente do primário é igual ao da corrente do secundário. Foi desprezada a corrente a vazio, uma vez que a análise limitou-se ao regime permanente e a **condições** normais de operação.
2. Em transformadores trifásicos com dois circuitos os valores **instantâneos** das correntes de fase e de linha do secundário dependem da corrente de carga. Os valores instantâneos das correntes de fase e de linha do **primário** do transformador dependem dos valores instantâneos da corrente de carga e também da relação de espiras dos circuitos primário e secundário. A utilização de um dispositivo eletrônico no transformador para **variação** rápida do número de espiras de forma independente nas três fases, pode permitir a alteração das formas de onda das correntes de fase e de **linha** do primário, com o objetivo, por exemplo, de redução e conteúdo harmônico, da corrente. Fica nossa sugestão para um novo trabalho.

3. O trabalho não abordou transformadores com conexão zigue-zague, adequados para conversores com número de pulsos maior que 12. Limitou-se a transformadores com três circuitos (adequados para conversores de 12 pulsos), pois são os mais usuais atualmente.
4. Com relação aos tipos de conversores, foram analisadas tanto conexões de pouco uso (conversores de meia onda) quanto aquelas bastante utilizadas em termos industriais (pontes monofásica e trifásica e conversores de 12 pulsos). A análise dos conversores de meia onda e do conversor ligado em estrela permite conclusões que ainda podem trazer contribuições referentes a nova conceituação de potência e fator de potência para cargas não lineares. Cite-se por exemplo, o caso dos conversores de meia onda alimentando uma carga resistiva, porém com o fator de potência resultante menor que 1. Ou ainda o caso do conversor ligado em estrela, para o qual o fator de potência do ponto de vista do secundário do transformador é menor que o fator de potência visto pela rede de suprimento de energia, ou seja, o transformador corrige o fator de potência.
5. Na análise dos conversores controlados foram estabelecidas equações para ângulos de disparo que não provocam intermitência de corrente. Inicialmente supõe-se que a intermitência reduz o valor eficaz da corrente, solicitando menos o transformador. Recomenda-se porém, em um outro trabalho, verificar a veracidade desta afirmação, pois a intermitência da corrente pode aumentar o conteúdo harmônico da corrente no transformador.
6. Uma vez que não ocorra intermitência de corrente, verifica-se que as formas de onda das correntes nos circuitos primário e secundário do transformador independem do ângulo de disparo, para cargas indutivas.
7. Conforme confirmam a Tabela 09 e as formas de onda das correntes na Figura 64, o desempenho do conversor de 12 pulsos, é o melhor em termos de conteúdo harmônico de corrente. Tanto que o fator de potência do conjunto é 0,99.

# **Bibliografia**

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Rezek, A.J.J. – “*Análise em Regime Permanente e Transitório de um Sistema de Conversão de Energia Elétrica AC/DC*” – Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá/MG, junho, 1986;
- [2] Möltgen, G. – “*Line Commutated Thyristor Converters*” – Siemens Aktiengesellschaft Pitman Publishing, London, 1972;
- [3] Kostenko, M. P.; Piotrovski, L.M. – “*Máquinas Elétricas*” – Editorial Mir Moscu, 1976;
- [4] I. Barbi – “*Eletrônica de Potência*” – Edição do Autor, Florianópolis, 2000;
- [5] Almeida, José Luis Antunes – “*Eletrônica de Potência*” – Editora Érica, São Paulo, SP, 1986;
- [6] Bose, B.K. – “*Modern Power Electronics – Evolution, Thechnology and Applications*”, IEE Industrial Electronics Society, New York, USA, 1992;
- [7] Sá, Jocélio S. – “*Conversores Controlados*” – Apostila Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.
- [8] Angelo J. J. Rezek; José P. G.de Abreu; Valberto F.da Silva; José M. E. Vicente; José A. Cortez; Otavio H. S. Vicentini; Adriana Cortez de Sá; Mauro S. Miskulin - “*Power factor improvement of line-commutated graetz converters by increasing their number of pulses: modeling and experimental results*” – artigo aceito para apresentação e publicação no 10º ICHQP (International Conference on Harmonics and Quality of Power) a ser realizado no Rio de Janeiro/RJ- Brasil, no período de 6 a 9 de outubro/2002.