

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**INVERSOR PUSH-PULL
A TRÊS NÍVEIS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

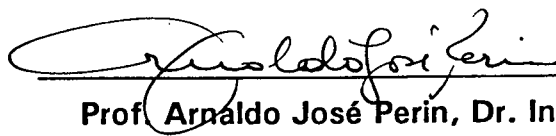
ALBERTO CARLOS ARISPE SANTANDER

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 1993

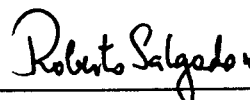
**INVERSOR PUSH-PULL
A TRÊS NÍVEIS**

ALBERTO CARLOS ARISPE SANTANDER

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA, ÁREA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA E ACIONAMENTO ELÉTRICO, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

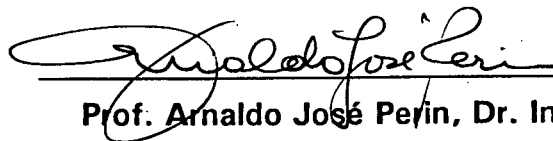


**Prof. Arnaldo José Perin, Dr. Ing.
ORIENTADOR**



**Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

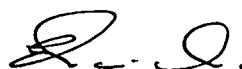
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Arnaldo José Perin, Dr. Ing.



Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.



Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.

A mi esposa Elena y mi hijo Alberto.

A mis Padres y Hermanos.

AGRADECIMENTOS

- **Ao Prof. Arnaldo José Perin, pela sua orientação, pelos seus ensinamentos e pela amizade demonstrada ao longo deste trabalho.**
- **A todo o pessoal do LAMEP, e à Universidade Federal de Santa Catarina.**
- **Agradecimento especial a meus colegas pelas sugestões, e, principalmente, pelo companheirismo e amizade dispensados durante esse período.**
- **À meu pai, meu primeiro MESTRE.**
- **À minha esposa Elena e meu filho Alberto, pela paciência e estímulo.**
- **À CAPES, pelo apoio financeiro durante a pesquisa.**
- **À SPECTRO, pelos componentes cedidos para a realização da montagem.**

SUMÁRIO

SIMBOLOGIA	VII
RESUMO	X
ABSTRACT	XI

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1.- USO DOS GRUPOS GERADORES (CONVERSORES ROTATIVOS)	1
1.2.- USO DOS CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CA	1

CAPÍTULO 2

ESTUDO DO CONVERSOR PUSH-PULL

2.1.- INTRODUÇÃO	5
2.2.- CONVERSOR PUSH-PULL	5
2.2.1.- <i>Análise da Tensão de Entrada</i>	6
2.2.2.- <i>Análise da Tensão de Saída</i>	8
2.2.3.- <i>Relação Entre a Tensão de Entrada, a Tensão de Saída e o Tempo de Condução das Chaves</i>	9
2.3.- PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO	11
2.3.1.- <i>Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima</i>	11
2.3.2.- <i>Formas de Onda</i>	12
2.3.3.- <i>Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima</i>	13
2.3.4.- <i>Formas de Onda</i>	15
2.4.- CONCLUSÕES	15

CAPÍTULO 3

ESTRUTURAS DO CONVERSOR PUSH-PULL A TRÊS NÍVEIS

3.1.- INTRODUÇÃO	17
3.2.- ESTRUTURAS PROPOSTAS	17
3.3.- ANÁLISE TEÓRICA DA PRIMEIRA ESTRUTURA PROPOSTA	18
3.3.1.- Princípio de Operação	19
3.3.2.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima	19
3.3.3.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima	20
3.3.4.- Formas de Onda	21
3.3.5.- Análise Quantitativa	22
3.4.- ANÁLISE TEÓRICA DA SEGUNDA ESTRUTURA PROPOSTA	27
3.4.1.- Princípio de Operação	28
3.4.2.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima	28
3.4.3.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima	29
3.4.4.- Formas de Onda	31
3.4.5.- Análise Quantitativa	31
3.5.- CONCLUSÕES	37

CAPÍTULO 4

ESTUDO POR SIMULAÇÃO DAS ESTRUTURAS DO CONVERSOR PUSH-PULL A TRÊS NÍVEIS

4.1.- INTRODUÇÃO	38
4.2.- CÁLCULO DOS PARÂMETROS	38
4.2.1.- Cálculo da Impedância de Carga	38
4.2.2.- Cálculo da Corrente Eficaz na Fonte de Entrada	39
4.2.3.- Cálculo das Indutâncias do Primário e Secundário	39
4.3.- SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA ESTRUTURA	40
4.3.1.- Indutância de Dispersão do Transformador	40
4.3.2.- Cálculo dos Parâmetros de Ajuda à Comutação	41
4.3.3.- Simulação Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima	42

4.3.4.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima	43
4.3.5.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima	44
4.4.- SIMULAÇÃO DA SEGUNDA ESTRUTURA	45
4.4.1.- Indutância de Dispersão do Transformador	45
4.4.2.- Cálculo dos Parâmetros de Ajuda à Comutação	46
4.4.3.- Simulação Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima . . .	47
4.4.4.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima	48
4.4.5.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima	49
4.5.- CONCLUSÕES	50

CAPÍTULO 5

PROJETO DAS ESTRUTURAS A TRÊS NÍVEIS

5.1.- INTRODUÇÃO	51
5.2.- CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE CARGA	51
5.3.- CÁLCULO DA CORRENTE EFICAZ NA CARGA	52
5.4.- CÁLCULO DO TRANSFORMADOR	52
5.5.- CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE CARGA REFLETIDA PARA O PRIMÁRIO .	53
5.6.- CÁLCULO DA CORRENTE EFICAZ TOTAL NO PRIMÁRIO	53
5.7.- CÁLCULO DA CORRENTE EFICAZ EM CADA PRIMÁRIO	54
5.8.- DIMENSIONAMENTO DOS INTERRUPTORES	54
5.8.1.- Cálculo da Queda de Tensão em Cada Interruptor	54
5.9.- CÁLCULO DAS CORRENTES DE PICO, MÉDIA E EFICAZ	54
5.9.1.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima	54
5.9.2.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima	56
5.9.3.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima	57
5.9.4.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima	60

5.10.- EXEMPLO DE PROJETO PARA A PRIMEIRA ESTRUTURA	63
5.10.1.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima</i>	65
5.10.2.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima</i>	65
5.10.3.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima</i>	66
5.10.4.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima</i>	68
5.11.- EXEMPLO DE PROJETO PARA A SEGUNDA ESTRUTURA	70
5.11.1.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima</i>	72
5.11.2.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima</i>	73
5.11.3.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima</i>	74
5.11.4.- <i>Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima</i>	75
5.5.- CONCLUSÕES	77

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1.- INTRODUÇÃO	79
6.2.- CIRCUITO DE COMANDO DA PRIMEIRA ESTRUTURA	79
6.2.1.- <i>Oscilador de Frequência</i>	80
6.2.2.- <i>Divisor de Frequência</i>	80
6.2.3.- <i>Circuito "Driver"</i>	81
6.2.4.- <i>Circuito de Comando dos Interruptores Principais</i>	82
6.2.5.- <i>Circuito de Comando dos Interruptores Auxiliares</i>	82
6.2.6.- <i>Circuito Completo de Comando</i>	83
6.2.7.- <i>Circuito de Potência</i>	85

6.3.- RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO PROTÓTIPO DA PRIMEIRA ESTRUTURA	86
6.3.1.- Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva	86
6.3.2.- Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva	87
6.4.- CIRCUITO DE COMANDO DA SEGUNDA ESTRUTURA	88
6.4.1.- Oscilador de Frequência	89
6.4.2.- Divisor de Frequência	89
6.4.3.- Circuito "Driver"	89
6.4.4.- Circuito de Comando dos Interruptores Principais	90
6.4.5.- Circuito de Comando dos Interruptores Auxiliares	91
6.4.6.- Circuito Completo de Comando	91
6.4.7.- Circuito de Potência	94
6.5.- RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO PROTÓTIPO DA SEGUNDA ESTRUTURA	95
6.5.1.- Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva	95
6.5.2.- Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva	96
6.6.- CONCLUSÕES	98
 CONCLUSÕES GERAIS	99
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

SIMBOLOGIA

a_n, b_n	Coeficientes da Série de Fourier
C_s	Capacitor do Circuito de Ajuda à Comutação
D_1 a D_6	Diodos
D_s	Diodo do Circuito de Ajuda à Comutação
E	Tensão de Entrada CC
$E_{Máx}$	Tensão de Entrada Máxima
$E_{Mín}$	Tensão de Entrada Mínima
f	Frequência de Chaveamento
I_p	Corrente no Primário
$I_{pEffTOTAL}$	Corrente Eficaz Total do Primário
I_{pEff}	Corrente Eficaz no Primário
I_{pk}	Corrente de Pico
I_s	Corrente na Carga
I_{sEff}	Corrente Eficaz do Secundário
I_c	Corrente de Carga do Circuito de Ajuda à Comutação
I_{S1}	Corrente na Chave S_1
I_{S2}	Corrente na Chave S_2
I_{S3}	Corrente na Chave S_3
I_{S4}	Corrente na Chave S_4
I_{D1}	Corrente no Diodo D_1
I_{D2}	Corrente no Diodo D_2
I_{D3}	Corrente no Diodo D_3
I_{D4}	Corrente no Diodo D_4
I_{D5}	Corrente no Diodo D_5
I_{D6}	Corrente no Diodo D_6
I_{M1}	Corrente no MOSFET M_1
I_{M2}	Corrente no MOSFET M_2
I_{M3}	Corrente no MOSFET M_3

I_{M4}	Corrente no MOSFET M_4
I_{C1}	Corrente no Transistor Bipolar T_1
I_{L1}	Corrente no Primário do Transformador
i_u	Corrente de Magnetização
i_{uo}	Corrente Inicial de Magnetização
i'_{so}	Corrente Inicial do Secundário Refletida Para o Primário
i'_s	Corrente do Secundário Refletida para o Primário
k	Número de Interruptores Conduzindo
L_c	Indutância de Carga
L_u	Indutância de Magnetização
L'_c	Indutância de Carga Refletida para o Primário
L_s	Indutância do secundário
M_1 a M_4	MOSFET's
n_p	Número de Espiras do Primário
n_s	Número de Espiras do Secundário
P_{EnA}	Potência Aparente de Entrada
P_A	Potência Aparente de Saída
T_1, T_2	Transistores Bipolares
R_c	Resistência de Carga
$R_{DS(on)}$	Resistência de Condução do Interruptor
R_s	Resistência do Circuito de Ajuda à Comutação
R'_c	Resistência de Carga Refletida para o Primário
S_1, S_2	Chaves Principais
S_3, S_4	Chaves Auxiliares
t	Tempo
t_c	Tempo de Condução da Chave Principal
t_m	Tempo Morto
t_{on}	Tempo Mínimo de Condução da Chave
$V_{En}(wt)$	Tensão Total do primário
V_{En1}	Tensão de Pico da Fundamental
V_{En1Eff}	Tensão Eficaz da Fundamental
$V_{EnEffTOTAL}$	Tensão Eficaz Total do Primário

V_p	Tensão no Primário
$V_s(wt)$	Tensão de Saída
V_{s1}	Tensão de Pico da Fundamental
V_{s1Eff}	Tensão Eficaz da Fundamental
$V_{sEffTOTAL}$	Tensão Eficaz Total de Saída
V_s	Tensão na Carga
V_{S1}	Tensão na Chave S_1
V_{S2}	Tensão na Chave S_2
V_{S3}	Tensão na Chave S_3
V_{S4}	Tensão na Chave S_4
V_{D1}	Tensão na Chave D_1
V_{D2}	Tensão no Diodo D_2
V_{D3}	Tensão no Diodo D_3
V_{D4}	Tensão no Diodo D_4
V_{D5}	Tensão no Diodo D_5
V_{D6}	Tensão no Diodo D_6
V_{M1}	Tensão na MOSFET M_1
V_{M2}	Tensão na MOSFET M_2
V_{M3}	Tensão na MOSFET M_3
V_{M4}	Tensão na MOSFET M_4
V_{C1}	Tensão no Transistor Bipolar T_1
V_{L1}	Tensão no primário do Transformador
Z'_c	Impedância de Carga Refletida para o Primário
ϕ	Ângulo de condução das chaves
ΔV	Queda de Tensão na Chave
τ_c	Constante de Tempo do Circuito

RESUMO

Apresenta-se o estudo de duas novas estruturas inversoras monofásicas, moduladas por pulso único. O objetivo é obter na saída uma forma de onda à três níveis (Positivo, Nulo, Negativo), com a qual se garanta na saída uma tensão constante, independente da carga e das variações da fonte de entrada.

As novas estruturas inversoras propostas foram geradas a partir do conversor push-pull.

As estruturas propostas serão analisadas, estabelecendo-se as etapas de funcionamento, a partir das quais será feito um projeto para cada estrutura.

Apresenta-se os resultados de simulação e experimentais de um protótipo de 1 KVA de potência, validando-se os estudos teóricos e analíticos realizados.

ABSTRACT

This work proposes the study of two single phase inverter topologies, modulated by a single pulse. The objective is to obtain a three level waveform in the output (positive, nule, negative), so as to guarantee a constant voltage independent of the load and compensate the input source variations. These new inverters topologies were created based on the push-pull converter.

The proposed inverters are analysed and the stages of operation and theoretical analysis are presented along with a project for each one.

The simulation and experimental results of a 1KVA prototype are also presented, validating the theoretical and analytical study.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se mostrar a importância dos conversores estáticos CC-CA em relação aos grupos geradores, dentro das indústrias e de outros setores de consumo de energia, onde se faz necessária uma rede alternativa para funcionamento em caso de falha da rede comercial. Além do que os conversores estáticos CC-CA, podem também serem adaptados para utilização como conversores estáticos CC-CC.

1.1.- USO DE GRUPOS GERADORES (CONVERSORES ROTATIVOS).-

Em caso de falha da rede comercial, em centros de consumo de energia elétrica, onde esta não deve faltar, são usados grupos geradores, com a qual se tem uma tensão constante e uma forma de onda senoidal. Os grupos geradores requerem uma área exclusiva, pessoal especializado para fazer a manutenção preventiva e operação da mesma. Por esta razão o custo do grupo gerador é elevado. Além disto, não podem ser usados para alimentar cargas críticas que não admitem falta de energia durante o tempo necessário para a entrada em operação dos grupos geradores.

Hoje em dia, este fato leva ao uso dos conversores estáticos CC-CA ou uso dos sistemas de alimentação ininterrupta (UPS) para cargas onde a energia não pode ser interrompida.

1.2.- USO DOS CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CA.-

Os conversores estáticos CC-CA são chamados também de inversores, e convertem corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Com estes conversores se tem controle da frequência e da amplitude da tensão de saída.

Existem vários tipos de conversores estáticos CC-CA, dependendo do número de fase (monofásicos, polifásicos). Dentro dos conversores monofásicos tem-se as seguintes estruturas [1]:

- Conversor em Meia Ponte (Figura 1.1)
- Conversor em Ponte Completa (Figura 1.2)
- Conversor Push-Pull (Figura 1.3)

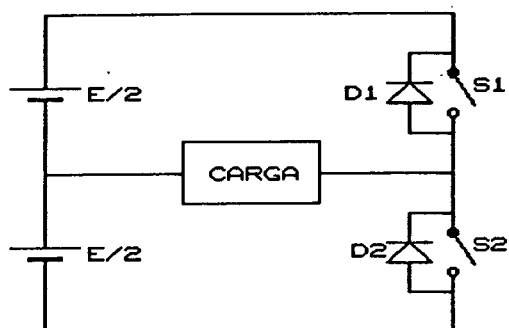


FIGURA 1.1
CONVERSOR EM MEIA PONTE

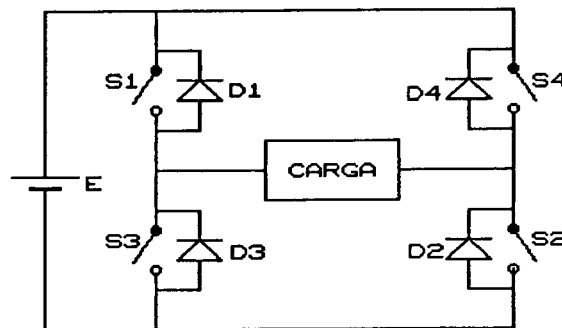


FIGURA 1.2
CONVERSOR EM PONTE COMPLETA

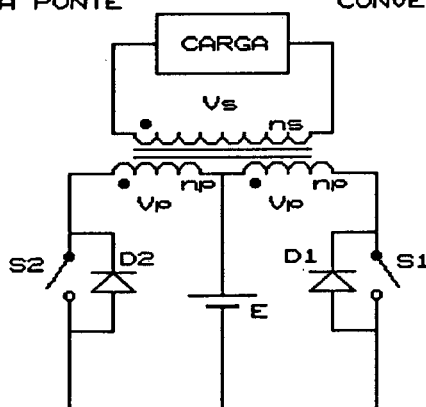


FIGURA 1.3
CONVERSOR PUSH-PULL

O conversor em ponte completa é empregado para altas potências e altas frequências, porque a tensão sobre as chaves é igual à da fonte de entrada. O conversor em meia ponte é empregado para médias potências e altas frequências; a tensão nas chaves é igual à da fonte de entrada, mas usa duas fontes de entrada. O conversor push-pull é empregado para baixas potências e baixas frequências, porque a tensão nas chaves é igual ao dobro da tensão de entrada e usa um transformador com ponto médio.

Para baixas potências e baixas frequências, os conversores mais empregados são o conversor em meia ponte e o conversor push-pull porque ambos possuem apenas duas chaves principais e o comando é simples; mas a diferença entre estes conversores, é que o conversor push-pull só tem uma fonte de entrada, além do que o transformador isola a carga e adapta a tensão de entrada à tensão de saída.

Assim, com as estruturas apresentadas, dependendo da técnica de modulação a ser empregada, é possível se ter na saída uma forma de onda quadrada, quase-quadrada ou senoidal.

Em caso de falta da rede comercial, para cargas críticas, como computadores, equipamentos de telecomunicação etc., que requerem energia sem interrupção e baixa potência, são usados os conversores estáticos CC-CA monofásicos.

Com as estruturas monofásicas apresentadas, quando são moduladas por pulso único, para garantir tensão constante na saída, isto é, manter constante o valor eficaz ou a amplitude da fundamental, uma das alternativas é que a fonte de entrada seja variável, a qual teria que ser uma ponte retificadora controlada ou um conversor estático CC-CC. Outra alternativa é criar o terceiro nível de tensão, isto é, ter na saída tensão igual à zero [2].

O conversor push-pull modulado por pulso único, é o mais empregado na indústria para alimentar cargas críticas onde a forma de onda não é muito importante. O conversor possui dois interruptores e seu comando é simples, mas não garante na saída tensão constante para variações de carga, além de não compensar variações da fonte de entrada.

Para garantir na saída do conversor push-pull uma tensão constante independente da carga e compensar as variações da fonte de entrada, a alternativa mais econômica seria a criação do terceiro nível de tensão.

No presente trabalho para que o conversor push-pull garanta na saída tensão constante independente da carga e seja possível compensar as variações da tensão de entrada, são propostas duas novas estruturas inversoras, a partir do conversor push-pull representada na Figura 1.3.

No capítulo 2, se faz o estudo teórico do conversor push-pull, onde é mostrado que para modulação por pulso único, não é possível garantir tensão constante na saída.

No capítulo 3, são apresentadas as duas novas estruturas, com as quais é possível garantir na saída tensão constante independente da carga, através do terceiro nível.

No capítulo 4, se faz o estudo por simulação das estruturas propostas,

onde é mostrada a sobretensão causada pela indutância de dispersão do transformador. Estas sobretensões são limitadas por circuitos limitadores de tensão.

No capítulo 5 , faz-se o projeto de cada uma das estruturas.

No capítulo 6, são mostrados os resultados experimentais obtidos a partir dos protótipos implementados em laboratório, com os parâmetros projetados no capítulo 5. Também é mostrado o circuito de comando de cada uma das estruturas. Finalmente, é realizado uma comparação entre as vantagens e desvantagens de cada uma das estruturas propostas.

CAPÍTULO 2

ESTUDO DO CONVERSOR PUSH-PULL

2.1.- INTRODUÇÃO.-

Será feita a análise teórica do conversor Push-Pull alimentado em tensão, modulado por pulso único (SPM - Single Pulse Modulation), verificando a possibilidade de se obter na saída tensão constante, independente da carga e das variações da fonte de alimentação.

Inicialmente será feita uma análise teórica da tensão de entrada e da tensão de saída, para obter as equações que regem o funcionamento do conversor e a relação que existe entre a tensão de entrada, a tensão de saída e o tempo de condução das chaves. A análise será feita para os piores casos, alimentando carga indutiva (para tensão de entrada máxima e mínima).

2.2.- CONVERSOR PUSH-PULL.-

Cada chave do conversor Push-Pull, quando modulado por pulso único, conduz uma única vez por período de funcionamento. O conversor é mostrado na Figura 2.1.

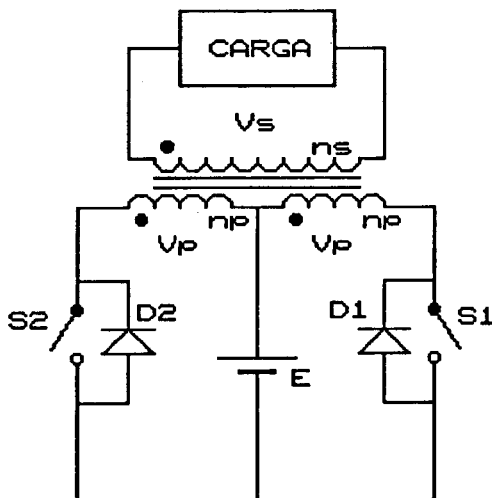


Figura 2.1. Conversor Push-Pull.

- S_1, S_2 Chaves Principais do Conversor
- D_1, D_2 Diodos do Conversor
- E Tensão de Entrada CC
- V_p Tensão no Primário do Transformador
- V_s Tensão no Secundário do Transformador
- n_p Número de Espiras do Primário
- n_s Número de Espiras do Secundário

2.2.1.- Análise da Tensão de Entrada.-

O transformador do conversor Push-Pull possui dois enrolamentos primários. A forma de onda da tensão nos enrolamentos primários do transformador, é mostrada na Figura 2.2.

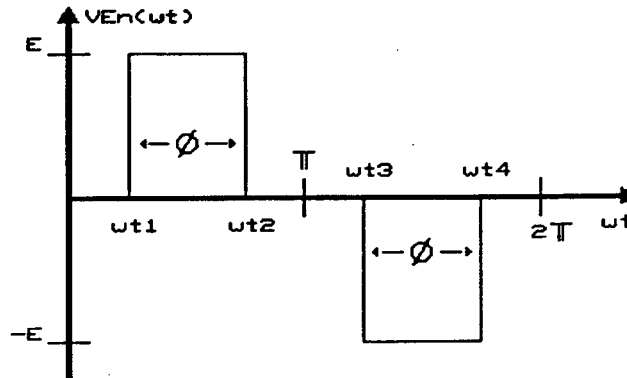


Figura 2.2.- Tensão de Entrada no Primário.

$V_{En}(\omega t)$	Tensão total do Primário
E	Tensão de Entrada CC
ϕ	Ângulo de Condução das Chaves Principais

Decompondo a forma de onda da tensão dos enrolamentos primários em termos da série de fourier, tem-se:

$$V_{En}(\omega t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sen(n\omega t)] \quad (2.1)$$

Onde:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{En}(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{En}(\omega t) \sen(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.3)$$

Pela maneira que foi colocado o eixo das ordenadas e devido a $V_{En}(\omega t)$

ter simetria de meia onda, tem-se $a_n = 0$ e $b_n = 0$ para todo n par. Ainda, pela simetria de quarto de onda, só existem os termos b_n para todo n ímpar.

Assim, é suficiente integrar em meio período.

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{En}(wt) \operatorname{sen}(nwt) d(wt) \quad (2.4)$$

Como $v_{En}(wt) = E$ para $wt_1 < wt < wt_2$ e $V_{En}(wt) = 0$ fora deste intervalo, a expressão (2.4) resulta em:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{wt_1}^{wt_2} E \operatorname{sen}(nwt) d(wt) \quad (2.5)$$

Onde:

$$wt_1 = \frac{\pi - \phi}{2} \quad (2.6)$$

$$wt_2 = \frac{\pi + \phi}{2} \quad (2.7)$$

logo:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi - \phi}{2}}^{\frac{\pi + \phi}{2}} E \operatorname{sen}(nwt) d(wt) \quad (2.8)$$

$$b_n = j^{(n-1)} \frac{4E}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\phi}{2}\right) \quad (2.9)$$

Onde:

$$j = \sqrt{-1}$$

$$n = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Portanto, a tensão de entrada no primário desenvolvida em série de fourier é dada pela expressão (2.10):

$$V_{En}(wt)_n = \frac{4E}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} j^{(n-1)} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\phi}{2}\right)}{n} \text{sen}(nwt) \quad (2.10)$$

Onde:

- a_n, b_n Coeficientes da Série de Fourier
 ϕ Ângulo de Condução das Chaves
 n Ordem dos harmônicos da série de Fourier

Os valores de pico e eficaz da fundamental ($n=1$) são dados pelas expressões (2.11) e (2.12):

$$V_{En_1} = \frac{4E}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.11)$$

$$V_{En_1, \text{eff}} = \frac{4E}{\sqrt{2}\pi} \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.12)$$

O valor eficaz total da tensão de entrada é dado pela expressão (2.14):

$$V_{En_{TOTAL, \text{eff}}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi-\phi}{2}}^{\frac{\pi+\phi}{2}} E^2 d(wt)} \quad (2.13)$$

$$V_{En_{TOTAL, \text{eff}}} = E \sqrt{\frac{\phi}{\pi}} \quad (2.14)$$

2.2.2.- Análise da Tensão de Saída.-

A forma de onda da tensão de saída é mostrada na Figura 2.3:

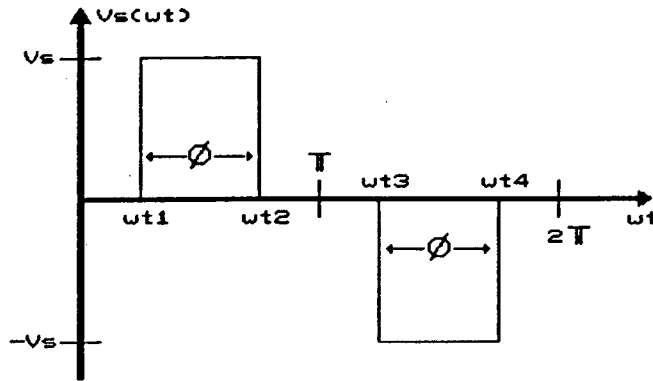


Figura 2.3.- Tensão de Saída.

$v_s(\omega t)$ Tensão de Saída

V_s Tensão no Secundário

A tensão de saída desenvolvida em série de fourier é dada pela expressão (2.15).

$$V_s(\omega t)_n = \frac{4V_s}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} j^{(n-1)} \frac{\text{sen}\left(\frac{n\phi}{2}\right)}{n} \text{sen}(n\omega t) \quad (2.15)$$

Os valores de pico e eficaz da fundamental ($n=1$) são dados pelas expressões (2.16) e (2.17) respectivamente:

$$V_{s_1} = \frac{4V_s}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.16)$$

$$V_{s_1_{\text{eff}}} = \frac{4V_s}{\sqrt{2}\pi} \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.17)$$

O valor eficaz total da tensão de saída é dado pela expressão (2.18):

$$V_{S_{\text{TOTAL}_{\text{eff}}}} = V_s \sqrt{\frac{\phi}{\pi}} \quad (2.18)$$

2.2.3.- Relação Entre a Tensão de Entrada, a Tensão de Saída e o Tempo de Condução das Chaves.

Para determinar a relação que existe entre a tensão de entrada, a tensão de saída e o tempo de condução das chaves do conversor, se faz necessário o uso da

relação de transformação do transformador.

A relação de transformação é calculada em função das eficazes fundamentais de entrada e saída, dada pela expressão (2.19):

$$\frac{n_s}{n_p} = \frac{V_{s_{1\text{eff}}}}{V_{E n_{1\text{eff}}}} \quad \text{OU} \quad \frac{n_s}{n_p} = \frac{V_s}{V_p} \quad (2.19)$$

Sendo:

$$V_p = E \quad (2.20)$$

$$V_s = \frac{\sqrt{2} \pi V_{s_{1\text{eff}}}}{4 \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2.21)$$

$$V_s = \frac{n_s}{n_p} E \quad (2.22)$$

Das expressões (2.17) e (2.22), determina-se a expressão (2.23).

$$V_{s_{1\text{eff}}} = \frac{4}{\sqrt{2} \pi} \frac{n_s}{n_p} E \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.23)$$

A expressão (2.23), demonstra que a tensão de saída depende da tensão de entrada e do ângulo de condução das chaves ϕ . Assim, se $\phi = \pi$ a tensão de saída torna-se máxima e quando $\phi = 0$ a tensão de saída é zero.

O ângulo de condução das chaves principais é dado pela expressão (2.24) e o tempo de condução das chaves principais pela expressão (2.25):

$$\phi = 2 \arcsen \left(\frac{\sqrt{2} \pi V_{s_{1\text{EFF}}}}{4 \frac{n_s}{n_p} E} \right) \quad (2.24)$$

$$t_c = \frac{\phi}{2 \pi f} \quad (2.25)$$

2.3.- PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO.-

Será feita a análise do conversor Push-Pull (Figura 2.1), submetido a tensões entrada máxima e mínima, alimentando carga indutiva.

Para simplificar a análise, são assumidas as seguintes condições:

- a.- As chaves de potência são consideradas ideais;
- b.- O transformador é considerado ideal;
- c.- A corrente de carga é refletida para o primário.

2.3.1.- Etapas de Funcionamento Para tensão de Entrada Mínima.-

Para se manter na saída do conversor uma tensão constante, varia-se o tempo de condução das chaves principais no intuito de se compensar as variações da fonte de entrada. Assim, quando a tensão de entrada é mínima assume-se que $\phi = \pi$, isto é, cada chave terá que conduzir meio período. O comando das chaves será complementar [1].

As etapas de funcionamento são mostradas na Figura 2.4 e as principais formas de onda são mostradas na Figura 2.5.

A seguir, serão descritas as etapas de funcionamento:

- Intervalo (t_0, t_1) , Figura 2.4.a :

Etapa de Transferência de Energia. No instante t_0 a corrente de carga é zero, o diodo D_1 se bloqueia, e como a chave S_1 tem ordem de conduzir, ela começa a conduzir a corrente que cresce até atingir um valor máximo positivo I_p em t_1 . I_p depende da tensão de alimentação, da relação de transformação e da carga. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

-Intervalo (t_1, t_2) , Figura 2.4.b:

Quando $t=t_1$, a chave S_2 é comandada a conduzir e a chave S_1 é bloqueada. Nesta etapa a corrente no primário não se inverte instantaneamente e pela lei de Lenz, existe uma inversão instantânea da tensão nas indutâncias do transformador. O diodo D_2 entra em condução e a corrente decresce positivamente até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

-Intervalo (t_2, t_3), Figura 2.4.c :

Etapa de Transferência de Energia. O diodo D_2 bloqueia-se e a chave S_2 conduz a corrente, que cresce até atingir um valor máximo negativo $-I_p$. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

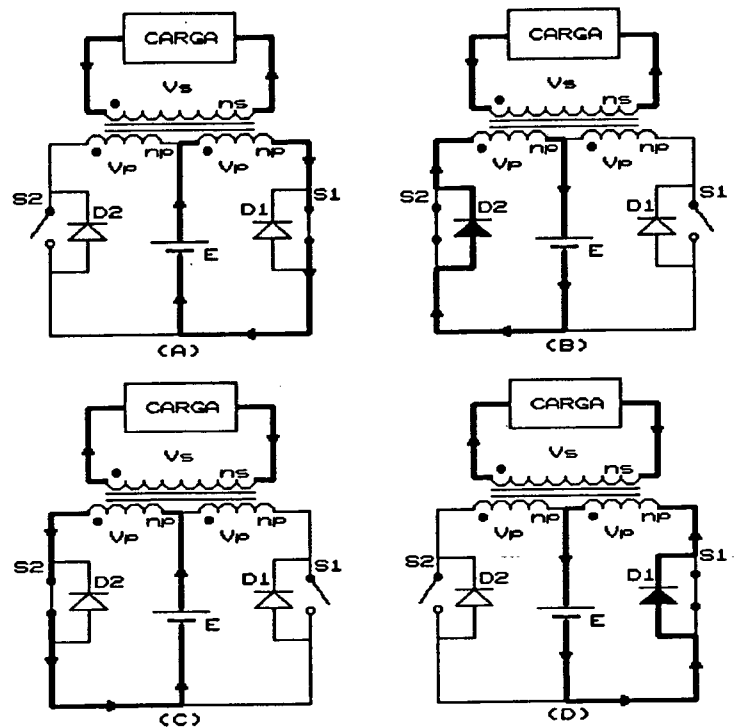


Figura 2.4.- Etapas de Funcionamento do Conversor Push-Pull.

-Intervalo (t_3, t_4), Figura 2.4.d :

A chave S_1 é comandada a conduzir e a chave S_2 é bloqueada. Como a corrente não se inverte instantaneamente, se tem inversão instantânea da tensão nas indutâncias do transformador. O diodo D_1 entra em condução e a corrente decresce negativamente até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

2.3.2.- Formas de Onda.-

Na Figura 2.5, são apresentadas as principais formas de onda das grandezas tensão e corrente na carga, tensão e corrente no primário do transformador, tensão e corrente na chave S_1 , tensão e corrente no diodo D_1 e os sinais de comando das chaves.

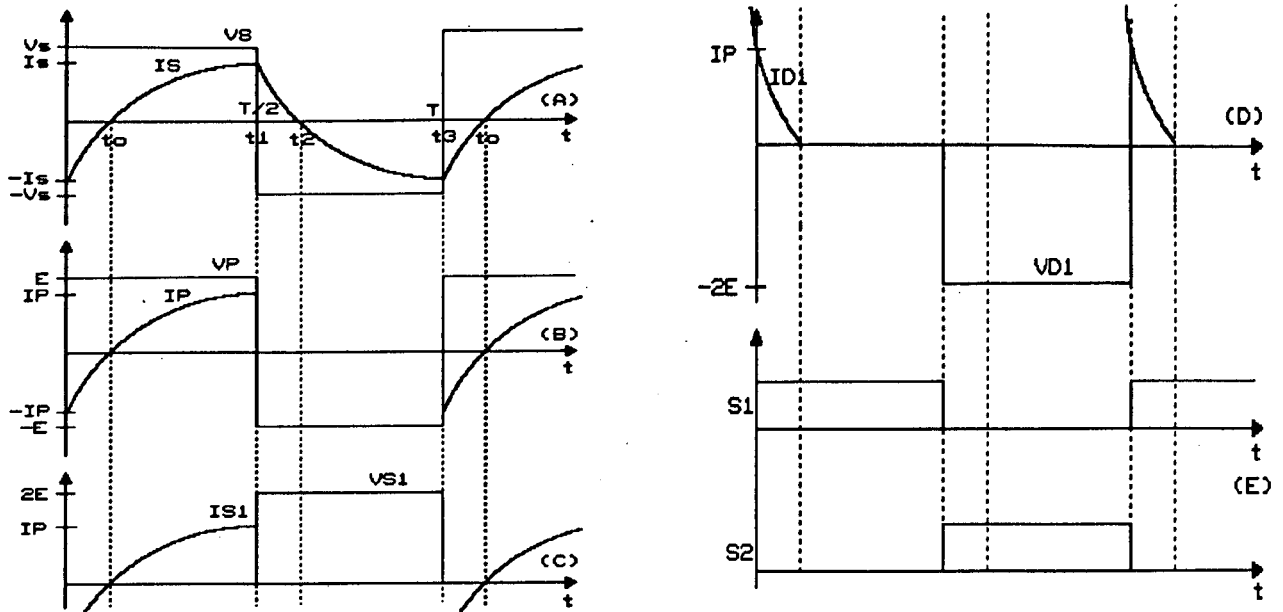


Figura 2.5.- Principais Formas de Onda do Conversor Push-Pull Para $\phi = \pi$. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador V_p , c) Tensão e Corrente na Chave S_1 , d) Tensão e Corrente no Diodo D_1 , e) Sinais de Comando das Chaves S_1 e S_2 .

2.3.3.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima.-

Para garantir na saída uma tensão constante quando a tensão de entrada for máxima, o ângulo de condução das chaves principais terá que ser menor que π ($0 < \phi < \pi$).

As etapas de funcionamento são mostradas na Figura 2.6 e as principais formas de onda são mostradas na Figura 2.7.

As etapas de funcionamento são descritas a seguir:

-Intervalo (t_0, t_1), Figura 2.6.a :

Etapa de Transferência de Energia. O diodo D_1 se bloqueia, a chave S_1 é comandada a conduzir, a corrente cresce até atingir um valor máximo positivo I_p , que depende da tensão de entrada, da relação de transformação e da carga. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

-Intervalo (t_1, t_2), Figura 2.6.b :

A chave S_1 é bloqueada. Nesta etapa a corrente não se inverte instantaneamente e pela lei de Lenz existe uma inversão instantânea da tensão nas indutâncias do transformador, o que faz conduzir o diodo D_2 . A corrente decresce

positivamente até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

-Intervalo (t_2, t_3) , Figura 2.6.c :

Nesta etapa as chaves S_1, S_2 estão bloqueadas, os diodos D_1, D_2 estão bloqueados e a corrente é zero. A tensão na carga é zero.

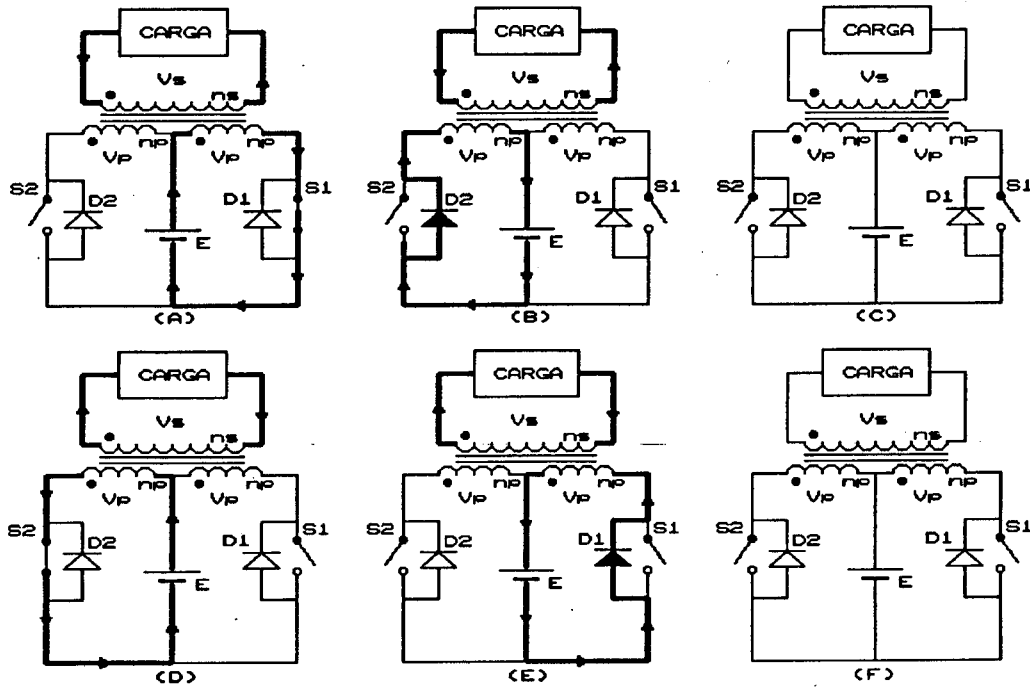


Figura 2.6.- Etapas de Funcionamento do Conversor Push-Pull.

-Intervalo (t_3, t_4) , Figura 2.6.d :

Etapa de Transferência de Energia. A chave S_2 é comandada a conduzir. A corrente cresce até atingir um valor máximo negativo $-I_p$, que depende da fonte de alimentação, da relação de transformação e da carga. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

-Intervalo (t_4, t_5) , Figura 2.6.e :

Nesta etapa a chave S_2 é bloqueada. A corrente não se inverte instantaneamente e ocorre a inversão instantânea da tensão nas indutâncias do transformador, o que faz conduzir o diodo D_1 . A corrente decresce negativamente até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

-Intervalo ($t_{\sigma} t_{\sigma}$), Figura 2.6.f :

Nesta etapa as chaves S_1, S_2 estão bloqueadas, os diodos D_1, D_2 estão bloqueados e a corrente é zero. A tensão na carga é zero.

2.3.4.- Formas de Onda.-

As principais formas de onda das etapas de funcionamento, são mostradas na Figura 2.7 [3], onde são mostradas a tensão e corrente na carga, tensão e corrente no primário do transformador, tensão e corrente na chave S_1 , tensão e corrente no diodo D_1 e os sinais de comando das chaves.

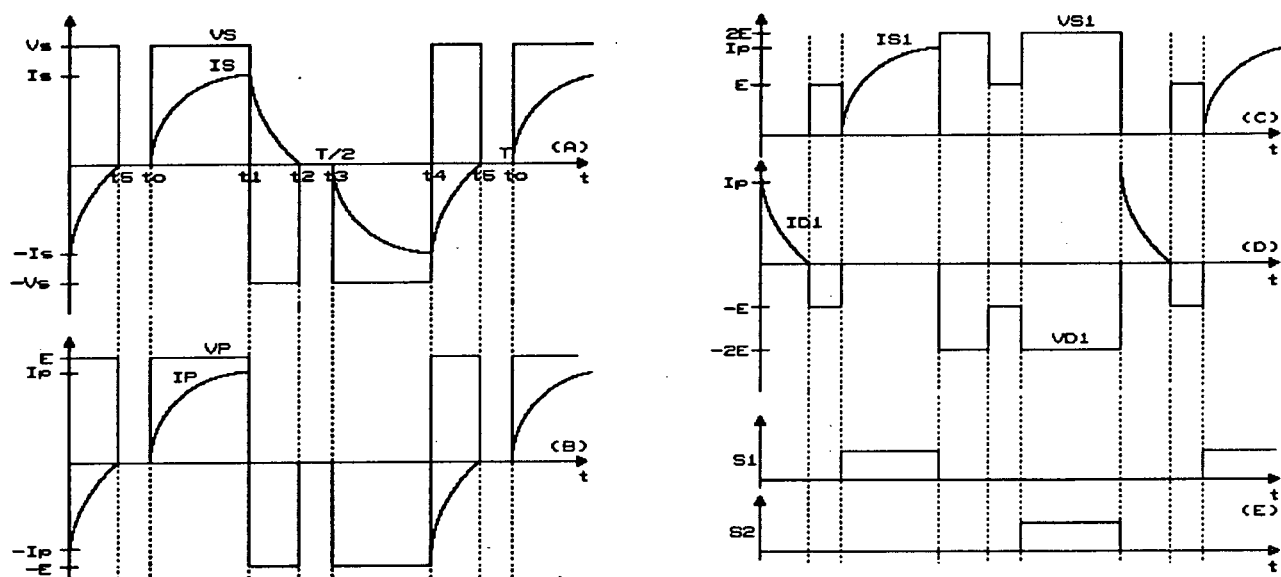


Figura 2.7.- Principais Formas de Onda do Conversor Push-Pull para $\phi < \pi$. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador V_p , c) Tensão e Corrente na Chave S_1 , d) Tensão e Corrente no Diodo D_1 , e) Sinal de Comando das Chaves S_1 e S_2 .

2.4.- CONCLUSÕES.-

Da análise feita do conversor push-pull, pode-se deduzir o seguinte: A) para variações da carga e variações da tensão de entrada, não é possível garantir na saída uma tensão constante; B) Na abertura de uma das chaves, se a carga é indutiva, se tem corrente que circula por um dos diodos em antiparalelo, aplicando uma tensão indesejada na carga. O tempo de condução do diodo em antiparalelo vai depender da carga. Quanto mais indutiva for a carga, maior será o tempo de condução dos diodos, por esta razão, com o conversor push-pull modulado por pulso único não é possível

garantir na saída uma tensão constante independente da carga.

Para se garantir uma tensão constante independente da carga pode-se fazer com que cada uma das chaves conduza sempre durante meio período e através do uso de um conversor CC-CC, garante-se tensão constante na entrada do conversor Push-Pull.

Outro método para se obter na saída uma tensão constante independente da carga, é através do controle do tempo de condução das chaves, isto é, se a tensão de entrada for máxima, o tempo de condução das chaves terá que ser menor que no caso em que a tensão de entrada é mínima. Para isto é necessário ter um caminho alternativo para a circulação da corrente e aplicar-se uma tensão nula na carga. Desta maneira, a forma de onda a obter-se na saída terá que ser de três níveis.

CAPÍTULO 3

ESTRUTURAS DO CONVERSOR PUSH-PULL A TRÊS NÍVEIS

3.1.- INTRODUÇÃO.-

Da análise teórica feita no capítulo anterior sobre o inversor Push-Pull (modulado por pulso único), resultou que não é possível garantir na saída uma tensão constante independente da carga, considerando as variações da fonte de alimentação.

Para se ter na saída do inversor Push-Pull uma tensão constante independente da carga, uma das alternativas, é que a fonte de alimentação seja controlável (isto é, uma ponte retificadora controlada ou um conversor CC-CC); outra alternativa é criar o terceiro nível [2].

Assim, neste capítulo são propostas duas estruturas que serão analisadas através de um estudo qualitativo e quantitativo.

3.2.- ESTRUTURAS PROPOSTAS.-

Para garantir na saída do conversor Push-Pull tensão constante através do terceiro nível, é preciso ter controle do ângulo de condução das chaves principais. Para isto, é preciso garantir a circulação da corrente e uma tensão nula na carga, enquanto as chaves principais são bloqueadas. Desta maneira, obtém-se na saída do conversor uma forma de onda à três níveis.

A partir da estrutura do conversor Push-Pull, apresenta-se duas estruturas que são mostradas na Figura 3.1:

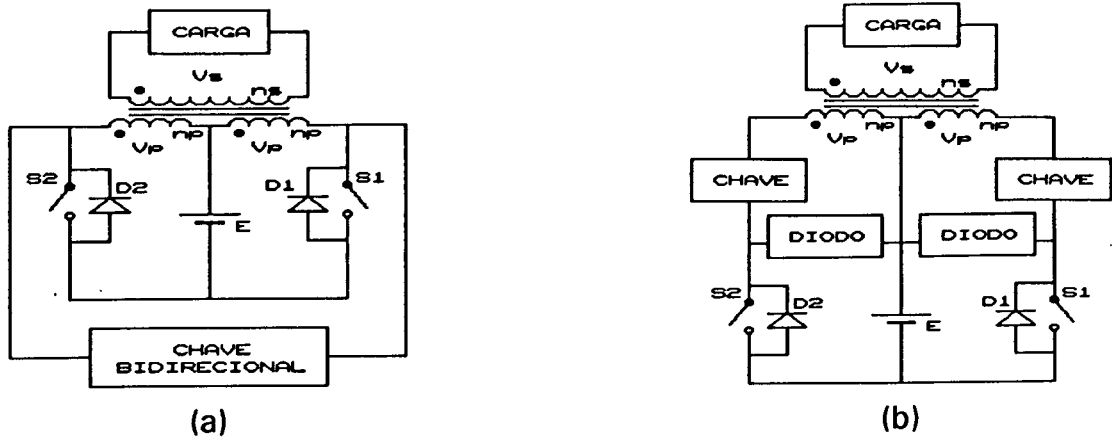


Figura 3.1.- Estruturas Propostas. a) Primeira Estrutura Proposta, b) Segunda Estrutura Proposta.

3.3.- ANÁLISE TEÓRICA DA PRIMEIRA ESTRUTURA PROPOSTA.-

Será feita a análise teórica, para tensões de entrada máxima e mínima, alimentando carga indutiva.

A estrutura proposta é mostrada na Figura 3.2:

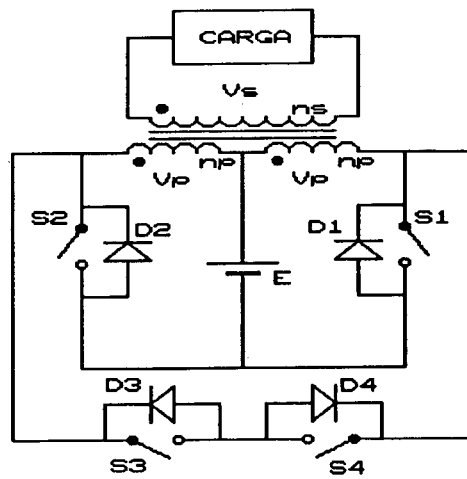


Figura 3.2.- Primeira Estrutura Proposta.

- | | |
|----------------------|-----------------------------------|
| S_1, S_2 | Chaves Principais |
| S_3, S_4 | Chaves Auxiliares |
| D_1, D_2, D_3, D_4 | Diodos |
| E | Tensão de Entrada CC |
| V_p | Tensão nos Enrolamentos Primários |
| V_s | Tensão no Secundário |
| n_p | Número de Espiras do Primário |
| n_s | Número de Espiras do secundário |

3.3.1.- Princípio de Operação.-

Para simplificar a análise serão feitas as seguintes considerações:

- Todas as chaves de Potência são consideradas ideais;
- O transformador é considerado ideal;
- A corrente de carga é refletida para o primário;
- Considera-se carga indutiva.

3.3.2.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima.-

Se a tensão de entrada é mínima, para garantir na saída uma tensão constante, o ângulo de condução das chaves principais terá que ser meio período ($\phi = \pi$). Neste modo de funcionamento as chaves auxiliares não conduzem.

As etapas de funcionamento, deste modo de operação, são iguais as etapas de funcionamento do inversor Push-Pull, para tensão de entrada mínima, descrita no capítulo 2, item 2.3.1. As etapas de funcionamento são mostradas na Figura 3.3.

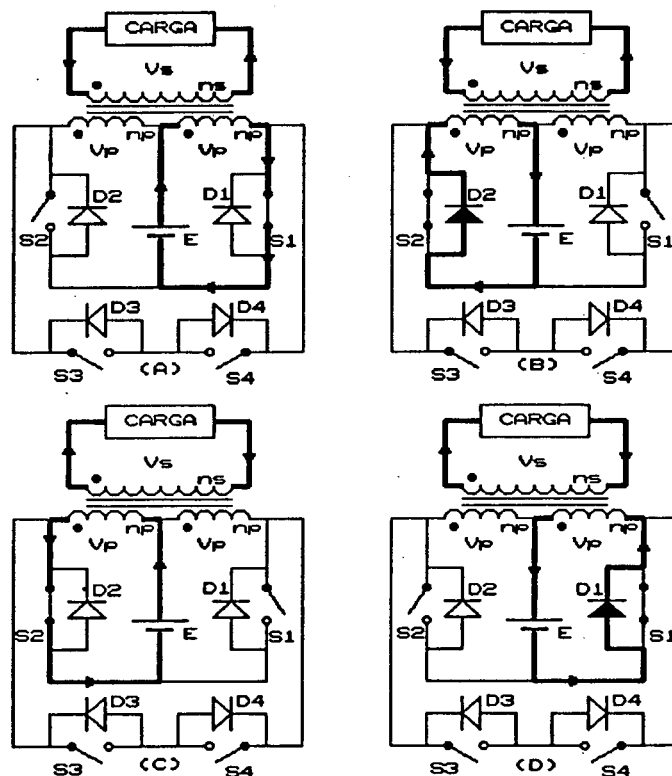


Figura 3.3.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima.

3.3.3.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima.-

Se a tensão de entrada é máxima, para garantir na saída tensão constante, o ângulo de condução das chaves principais terá que ser menor que π ($0 < \phi < \pi$). Neste modo de funcionamento as chaves auxiliares conduzem durante o ângulo complementar a π ($\pi - \phi$). As etapas de funcionamento são mostradas na Figura 3.4, e as principais formas de onda são mostradas na Figura 3.5.

A seguir, serão descritas as etapas de funcionamento:

-Intervalo (t_0, t_1), Figura 3.4.a:

Etapa de Transferência de Energia. No instante t_0 a corrente é zero. Como a chave S_1 tem ordem de conduzir, ela começa a conduzir a corrente, que cresce até atingir um valor máximo I_p . A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

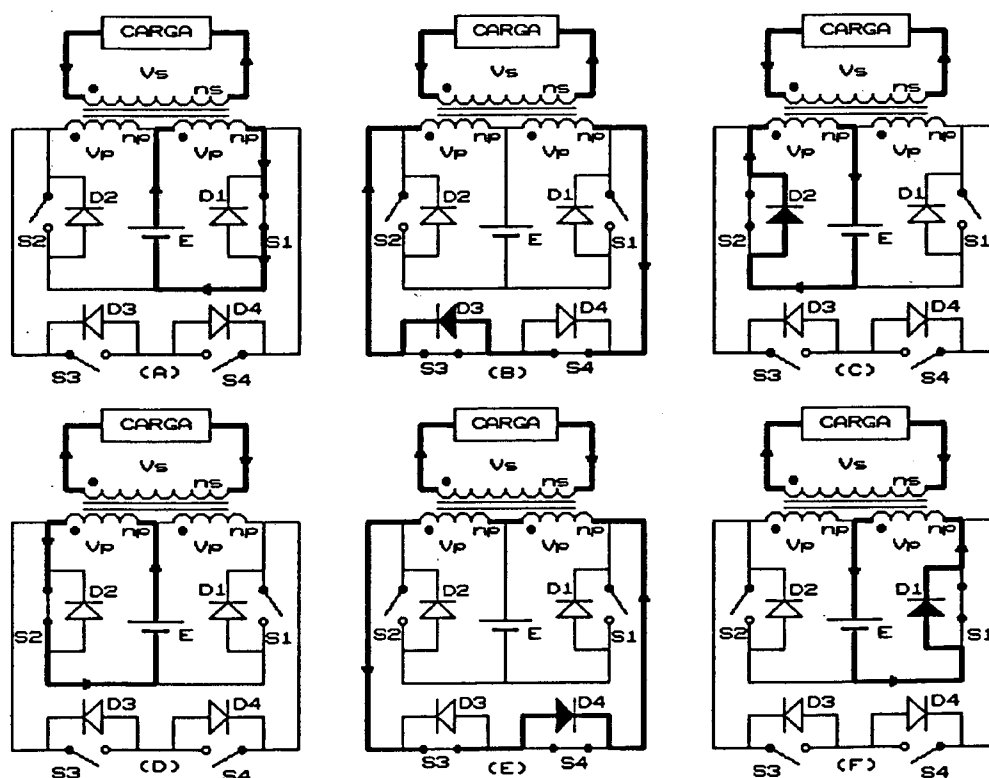


Figura 3.4.- Etapas de funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima

-Intervalo (t_1, t_2), Figura 3.4.b:

Etapa de Roda Livre. Nesta etapa, as chaves S_3 e S_4 são comandadas a

conduzir e a chave S_1 é bloqueada. A corrente não se inverte instantaneamente e, pela lei de Lenz, a tensão nas indutâncias do transformador se inverte instantaneamente, o que faz conduzir o diodo D_3 e a chave S_4 . A corrente decresce até que as chaves S_3 e S_4 são bloqueadas. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à zero.

-Intervalo (t_2, t_3) , Figura 3.4.c:

No instante t_2 , a chave S_2 é comandada a conduzir. Como a corrente não se inverte, o diodo D_2 entra em condução, a corrente decresce até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

-Intervalo (t_3, t_4) , Figura 3.4.d:

Etapa de Transferência de Energia. Como a chave S_2 tem ordem de conduzir, ela conduz a corrente, que cresce até atingir um valor máximo $-I_p$. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

-Intervalo (t_4, t_5) , Figura 3.4.e:

Etapa de Roda Livre. Em t_4 , as chaves S_3 e S_4 são comandadas a conduzir e a chave S_2 é bloqueada. A corrente não se inverte e o diodo D_4 e a chave S_3 conduzem a corrente que decresce até que as chaves S_3, S_4 são bloqueadas. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à zero.

-Intervalo (t_5, t_6) , Figura 3.4.f:

No instante t_5 , a chave S_1 é comandada a conduzir. Como a corrente não se inverte, o diodo D_1 conduz a corrente que decresce até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

3.3.4.- Formas de Onda.-

As principais formas de onda são mostradas na Figura 3.5:

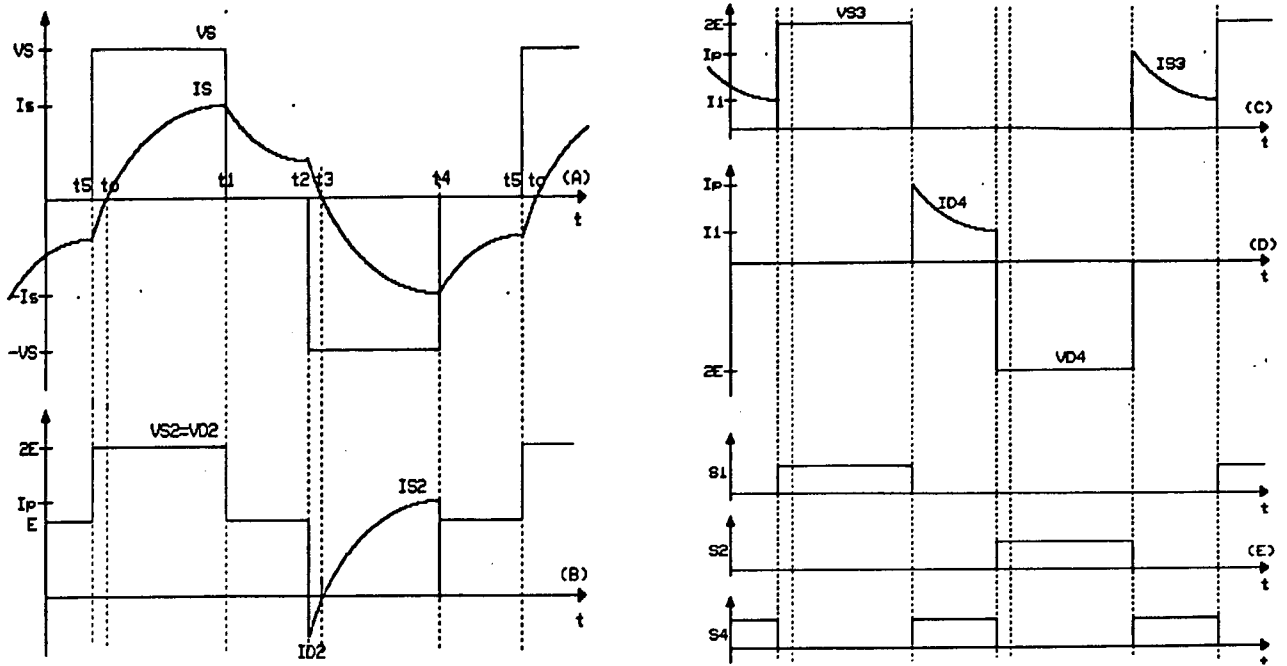


Figura 3.5.- Principais Formas de onda Da Primeira Estrutura Proposta. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente na Chave S_2 , c) Tensão e Corrente na Chave S_3 , d) Tensão e corrente no Diodo D_4 , e) Sinais de Comando das Chaves S_1 , S_2 e, $S_3 = S_4$.

3.3.5.- Análise Quantitativa.

É feita a análise matemática das três etapas de funcionamento do semiciclo positivo, para tensão de entrada máxima e carga indutiva. As indutâncias de dispersão são desprezadas e a carga é refletida para o primário do transformador.

-Intervalo (t_0, t_1)

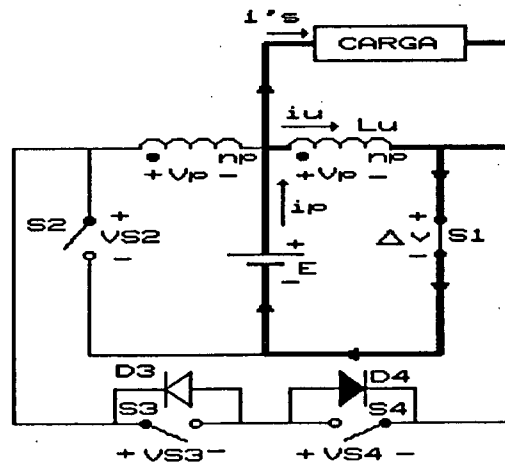


Figura 3.6.- Circuito Equivalente da Primeira Etapa.

Da Figura 3.6 obtém-se as equações que regem esta etapa. As expressões básicas são:

$$v_p = E - \Delta V \quad (3.1)$$

$$v_{S2} = v_p + E \quad (3.2)$$

$$v_{S3} = 2v_p - v_{S4} \quad (3.3)$$

Nesta etapa o diodo D_4 fica diretamente polarizado e se tem:

$$v_{S4} = v_{D4} = 0 \quad (3.4)$$

A queda de tensão na chave é:

$$\Delta V = R_{DS(on)} I_p \quad (3.5)$$

A tensão na carga é dada pela expressão (3.6).

$$v_p = R'_c i'_s + L'_c \frac{di'_s}{dt} \quad (3.6)$$

A tensão na indutância do primário é dada pela expressão (3.7).

$$v_p = L_u \frac{di_u}{dt} \quad (3.7)$$

A corrente na fonte CC é dada pela expressão (3.8).

$$i_p = i_u + i'_s \quad (3.8)$$

A constante de tempo do circuito é dada pela expressão (3.9).

$$\tau_c = \frac{L'_c}{R'_c} \quad (3.9)$$

Das expressões (3.1),(3.2),(3.3),(3.4) e (3.5) obtém-se a tensão nas

chaves, durante a primeira etapa, conforme mostra as expressões (3.10), (3.11), (3.12).

$$V_{S2} = 2E - \Delta V \quad (3.10)$$

$$V_{S3} = 2(E - \Delta V) \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} V_{S4} &= 0 \\ V_{S1} &= \Delta V \end{aligned} \quad (3.12)$$

Das expressões (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9) tem-se a expressão da corrente.

$$i_p(t) = i_{u_0} + \frac{v_p}{L_u} t + \frac{v_p}{R'_c} + \left(i'_{s_0} - \frac{v_p}{R'_c} \right) e^{\left(\frac{-t}{\tau_c} \right)} \quad (3.13)$$

Nesta etapa se tem transferência de energia. A duração desta etapa depende do ângulo de condução das chaves principais.

-Intervalo (t_1, t_2)

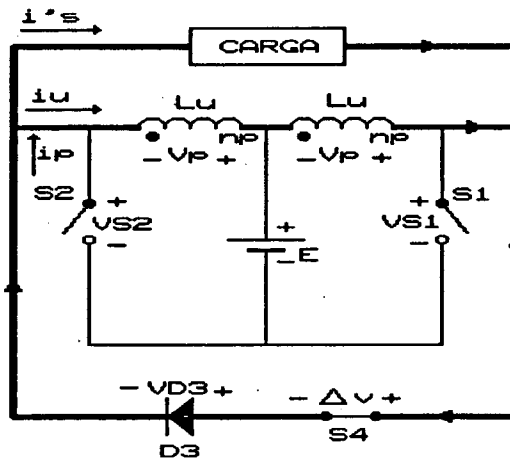


Figura 3.7.- Circuito Equivalente da Segunda Etapa.

Do circuito equivalente se obtém as expressões que regem o funcionamento desta etapa.

$$V_{S1} = E + v_p \quad (3.14)$$

$$V_{S2} = E - v_p \quad (3.15)$$

$$V_{D3} = 2 v_p - \Delta V \quad (3.16)$$

Nesta etapa o diodo D_3 conduz e a corrente de magnetização i_u é constante, se tem:

$$\begin{aligned} v_{D3} &= 0 \\ i_u &= ct\theta \end{aligned}$$

Tensão na indutância do transformador.

$$2 v_p = -4 L_u \frac{di_u}{dt} \quad (3.17)$$

Como i_u é constante , se tem:

$$v_p = 0$$

Tensão na carga.

$$v_p = R'_c i'_s + L'_c \frac{di'_s}{dt} \quad (3.18)$$

Corrente na fonte CC.

$$i_p = i_u + i'_s \quad (3.19)$$

Das expressões (3.14),(3.15) e (3.16) obtém-se a tensão sobre as chaves.

$$V_{S1} = V_{S2} = E \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= 0 \\ V_{S3} &= V_{S4} = 0 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Das expressões (3.17),(3.18) e (3.19) obtém-se a expressão da corrente no primário.

$$i_p(t) = i'_{so} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (3.22)$$

Onde:

$$i'_{so} = i_p(t_1)$$

$i_p(t_1)$ Corrente Final da Primeira Etapa

Nesta etapa, o tempo de condução da chave auxiliar é complementar ao tempo de condução das chaves principais.

-Intervalo (t_2, t_3)

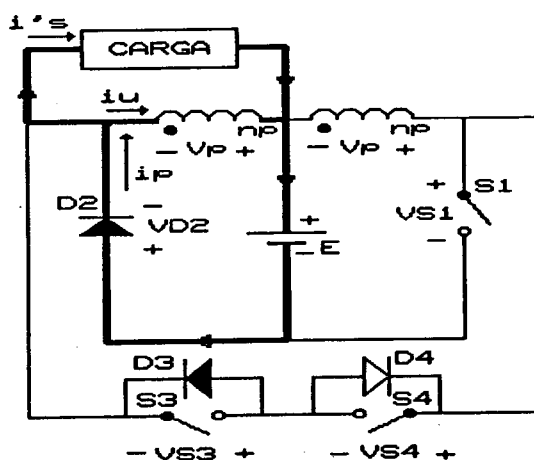


Figura 3.8.- Circuito Equivalente da Terceira Etapa.

As expressões que regem esta etapa são:

$$\begin{aligned} V_{S2} &= v_p - E \\ V_{S2} &= V_{D2} = 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$V_{S1} = E + v_p \quad (3.24)$$

$$V_{S4} = 2v_p - V_{S3} \quad (3.25)$$

Nesta etapa o diodo D_3 fica polarizado diretamente e se tem:

$$V_{S3} = V_{D3} = 0 \quad (3.26)$$

Tensão na indutância do transformador.

$$-v_p = L_u \frac{di_u}{dt} \quad (3.27)$$

Tensão na carga.

$$-v_p = R'_c i'_s + L'_c \frac{di'_s}{dt} \quad (3.28)$$

Corrente na fonte CC.

$$i_p = i_u + i'_s \quad (3.29)$$

Das expressões (3.23),(3.24),(3.25) e (3.26) obtém-se a tensão sobre as chaves.

$$V_{S1} = V_{S4} = 2E \quad (3.30)$$

$$V_{S2} = V_{S3} = 0 \quad (3.31)$$

Das expressões (3.27),(3.28) e (3.29) obtém-se a expressão da corrente desta etapa.

$$i_p(t) = i_{uo} - \frac{v_p}{R'_c} t - \frac{v_p}{R'_c} + \left(i'_{so} + \frac{v_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (3.32)$$

A duração desta etapa, vai depender da carga.

As expressões que regem o semiciclo negativo são as mesmas que as utilizadas para o semiciclo positivo.

3.4.- ANÁLISE TEÓRICA DA SEGUNDA ESTRUTURA PROPOSTA.

Será feita a análise teórica para tensões de entrada mínima e máxima, alimentando carga indutiva. A estrutura proposta é mostrada na Figura 3.9.

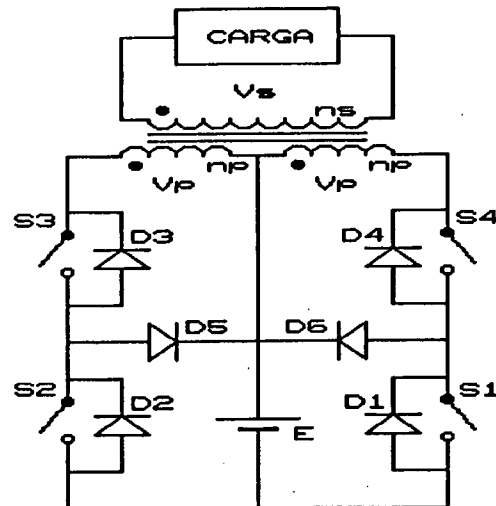


Figura 3.9.- Segunda Estrutura Proposta.

3.4.1.- Princípio de Operação.

Na estrutura proposta, as chaves auxiliares (S_3 , S_4) conduzem cada uma meio período. Para simplificar a análise, são assumidas as seguintes condições:

- Todas as chaves de Potência são consideradas ideais.
- O transformador é considerado ideal.
- A corrente de carga é refletida para o primário.

3.4.2.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima.-

Se a tensão de entrada é mínima, para garantir na saída tensão constante, o ângulo de condução das chaves principais terá que ser meio período ($\phi = \pi$), além do que as chaves auxiliares sempre conduzem meio período cada uma.

As etapas de funcionamento, neste modo de operação são iguais as etapas de funcionamento do inversor Push-Pull para tensão de entrada mínima, descrita no capítulo 2 ítem 2.3.1.

As etapas de funcionamento deste modo de operação são mostradas na Figura 3.10.

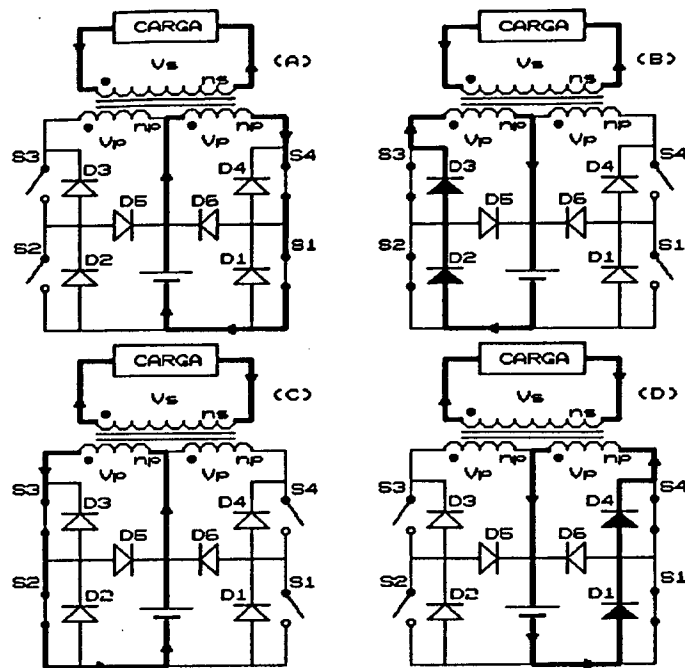


Figura 3.10.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Mínima.

3.4.3.- Etapas de Funcionamento Para Tensão de Entrada Máxima.-

Se a tensão de alimentação é máxima, para manter na saída tensão constante, o ângulo de condução das chaves principais terá que ser menor que π ($0 < \phi < \pi$). Neste modo de funcionamento a chaves auxiliares conduzem meio período cada uma. As etapas de funcionamento são mostradas na Figura 3.11 e as principais formas de onda são mostradas na Figura 3.12.

A seguir, serão descritas as etapas de funcionamento:

-Intervalo (t_0, t_1), Figura 3.11.a:

Etapa de Transferência de Energia. Em t_0 a corrente é zero, as chaves S_1 e S_4 conduzem a corrente, que cresce até atingir um valor máximo I_p . A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $+E$.

-Intervalo (t_1, t_2), Figura 3.11.b:

Etapa de Roda Livre. A chave S_1 é bloqueada, o diodo D_6 e a chave S_4 conduzem a corrente que decresce até que a chave S_2 é bloqueada. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$ onde V_p é igual à zero.

-Intervalo (t_2, t_3), Figura 3.11.c:

No instante t_2 , as chaves S_2 e S_3 são comandadas a conduzir e a chave S_4 é bloqueada. A corrente não se inverte instantaneamente e, pela lei de Lenz, os diodos D_2 e D_3 conduzem a corrente que decresce até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

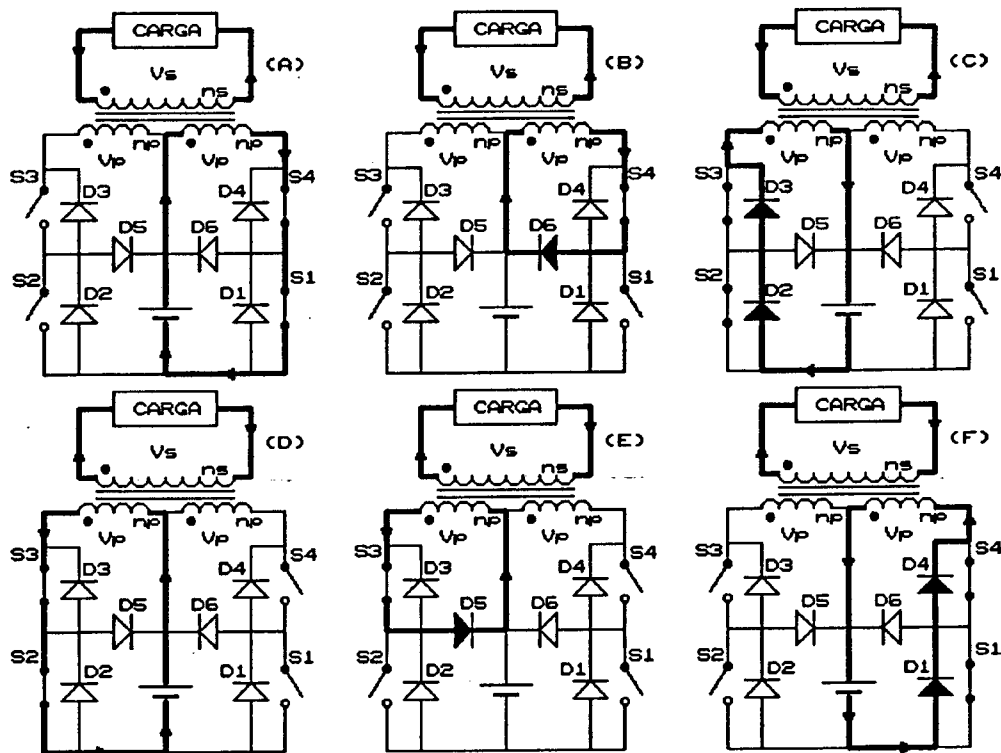


Figura 3.11.- Etapas de funcionamento Para Tensão de Alimentação Máxima.

-Intervalo (t_3, t_4), Figura 3.11.d:

Etapa de Transferência de Energia. Depois da corrente se anular, as chaves S_2 e S_3 conduzem a corrente, que cresce até atingir um valor máximo $-I_p$. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à $-E$.

-Intervalo (t_4, t_5), Figura 3.11.e:

Etapa de Roda Livre. Em t_4 a chave S_2 é bloqueada, como a corrente não se inverte instantaneamente, a chave S_3 e o diodo D_5 conduzem a corrente que decresce até que a chave S_3 é bloqueada. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, onde V_p é igual à zero.

-Intervalo (t_6, t_7), Figura 3.11.f:

No instante t_6 , as chaves S_1 e S_4 são comandadas a conduzir e a chave S_3 é bloqueada, como a corrente não se inverte, os diodos D_1 e D_4 conduzem a corrente que decresce até se anular. A tensão na carga é igual à $V_s = (n_s/n_p)V_p$, sendo que V_p é igual à $+E$.

3.4.4.- Formas de Onda .-

Para verificar as etapas de funcionamento do conversor, são mostradas as principais formas de onda na Figura 3.12.

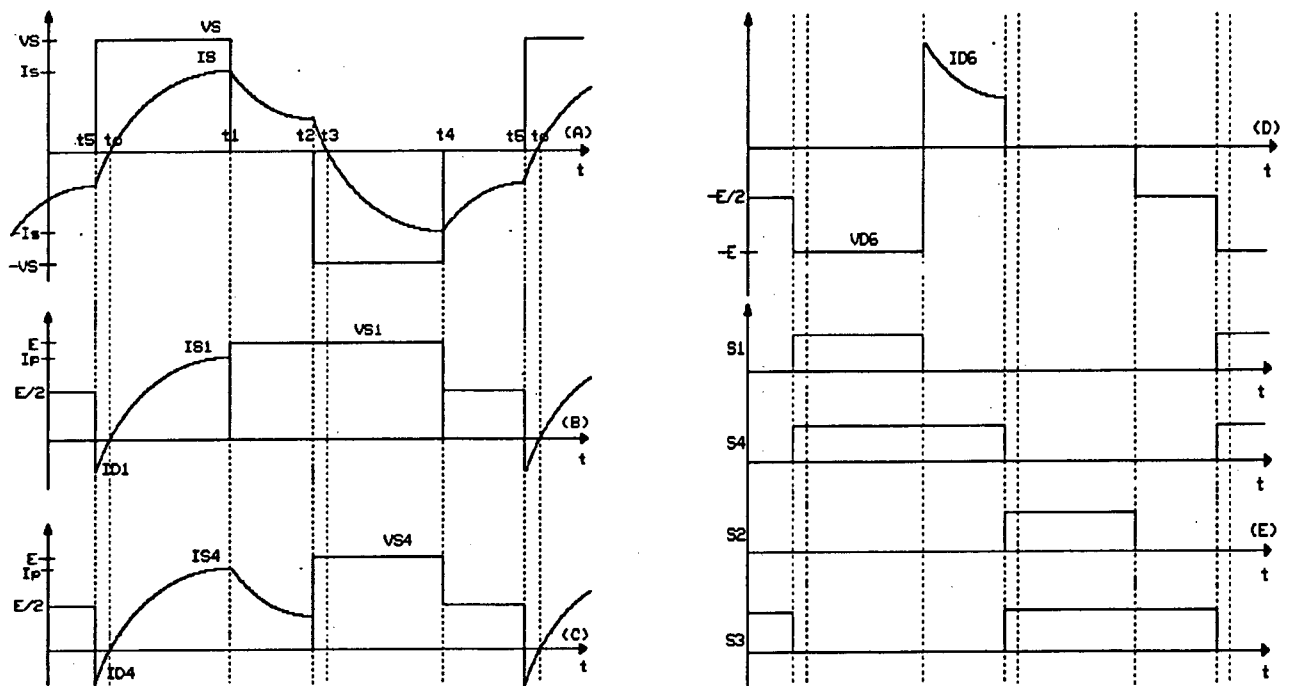


Figura 3.12.- Principais Formas de Onda da Segunda Estrutura Proposta. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente na Chave S_1 , c) Tensão e Corrente na Chave S_2 , d) Tensão e Corrente no Diodo D_6 , e) Sinais de Comando das Chave S_1, S_2, S_3 e S_4 .

3.4.5.- Análise Quantitativa.

É feita a análise matemática, das três etapas de funcionamento do semiciclo positivo, considerando carga indutiva. As indutâncias de dispersão são desprezadas.

Corrente na fonte CC.

$$i_p = i_u + i's \quad (3.40)$$

Das expressões (3.33),(3.34),(3.35) e (3.36) obtém-se a tensão nas chaves.

$$V_{S2} = V_{S3} = E - \Delta V \quad (3.41)$$

$$V_{D6} = E - \Delta V \quad (3.42)$$

$$V_{S1} = V_{S4} = V_{D5} = \Delta V \quad (3.43)$$

Das expressões (3.38),(3.39) e (3.40) obtém-se a expressão da corrente que rege esta etapa.

$$i_p(t) = i_{u_0} + \frac{V_p}{L_u} t + \frac{V_p}{R'_c} + \left(i'_{s_0} - \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (3.44)$$

Onde:

$$i'_{s_0} = i_p(t_0)$$

$i_p(t_0)$ Corrente Final da Etapa Anterior

Nesta etapa existe transferência de energia. O tempo de condução da chave principal vai depender da carga e da fonte de entrada, de maneira a se garantir na saída uma tensão constante.

-Intervalo (t_1, t_2)

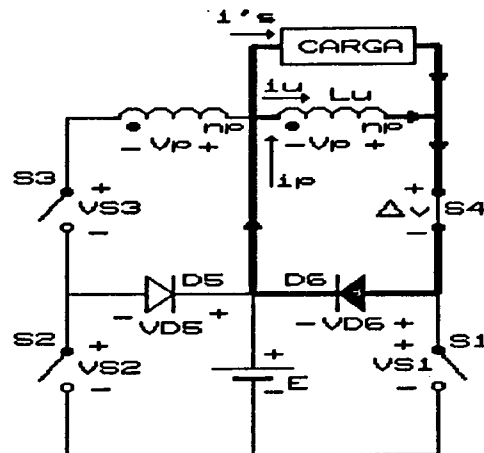


Figura 3.14.- Circuito Equivalente da Segunda Etapa.

As expressões que regem esta etapa são:

$$\begin{aligned} V_{S1} &= E + V_{D6} \\ V_{D6} &= 0 \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$V_{S2} + V_{S3} + v_p = E \quad (3.46)$$

$$V_{S2} + V_{D5} = V_{S1} = E \quad (3.47)$$

$$v_p = \Delta V + V_{D6} \quad (3.48)$$

Tensão na indutância do transformador.

$$-v_p = L_u \frac{di_u}{dt} \quad (3.49)$$

Nesta etapa corrente de magnetização é constante. Portanto se tem:

$$v_p = 0$$

Tensão na carga.

$$-v_p = R'_c i'_s + L'_c \frac{di'_s}{dt} \quad (3.50)$$

Corrente na fonte CC.

$$i_p = i_u + i'_s \quad (3.51)$$

Das expressões (3.45),(3.46),(3.47) e (3.48) obtém-se a tensão sobre as chaves.

$$V_{S2} = V_{S3} = V_{D5} = \frac{E}{2} \quad (3.52)$$

$$V_{S1} = E \quad (3.53)$$

$$V_{S4} = V_{D6} = 0 \quad (3.54)$$

Das expressões (3.49),(3.50) e (3.51) obtém-se a expressão da corrente desta etapa.

$$i_p(t) = i'_{so} e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (3.55)$$

Onde:

$$i'_{so} = i_p(t_1)$$

$i_p(t_1)$ Corrente Final da Etapa Anterior

A duração desta etapa é complementar ao tempo de condução das chaves principais.

-Intervalo (t_2, t_3)

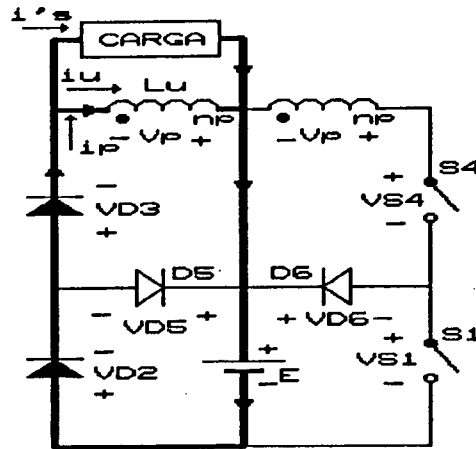


Figura 3.15.- Circuito Equivalente da Terceira Etapa.

Do circuito equivalente obtém-se as expressões que regem esta etapa.

$$V_{S2} + V_{S3} + v_p = E \quad (3.56)$$

$$V_{S1} + V_{S4} = E + v_p \quad (3.57)$$

$$V_{S1} + V_{D6} = E \quad (3.58)$$

$$V_{S2} + v_p = V_{D5} \quad (3.59)$$

$$V_{S2} = V_{S3} = 0 \quad (3.60)$$

Tensão na indutância do transformador.

$$-v_p = L_u \frac{di_u}{dt} \quad (3.61)$$

Tensão na carga.

$$-v_p = R'_c i'_s + L'_c \frac{di'_s}{dt} \quad (3.62)$$

Corrente no primário.

$$i_p = i_u + i'_s \quad (3.63)$$

Das expressões (3.56), (3.57), (3.58), (3.59) e (3.60) obtém-se a tensão sobre as chaves.

$$V_{S1} = V_{S4} = V_{D5} = E \quad (3.64)$$

$$V_{S2} = V_{S3} = V_{D6} = 0 \quad (3.65)$$

Das expressões (3.61), (3.62) e (3.63) obtém-se a expressão da corrente.

$$i_p(t) = i_{u0} - \frac{V_p}{R'_c} t - \frac{V_p}{R'_c} + \left(i'_{s0} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{t}{\tau_c}} \quad (3.66)$$

A duração desta etapa, vai depender da carga.

As expressões que regem o semiciclo negativo são as mesmas que as utilizadas para o semiciclo positivo.

3.5.-CONCLUSÕES.-

Neste capítulo foi apresentado o estudo teórico das duas estruturas propostas neste trabalho, mostrando o funcionamento de cada uma, com tensões de entrada máxima e mínima, assim como as expressões básicas que regem o funcionamento de cada uma delas.

Da análise teórica feita das estruturas, é possível alcançar o objetivo deste trabalho, que é de garantir na saída tensão constante independente da carga, através do terceiro nível.

A segunda estrutura proposta em relação à primeira apresenta a vantagem de que a máxima tensão sobre as chaves é igual a tensão de entrada.

CAPÍTULO 4

ESTUDO POR SIMULAÇÃO DAS ESTRUTURAS DO CONVERSOR PUSH-PULL A TRÊS NÍVEIS

4.1.- INTRODUÇÃO.-

Para comprovar o estudo teórico feito no capítulo 3 e o princípio de funcionamento das estruturas propostas neste capítulo, será feito o estudo por simulação.

Serão efetuadas simulações alimentando carga resistiva para tensão de entrada máxima e carga indutiva para tensões de entrada máxima e mínima. Inicialmente, será feito o cálculo dos parâmetros necessários para o estudo.

4.2.- CÁLCULO DOS PARÂMETROS.-

Abaixo são apresentados os cálculos para determinar os parâmetros para o estudo por simulação:

$P_A = 1 \text{ KVA}$	Potência de Saída
$V_s = 110 \text{ V}$	Tensão Eficaz de Saída
$f = 60 \text{ HZ}$	Frequência da Tensão de Saída
$E = 48 \pm 20\% \text{ V}$	Tensão de Entrada CC

Portanto:

$$E_{\text{Min}} = 38,4 \text{ V} \quad \text{e} \quad E_{\text{Máx}} = 57,6 \text{ V}$$

4.2.1.- Cálculo da Impedância de Carga.

$$|Z| = \frac{V_s^2}{P_A} = \frac{110^2}{1000} = 12,1 \text{ } \Omega \quad (4.1)$$

- Carga Resistiva.

$$R_c = |Z| = 12,1 \ \Omega \quad (4.2)$$

- Carga Indutiva e $\cos \phi = 0,85$.

$$R_c = |Z| \cos \phi = 10,3 \ \Omega \quad (4.3)$$

$$L_c = \frac{|Z| \operatorname{sen} \phi}{2\pi f} = 16,9 \ \text{mH} \quad (4.4)$$

4.2.2.- Cálculo da Corrente Eficaz na Fonte de Entrada.

Para o cálculo da corrente eficaz na fonte de entrada, considera-se 15% de perdas no transformador e tensão de entrada mínima.

$$P_{\text{enA}} = 1,15 P_A$$

$$E_{\text{Min}} = 38,4 \ \text{V}$$

$$I_p = \frac{P_{\text{enA}}}{E_{\text{min}}} = \frac{1,5 \times 1000}{38,4} = 30 \ \text{A} \quad (4.5)$$

4.2.3.- Cálculo das Indutâncias do Primário e Secundário.

Para o cálculo da indutância do primário considera-se a corrente de magnetização de 5% a 10% da corrente do primário.

$$i_u = 10\% I_p$$

$$v_p = E_{\text{Min}}$$

$$L_u = \frac{v_p}{i_u} t = \frac{38,4}{0,1 \times 30} 8,335 \times 10^{-3} = 106,7 \ \text{mH} \quad (4.6)$$

Para o cálculo da indutância do secundário, é necessário o cálculo da relação de transformação, que é obtida através da expressão (2.19), considerando tensão de entrada mínima e o ângulo de condução das chaves igual à meio período ($\phi = \pi$).

$$\frac{n_s}{n_p} = \frac{v_s}{v_p} \quad (4.7)$$

Onde:

$$v_p = E_{Min}$$

$$v_s = \frac{\sqrt{2} \pi v_{s, EFF}}{4 \operatorname{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

$$L_s = \left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2 L_u = 1092,4 \text{ mH} \quad (4.8)$$

- DADOS PARA A SIMULAÇÃO.

Com os cálculos efetuados tem-se os seguintes parâmetros com os quais se fará o estudo por simulação.

$L_u = 106,688 \text{ mH}$	<i>Indutância do Primário</i>
$L_s = 897,246 \text{ mH}$	<i>Indutância do Secundário</i>
$R_c = 12,1 \ \Omega$	<i>Carga Resistiva</i>
$R_c = 10,3 \ \Omega$ $L_c = 16,9 \text{ mH}$	<i>Carga Indutiva ($\rho \cos \phi = 0,85$)</i>
$E_{Min} = 38,4 \text{ V}$	<i>Tensão de Entrada Mínima</i>
$E_{Máx} = 57,6 \text{ V}$	<i>Tensão de Entrada Máxima</i>

4.3.- SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA ESTRUTURA.-

Serão efetuadas simulações para :

- Carga resistiva com tensão de entrada máxima.
- Carga indutiva com tensão de Entrada mínima e máxima.

4.3.1.- Indutância de Dispersão do Transformador.-

Para o estudo por simulação, considera-se a indutância de dispersão do transformador que, na abertura das chaves principais provoca uma sobretensão sobre as mesmas, que chegariam a danificá-las. Portanto, deve-se limitar estas

sobretensões à limites toleráveis pelas chaves.

Para limitar a sobretensão nas chaves, é incluído na estrutura o circuito de ajuda à comutação (Snubber) nas chaves principais, mostrado na Figura 4.1.

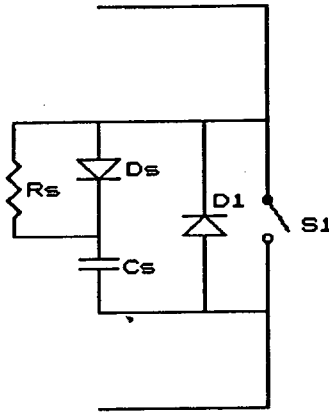


Figura 4.1.- Chave Principal com o Circuito de Ajuda à comutação.

4.3.2.- Cálculo dos Parâmetros do Circuito de Ajuda à Comutação.

O cálculo é feito considerando a tensão de entrada máxima e o tempo mínimo de condução das chaves principais.

$$E_{M\acute{a}x} = 57,6 \text{ V}$$

$$t_c = 3,845 \text{ ms}$$

-Cálculo do Capacitância do Circuito de Ajuda à Comutação.

$$C_s = \frac{2 I_c t_m}{V} \quad (4.9)$$

- I_c Corrente de Carga
- V Tensão Sobre a Chave
- t_m Tempo Morto

$$I_c = 25 \text{ A}$$

$$V = 2 E_{M\acute{a}x} = 115,2 \text{ V}$$

$$t_m = 10 \text{ } \mu\text{s}$$

$$C_s = \frac{2 I_c t_m}{V} = 2 \quad \mu F$$

- Cálculo da Resistência do Circuito de Ajuda à Comutação.

$$R_s = \frac{t_{on}}{3 C_s} \quad (4.10)$$

C_s Capacitância

t_{on} Tempo Mínimo de Condução da Chave

$$t_{on} = t_c = 3,845 \quad ms$$

$$R_s = \frac{t_{on}}{3 C_s} = 640 \quad \Omega$$

4.3.3.- Simulação Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima.

Para tensão de entrada máxima o tempo de condução das chaves principais é:

$$t_c = 3,845 \quad ms$$

$$E_{Máx} = 57,6 \quad V$$

$$R_c = 12,1 \quad \Omega$$

As principais formas de onda deste modo de funcionamento, são mostradas na Figura 4.2.

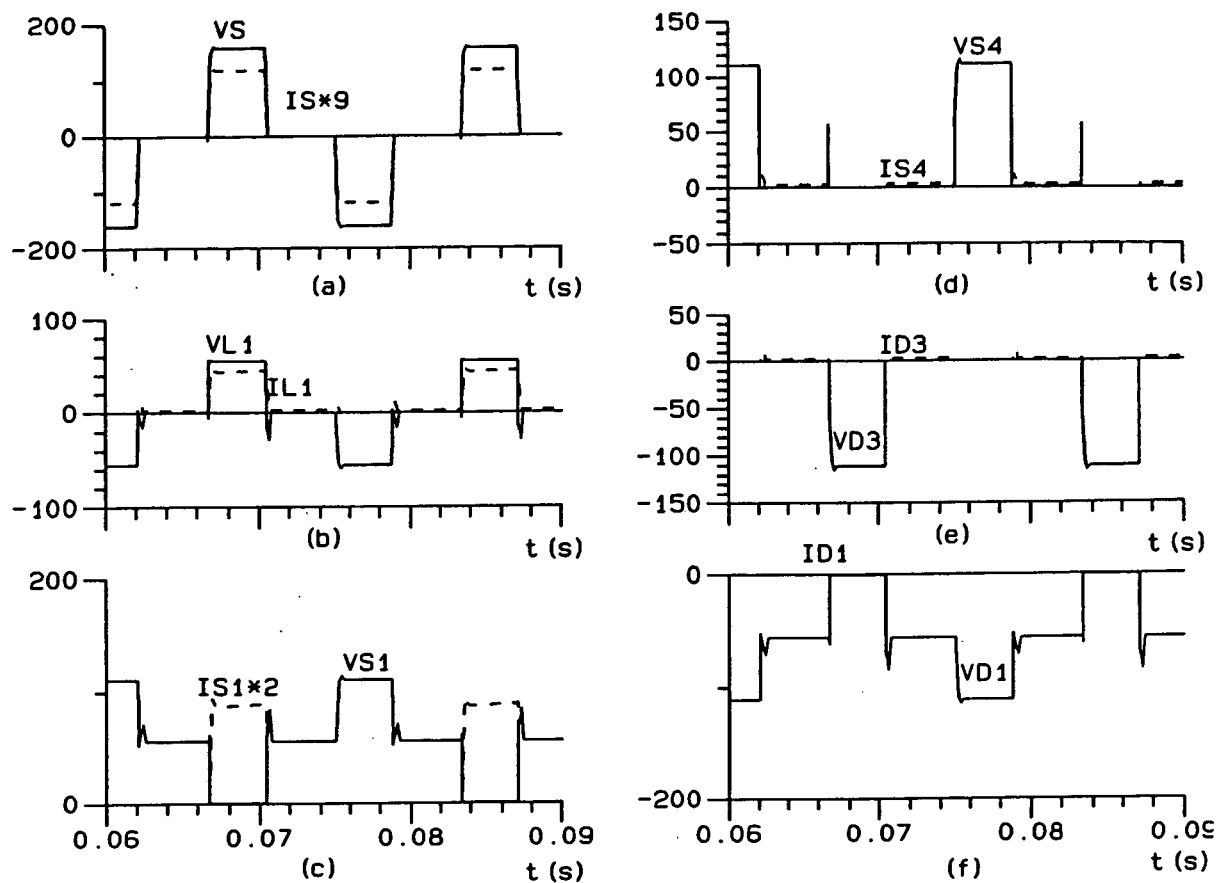


Figura 4.2.- Principais Formas de onda Para Tensão de Entrada Máxima e Carga Resistiva. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente na Chave S1, d) Tensão e Corrente na Chave S4, e) Tensão e Corrente no Diodo D3, f) Tensão e Corrente no Diodo D1.

4.3.4.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima.-

Das expressões (2.23) e (2.24), calcula-se o tempo de condução das chaves principais.

$$t_c = 8.33333 \quad \text{ms}$$

$$E_{\text{Min}} = 38,4 \quad \text{V}$$

$$R_c = 10,3 \quad \Omega$$

$$L_c = 16,9 \quad \text{mH}$$

As principais formas de onda para este modo de funcionamento são mostradas na Figura 4.3.

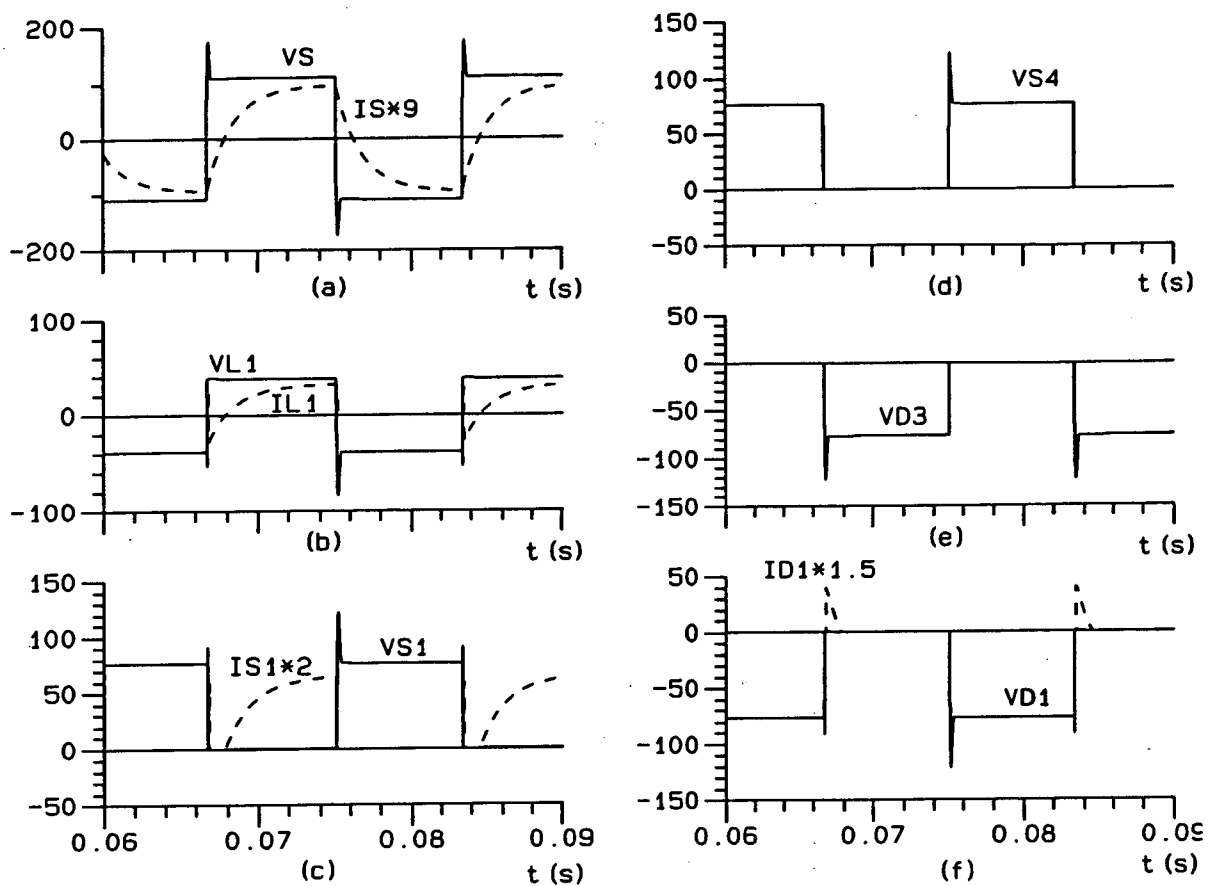


Figura 4.3.- Principais Formas de Onda Para Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente na Chave S1, d) Tensão e Corrente na Chave S4, e) Tensão e Corrente no Diodo D3, f) Tensão e Corrente no Diodo D1.

4.3.5.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima.-

O tempo de condução das chaves principais é:

$$t_c = 3,845 \text{ ms}$$

$$E_{M\acute{a}x} = 57,6 \text{ V}$$

As principais formas de onda são mostradas na Figura 4.4.

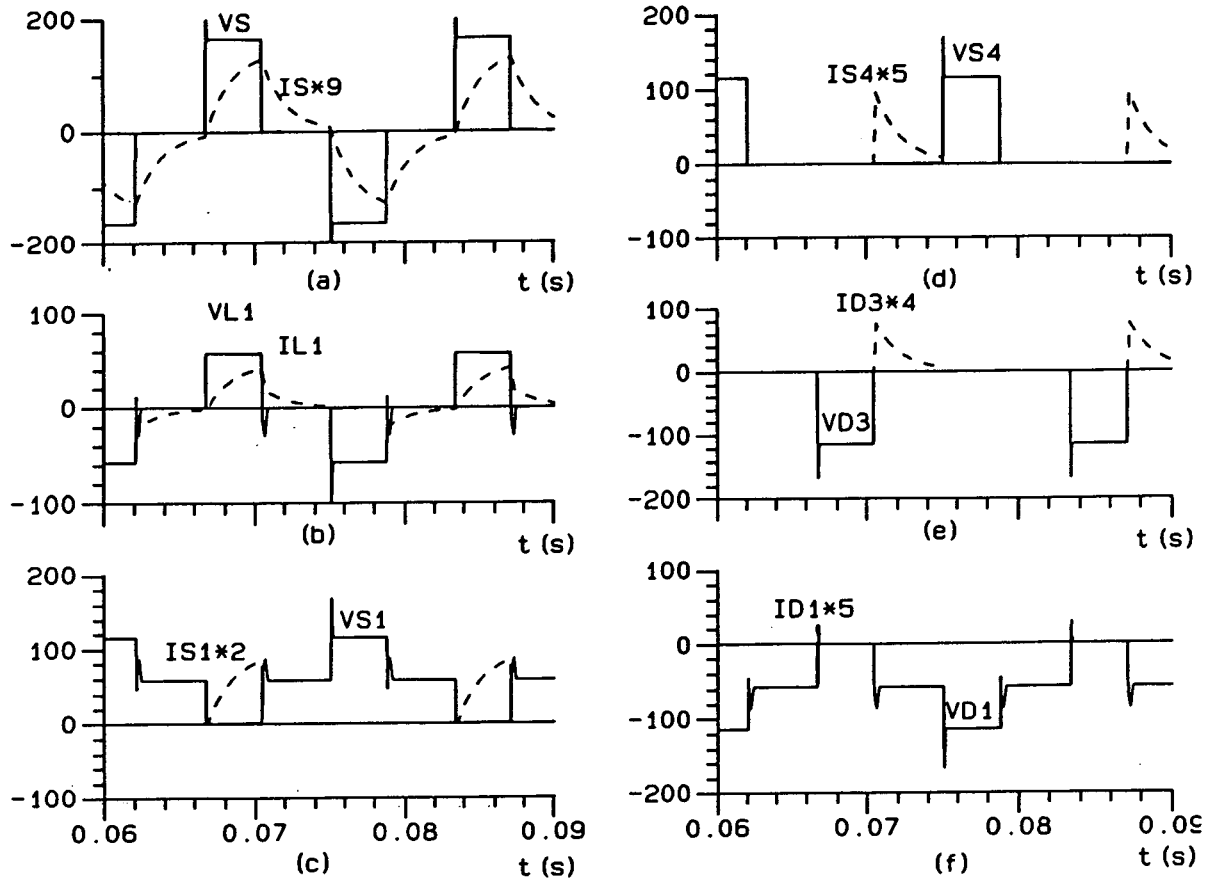


Figura 4.4.- Principais Formas de Onda Para Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente na Chave S1, d) Tensão e Corrente na Chave S4, e) Tensão e Corrente no Diodo D3, f) Tensão e Corrente no Diodo D1.

4.4.- SIMULAÇÃO DA SEGUNDA ESTRUTURA.-

Foram efetuadas simulações para:

- Carga resistiva e tensão de entrada máxima.
- Carga indutiva e tensão de entrada máxima e mínima.

4.4.1.- Indutância de Dispersão do Transformador.-

Para o estudo por simulação, considera-se a indutância de dispersão do transformador que na abertura das chaves principais provoca uma sobretensão que danificaria as mesmas. Portanto, deve-se limitar estas sobretensões à limites toleráveis para as chaves.

Para limitar a sobretensão nas chaves, é incluído na estrutura um circuito de ajuda à comutação, como é mostrado na Figura 4.5.

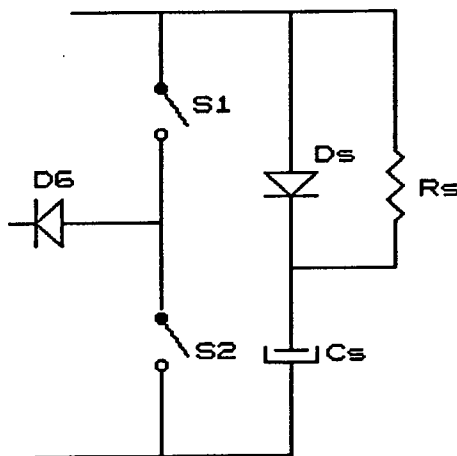


Figura 4.5.- Circuito de Ajuda à Comutação.

4.4.2.- Cálculo dos Parâmetros do Circuito de Ajuda à Comutação.

Os parâmetros do circuito de ajuda à comutação são determinados para tensão de entrada máxima e tempo de condução mínimo das chaves.

$$E_{M\acute{a}x} = 57,6 \text{ V}$$

$$t_c = 3,845 \text{ ms}$$

-Cálculo do Capacitância do Circuito de Ajuda à Comutação.

$$C_s = \frac{2 I_c t_m}{V} \quad (4.11)$$

I_c Corrente de Carga

V Tensão Sobre a Chave

t_m Tempo Morto

$$I_c = 30 \text{ A}$$

$$V = 2 E_{M\acute{a}x} = 115,2 \text{ V}$$

$$t_m = 10 \text{ } \mu\text{s}$$

$$C_s = \frac{2 I_c t_m}{V} = 5 \quad \mu F$$

- Cálculo da Resistência do Circuito de Ajuda à Comutação.

$$R_s = \frac{t_{on}}{3 C_s} \quad (4.12)$$

C_s Capacitância

t_{on} Tempo Mínimo de Condução da Chave

$$t_{on} = t_c = 3,845 \quad ms$$

$$R_s = \frac{t_{on}}{3 C_s} = 240 \quad \Omega$$

4.4.3.- Simulação Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima.

O tempo de condução das chaves principais é:

$$t_c = 3,845 \quad ms$$

$$E_{M\acute{a}x} = 57,6 \quad V$$

$$R_c = 12,1 \quad \Omega$$

As principais formas de onda deste modo de funcionamento são mostradas na Figura 4.6.

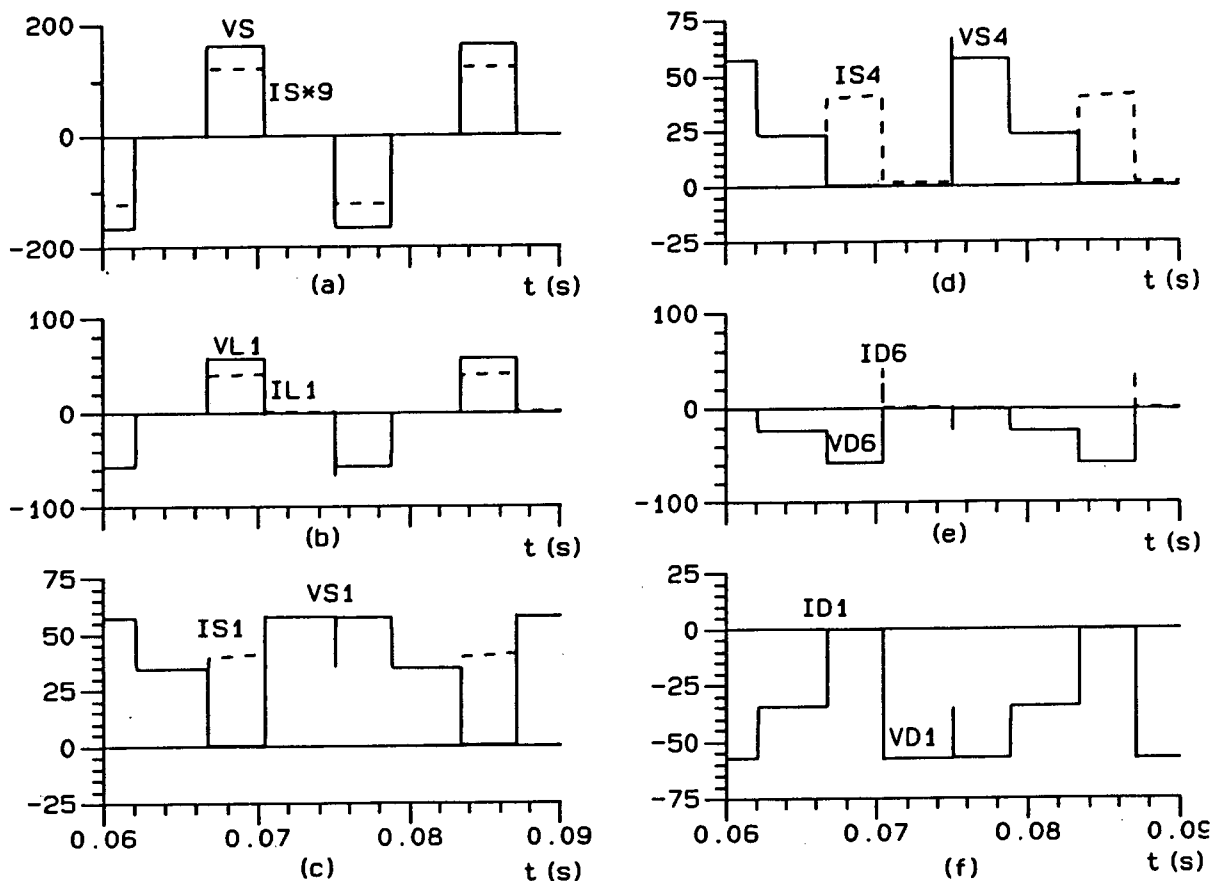


Figura 4.6.- Principais Formas de onda Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente na Chave S1, d) Tensão e Corrente na Chave S4, e) Tensão e Corrente no Diodo D6, f) Tensão e Corrente no Diodo D1.

4.4.4.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima.-

Das expressões (2.23) e (2.24), se calcula o tempo de condução das chaves principais.

$$t_c = 3,845 \text{ ms}$$

$$E_{\text{Min}} = 38,4 \text{ V}$$

Na Figura 4.7, mostra-se as principais formas de onda deste modo de funcionamento.

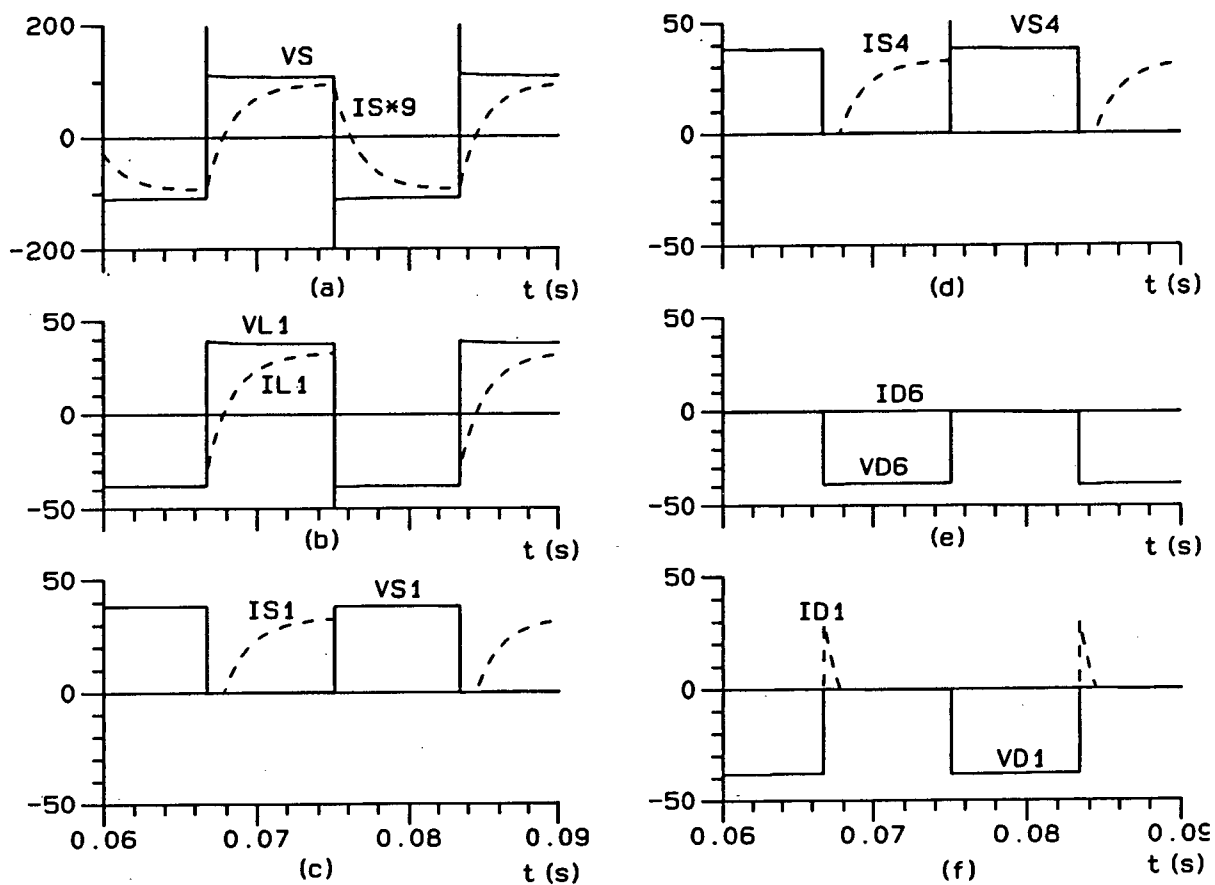


Figura 4.7.- Principais Formas de Onda Para Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente na Chave S1, d) Tensão e Corrente na Chave S4, e) Tensão e Corrente no Diodo D6, f) Tensão e Corrente no Diodo D1.

4.4.5.- Simulação Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima.-

O tempo de condução das chaves principais é:

$$t_c = 3,845 \text{ ms}$$

$$E_{M\acute{a}x} = 57,6 \text{ V}$$

As principais formas de onda deste modo de funcionamento são mostradas na Figura 4.8.

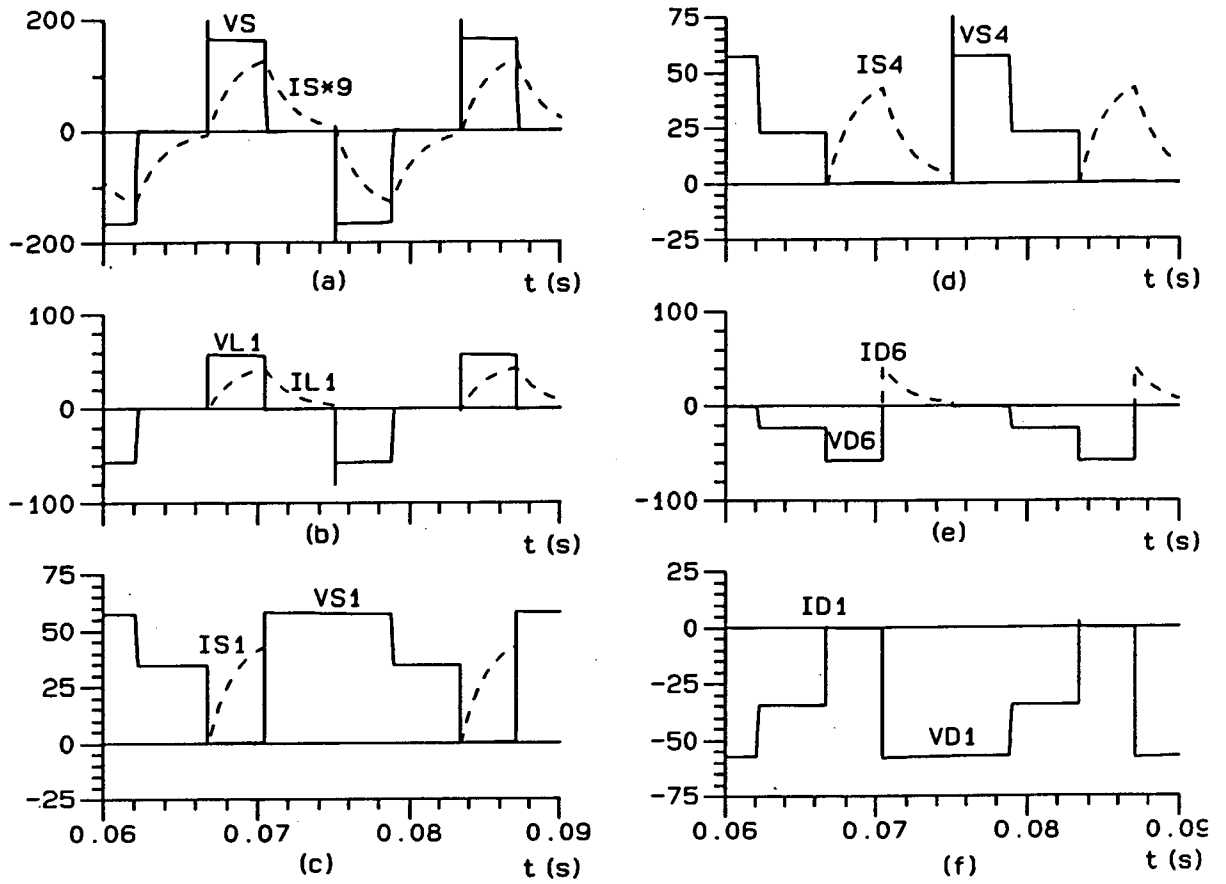


Figura 4.8.- Principais Formas de Onda Para Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente na Chave S1, d) Tensão e Corrente na Chave S4, e) Tensão e Corrente no Diodo D6, f) Tensão e Corrente no Diodo D1.

4.5.- CONCLUSÕES.-

Foram apresentados os resultados de simulação das duas estruturas para tensões de entrada máxima e mínima, alimentando carga resistiva e indutiva.

Dos resultados obtidos, verifica-se o estudo teórico efetuado no capítulo 3, com o qual comprova-se que, com as duas estruturas é possível criar o terceiro nível na carga. Além disso, as estruturas permitem o controle da transferência de energia para a carga através do tempo de condução das chaves principais.

As indutâncias de dispersão do transformador, causam sobretensões nas chaves, que são limitadas a valores toleráveis pelas chaves através de circuitos limitadores. Para cada uma das estruturas, o circuito limitador de sobretensão utilizado é diferente, como são mostrados nas Figuras (4.1) e (4.5) respectivamente.

CAPÍTULO 5

PROJETO DAS ESTRUTURAS A TRÊS NÍVEIS

5.1.- INTRODUÇÃO.-

Neste capítulo apresenta-se os critérios para o dimensionamento dos parâmetros das estruturas propostas à três níveis.

É incluído um exemplo de projeto de cada uma das estruturas para implementação das mesmas.

Será efetuado o cálculo dos parâmetros, para o dimensionamento dos mesmos.

Para:

P_A	Potência de Saída
V_S	Tensão Eficaz de Saída
f	Frequência da Tensão de Saída
E	Tensão de Entrada CC

5.2.- CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE CARGA

$$|Z| = \frac{V_S^2}{P_A} \quad (5.1)$$

a) Carga Resistiva

$$R_c = |Z| \quad (5.2)$$

b) Carga Indutiva

$$R_c = |Z| \cos \phi \quad (5.3)$$

$$L_c = \frac{|Z| \sin \phi}{2 \pi f} \quad (5.4)$$

5.3.- CÁLCULO DA CORRENTE EFICAZ NA CARGA

$$I_{S_{EFF}} = \frac{P_A}{V_S} \quad (5.5)$$

5.4.- CÁLCULO DO TRANSFORMADOR

O transformador na estrutura permite adaptar a tensão de entrada à tensão de saída desejada, além de isolar a carga do conversor.

O dimensionamento do transformador será feito considerando a tensão eficaz da fundamental do primário e secundário, seguindo o mesmo roteiro de cálculo de transformadores para baixa frequência.

Das expressões desenvolvidas no capítulo 2 temos:

$$\frac{n_s}{n_p} = \frac{V_p}{V_s} \quad (5.6)$$

Onde:

$$V_p = E - k \Delta V \quad (5.7)$$

$$V_s = \frac{\sqrt{2} \pi V_{S_{EFF}}}{4 \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (5.8)$$

$V_{S_{EFF}}$	Tensão Eficaz de Saída
V_p	Tensão no Primário
V_s	Tensão no Secundário
k	Número de Interruptores Conduzindo

Das expressões (5.6), (5.7) e (5.8) calcula-se a relação de transformação do transformador.

5.5.- CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE CARGA REFLETIDA PARA O PRIMÁRIO

Se efetuará o cálculo da carga refletida para o primário, afim de determinar a corrente no primário.

a) Carga Resistiva

$$R'_c = \frac{R_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} \quad (5.9)$$

b) Carga Indutiva

$$R'_c = \frac{R_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} \quad (5.10)$$

$$L'_c = \frac{L_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} \quad (5.11)$$

5.6.- CÁLCULO DA CORRENTE EFICAZ TOTAL NO PRIMÁRIO

Para o cálculo da corrente no primário considera-se 15% de perdas no transformador.

$$P_{en_A} = 1,15 P_A \quad \text{Potência de Entrada}$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = \frac{P_{en_A}}{V_{En_{1EFF}}} \quad (5.12)$$

5.7.- CÁLCULO DA CORRENTE EFICAZ EM CADA PRIMÁRIO

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{P_{EFFTOTAL}}}{\sqrt{2}} \quad (5.13)$$

5.8.- DIMENSIONAMENTO DOS INTERRUPTORES

A escolha dos interruptores é feita levando em conta a corrente eficaz e a tensão sobre os interruptores.

5.8.1.- Cálculo da Queda de Tensão em Cada Interruptor.

Para calcular a queda da tensão no interruptor deve-se considerar a resistência de condução.

$$\Delta V = R_{DS(on)} I_{P_{EFF}} \quad (5.14)$$

$R_{DS(on)}$ Resistência de Condução do Interruptor

5.9.- CÁLCULO DA CORRENTE DE PICO, MÉDIA E EFICAZ

Efetuar-se-á o cálculo da corrente de pico, média e eficaz no primário do transformador para o dimensionamento dos elementos do conversor, para :

- Carga resistiva e tensão de entrada máxima e mínima.
- Carga indutiva e tensão de entrada máxima e mínima.

5.9.1.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima.

Para este modo de funcionamento o ângulo de condução dos interruptores principais é igual à π . A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 5.1.

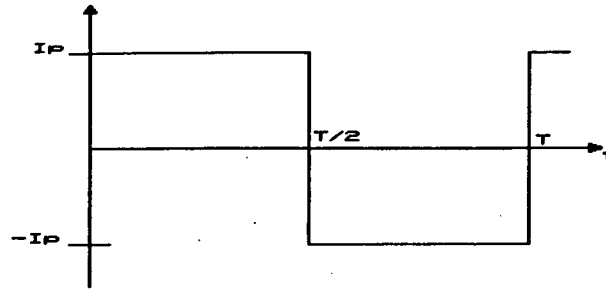


Figura 5.1.- Forma de Onda da Corrente no Primário Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima.

a) Corrente de Pico.

$$I_{PK} = \frac{V_P}{R'_c} \quad (5.15)$$

b) Corrente Média e Eficaz Total.

$$I_{P_{medTOTAL}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{PK} dt \quad (5.16)$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{PK}^2 dt} \quad (5.17)$$

c) Corrente Média e Eficaz Total em Cada Primário.

$$I_{P_{MED}} = \frac{I_{P_{MEDTOTAL}}}{2} \quad (5.18)$$

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{P_{EFFTOTAL}}}{\sqrt{2}} \quad (5.19)$$

5.9.2.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima.

O tempo de condução dos interruptores principais é calculado a partir das expressões (2.23) e (2.24), e a corrente de pico, média e eficaz para este modo de funcionamento são calculadas a partir das expressões (5.15), (5.16), (5.17).

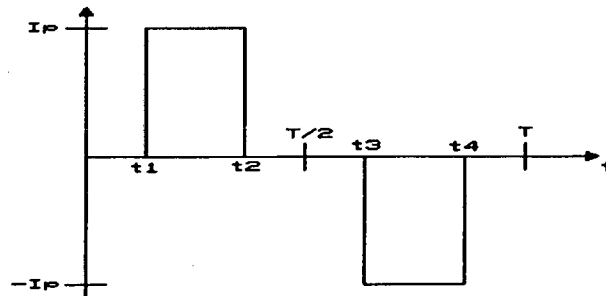


Figura 5.2.- Forma de Onda da Corrente no Primário Para Carga Resistiva e tensão de Entrada Máxima.

a) Cálculo do Tempo de Condução dos Interruptores Principais.

A partir das expressões (2.23) e (2.24) se tem:

$$\phi = 2 \arcsen \left(\frac{\sqrt{2} \pi V_{s_{1EFF}}}{4 \left(\frac{n_s}{n_p} \right) V_P} \right) \quad (5.20)$$

$$t_c = \frac{\phi}{2 \pi f} \quad (5.21)$$

b) Corrente de Pico.

$$I_{Pk} = \frac{V_P}{R'_c} \quad (5.22)$$

c) Corrente Média e Eficaz Total.

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} I_{PK} dt = \frac{2 I_{PK}}{T} (t_2 - t_1) \quad (5.23)$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} I_{PK}^2 dt} = I_{PK} \sqrt{\frac{2}{T} (t_2 - t_1)} \quad (5.24)$$

d) Corrente Média e Eficaz Total em Cada Primário.

Será calculado a partir das expressões (5.18) e (5.19).

5.9.3.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima.

Para este modo de funcionamento calcula-se a constante de tempo a partir da carga e o ângulo de condução dos interruptores principais é igual a π . A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 5.3.

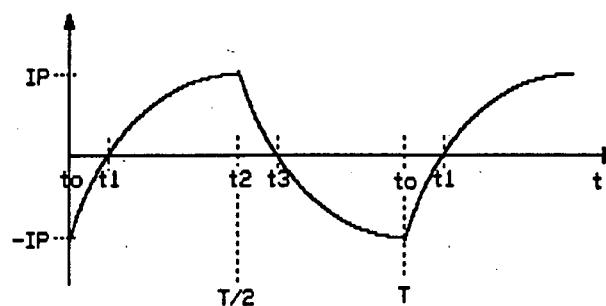


Figura 5.3.- Forma de Onda da Corrente no Primário Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima.

a) Cálculo da Constante de Tempo.

$$\tau_c = \frac{L'_c}{R'_c} \quad (5.25)$$

τ_c Constante de Tempo

b) Expressão da Corrente

Das expressões desenvolvidas no capítulo 3 e considerando-se a corrente de magnetização inserida na corrente do primário, a expressão da corrente é dada pela expressão (5.26).

$$i_p(t) = \frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{Pk} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_c}} \quad (5.26)$$

Onde para: $t_2 = T/2$

$$i_p(t_2) = I_{Pk} \quad (5.27)$$

Substituindo a expressão (5.27) em (5.26), obtém-se a corrente de pico que é dada pela expressão (5.28).

c) Corrente de Pico.

$$I_{Pk} = \frac{V_p}{R'_c} \left(\frac{1 - e^{-\frac{(t_2-t_0)}{\tau_c}}}{1 + e^{-\frac{(t_2-t_0)}{\tau_c}}} \right) \quad (5.28)$$

d) Corrente Média e Eficaz Total.

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{Pk} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_c}} \right] dt \quad (5.29)$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{Pk} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_c}} \right]^2 dt} \quad (5.30)$$

Cálculo da corrente média e eficaz para os intervalos $t_0 < t < t_1$ e $t_1 < t < t_2$.

c) Cálculo de t_1 .

Para $t=t_1$

$$i_p(t_1) = 0 \quad (5.31)$$

Substituindo a expressão (5.31) em (5.26) resulta:

$$t_1 = t_o + \tau_c \ln \left(1 + \frac{I_{PK}}{\left(\frac{V_p}{R'_c} \right)} \right) \quad (5.32)$$

e) Cálculo da Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_o < t < t_1$

$$I_{P_{MED}} = \frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_1} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{PK} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right] dt \quad (5.33)$$

$$I_{P_{EFF}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_1} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{PK} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right]^2 dt} \quad (5.34)$$

f) Cálculo da Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$

$$I_{P_{MED}} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{PK} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right] dt \quad (5.35)$$

$$I_{P_{EFF}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_{PK} + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right]^2 dt} \quad (5.36)$$

5.9.4.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima.

Neste modo de funcionamento é necessário determinar a duração de cada intervalo para o cálculo da corrente que circula em cada interruptor. A forma de onda da corrente é mostrada na Figura 5.4.

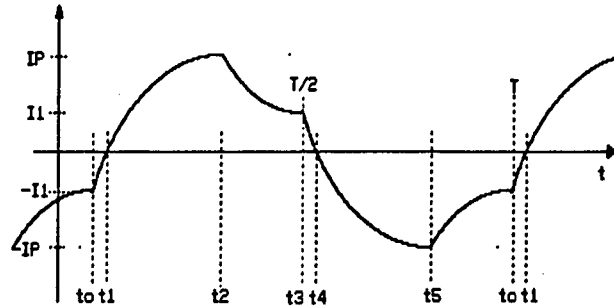


Figura 5.4.- Forma de Onda da Corrente no primário Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima.

a) Cálculo do Tempo de Condução dos Interruptores Principais.

O tempo de condução dos interruptores principais é calculado através das expressões (5.20) e (5.21).

b) Expressão da Corrente

Das expressões desenvolvidas no capítulo 3 e considerando-se a corrente de magnetização inserida na corrente do primário, a corrente que rege o intervalo $t_0 < t < t_2$ é dada pela expressão (5.37).

$$i_p(t) = \frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_c}} \quad (5.37)$$

A corrente que rege o intervalo $t_2 < t < t_3$ é dada pela expressão (5.38).

$$i_p(t) = I_{pk} e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_c}} \quad (5.38)$$

c) Corrente de Pico e Corrente I_1 .

A corrente de pico é dada pela expressão (5.39).

$$I_{Pk} = \frac{V_p}{R'_c} \left(\frac{1 - e^{-\frac{(t_2 - t_0)}{\tau_c}}}{1 + e^{-\frac{(t_3 - t_0)}{\tau_c}}} \right) \quad (5.39)$$

A corrente I_1 (mostrada na Figura 5.4) é dada pela expressão (5.40).

$$I_1 = I_{Pk} e^{-\frac{(t_3 - t_2)}{\tau_c}} \quad (5.40)$$

d) Corrente Média e Eficaz Total.

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = \frac{2}{T} \left[\int_{t_0}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_c}} \right] dt + \int_{t_2}^{t_3} \left(I_{Pk} e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_c}} \right) dt \right] \quad (5.41)$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = \sqrt{\frac{2}{T} \left[\int_{t_0}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_c}} \right]^2 dt + \int_{t_2}^{t_3} \left(I_{Pk} e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_c}} \right)^2 dt \right]} \quad (5.42)$$

Cálculo da corrente média e eficaz para os intervalos $t_0 < t < t_1$, $t_1 < t < t_2$ e $t_2 < t < t_3$.

e) Cálculo de t_1 .

Para $t = t_1$ tem-se:

$$i_p(t_1) = 0 \quad (5.43)$$

Substituindo a expressão (5.43) em (5.37) obtém-se:

$$t_1 = t_o + \tau_c \ln \left(1 + \frac{I_1}{\left(\frac{V_p}{R'_c} \right)} \right) \quad (5.44)$$

f) Cálculo da Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_o < t < t_1$.

$$I_{P_{MED}} = \frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_1} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right] dt \quad (5.45)$$

$$I_{P_{EFF}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_o}^{t_1} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right]^2 dt} \quad (5.46)$$

g) Cálculo da Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$.

$$I_{P_{MED}} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right] dt \quad (5.47)$$

$$I_{P_{EFF}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{V_p}{R'_c} - \left(I_1 + \frac{V_p}{R'_c} \right) e^{-\frac{(t-t_o)}{\tau_c}} \right]^2 dt} \quad (5.48)$$

h) Cálculo da Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_2 < t < t_3$.

$$I_{P_{MED}} = \frac{1}{T} \int_{t_2}^{t_3} I_{pk} e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_c}} dt \quad (5.49)$$

$$I_{P_{EFF}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_2}^{t_3} \left[I_{pk} e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_c}} \right]^2 dt} \quad (5.50)$$

Para cada modo de funcionamento foram obtidas as expressões da corrente, a partir das quais será calculada a corrente em cada elemento para seu dimensionamento, considerando-se a máxima corrente.

5.10.- EXEMPLO DE PROJETO PARA A PRIMEIRA ESTRUTURA.

Para verificar a validade das expressões obtidas, é realizado um exemplo de projeto da estrutura proposta (Figura 3.2), com as seguintes especificações.

$P_A = 1$ KVA	Potência de Saída
$V_s = 110$ V	Tensão Eficaz de Saída
$f = 60$ Hz	Frequência da Tensão de Saída
$E = 48 \pm 20\%$ V	Tensão de Entrada CC

a) Cálculo da Impedância de Carga.

$$|Z| = \frac{V_s^2}{P_A} = \frac{110^2}{1000} = 12,1 \quad \Omega$$

- Carga Resistiva.

$$R_c = |Z| = 12,1 \quad \Omega$$

- Carga Indutiva Para $\cos \phi = 0,85$.

$$R_c = |Z| \cos \phi = 12,1 \times 0,85 = 10,3 \quad \Omega$$

b) Cálculo da Corrente Eficaz Total no Primário.

$$P_{enA} = 1,15 P_A = 1,15 \times 1000 = 1150 \quad VA$$

$$V_{En1EFF} = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} E_{min} = \frac{4 \times 38,4}{\sqrt{2} \times \pi} = 34,57 \quad V$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = \frac{P_{enA}}{V_{En1EFF}} = \frac{1150}{34,57} = 33,3 \quad A$$

c) Cálculo da Corrente Eficaz em Cada Primário.

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{P_{EFFTOTAL}}}{\sqrt{2}} = \frac{33,3}{\sqrt{2}} = 23,5 \quad A$$

d) Interruptores.

Como interruptores serão empregados o MOSFET IRF250 da MOTOROLA, com as seguintes características.

V_{DS}	= 200	V	Tensão Dreno-Fonte Máximo
I_D	= 30	A	Corrente de Dreno Média
I_{Dpeak}	= 120	A	Corrente de Dreno Máxima
$R_{DS(on)}$	= 0,085	Ω (à 25°C)	Resistência de Condução

e) Cálculo da Queda de Tensão no Interruptor (à 25°C).

$$\Delta V = R_{DS(on)} I_{P_{EFF}} = 0,085 \times 23,5 = 2 \quad V$$

f) Cálculo do Transformador.

O cálculo da relação de transformação é feita para tensão de entrada mínima e o ângulo de condução igual à π ($\phi = \pi$).

$$V_p = E_{Min} - \Delta V = 38,4 - 2 = 36,4 \quad V$$

$$V_s = \frac{\sqrt{2} \pi V_{s_{1EFF}}}{4 \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} = \frac{\sqrt{2} \times \pi \times 110}{4 \times \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 122,22 \quad V$$

$$\frac{n_s}{n_p} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{122,22}{36,4} = 3,4$$

g) Cálculo da Impedância de Carga Refletida Para o Primário.

- Carga Resistiva

$$R'_c = \frac{R_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} = \frac{12,1}{3,4^2} = 1,047 \quad \Omega$$

- Carga Indutiva Para $\cos \phi = 0,85$

$$R'_c = \frac{R_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} = \frac{10,3}{3,4^2} = 0,89 \quad \Omega$$

$$L'_c = \frac{L_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} = \frac{16,91 \times 10^{-3}}{3,4^2} = 1,463 \quad mH$$

5.10.1.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima.

a) Corrente de Pico

$$I_{Pk} = \frac{V_p}{R'_c} = \frac{36,4}{1,047} = 34,8 \quad A$$

b) Corrente Média e Eficaz Total

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = I_{Pk} = 34,8 \quad A$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = I_{Pk} = 34,8 \quad A$$

c) Corrente Média e Eficaz em cada Primário

$$I_{P_{Med}} = \frac{I_{Pk}}{2} = 17,4 \quad A$$

$$I_{P_{Eff}} = \frac{I_{Pk}}{\sqrt{2}} = 24,6 \quad A$$

5.10.2.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima.

a) Cálculo do Tempo de Condução dos Interruptores Principais

$$V_p = E_{Máx} - \Delta V = 57,6 - 2 = 55,6 \quad V$$

$$\phi = 2 \arcsen \left[\frac{\sqrt{2} \times \pi \times 110}{4 \times 3,4 \times 55,6} \right] = 1,406 \quad rd$$

$$t_c = \frac{\phi}{2 \times \pi \times 60} = 3,728 \quad ms$$

b) Corrente de Pico

$$I_{Pk} = \frac{V_p}{R'_c} = \frac{55,6}{1,047} = 53,1 \quad A$$

c) Corrente Média e Eficaz Total

$$I_{P_{MedTOTAL}} = \frac{2}{T} I_{Pk} t_c = \frac{2 \times 53,1 \times 3,728 \times 10^{-3}}{16,67 \times 10^{-3}} = 23,8 \quad A$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = I_{Pk} \sqrt{\frac{2}{T} t_c} = 53,1 \sqrt{\frac{2 \times 3,728 \times 10^{-3}}{16,67 \times 10^{-3}}} = 35,5 \quad A$$

d) Corrente Média e Eficaz em Cada Primário

$$I_{P_{MED}} = \frac{I_{P_{MEDTOTAL}}}{2} = \frac{23,8}{2} = 12 \quad A$$

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{P_{EFFTOTAL}}}{\sqrt{2}} = \frac{35,5}{\sqrt{2}} = 25,1 \quad A$$

5.10.3.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima.

Para este modo de funcionamento considera-se $t_o = 0$.

a) Tensão de Entrada

$$V_p = E_{min} - \Delta V = 38,4 - 2 = 36,4 \quad V$$

b) Cálculo de τ_c

$$\tau_c = \frac{L'_c}{R'_c} = \frac{1,463 \times 10^{-3}}{0,89} = 1,644 \times 10^{-3} \text{ s}$$

c) Corrente de Pico

$$I_{PK} = 40,4 \text{ A}$$

d) Corrente Média e Eficaz Total

$$\begin{aligned} I_{P_{MEDTOTAL}} &= 24,9 \text{ A} \\ I_{P_{EFFTOTAL}} &= 32 \text{ A} \end{aligned}$$

e) Corrente Média e Eficaz em Cada Primário

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= 12,45 \text{ A} \\ I_{P_{EFF}} &= 22,63 \text{ A} \end{aligned}$$

Cálculo da Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$.

f) Cálculo de t_1 .

$$t_1 = 1,1295 \text{ ms}$$

g) Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_0 < t < t_1$.

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= -1,23 \text{ A} \\ I_{P_{EFF}} &= 5,6 \text{ A} \end{aligned}$$

h) Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$.

Onde:

$$t_2 = T/2 = 8,33333 \text{ ms}$$

$$t_1 = 1,1295 \text{ ms}$$

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= 13,7 \text{ A} \\ I_{P_{EFF}} &= 22 \text{ A} \end{aligned}$$

5.10.4.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima.

a) Tensão de Entrada

$$V_p = E_{Máx} - \Delta V = 57,6 - 2 = 55,6 \quad V$$

b) Cálculo de τ_c

$$\tau_c = 1,644 \times 10^{-3} \quad s$$

c) Cálculo do Tempo de Condução dos Interruptores Principais

$$\phi = 2 \arcsen \left[\frac{\sqrt{2} \times \pi \times 110}{4 \times 3,4 \times 55,6} \right] = 1,406 \quad rd$$

$$t_c = \frac{\phi}{2 \times \pi \times 60} = 3,728 \quad ms$$

d) Corrente de Pico e Corrente I_1

$$\begin{aligned} I_{Pk} &= 55,7 \quad A \\ I_1 &= 3,4 \quad A \end{aligned}$$

e) Corrente Média e Eficaz em Cada Primário

para o cálculo da corrente em cada intervalo tem-se:

$$t_0 = 0 \quad ms$$

$$t_1 = 0,0872 \quad ms$$

$$t_2 = 3,728 \quad ms$$

$$t_3 = T/2 = 8.3333 \quad ms$$

- Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_0 < t < t_1$,

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= -13,68 && mA \\ I_{P_{EFF}} &= 141 && mA \end{aligned}$$

- Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$,

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= 8,16 && A \\ I_{P_{EFF}} &= 18,89 && A \end{aligned}$$

- Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_2 < t < t_3$,

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= 5,16 && A \\ I_{P_{EFF}} &= 12,35 && A \end{aligned}$$

f) Corrente Média e Eficaz Total

$$\begin{aligned} I_{P_{MED_{TOTAL}}} &= 26,6 && A \\ I_{P_{EFF_{TOTAL}}} &= 31,9 && A \end{aligned}$$

A partir das expressões desenvolvidas no capítulo 3 e dos cálculos efetuados, determina-se os valores máximos nos elementos do conversor.

Tensão Máxima nos Interruptores Principais	111,2	V
Tensão Máxima nos Interruptores Auxiliares	111,2	V
Tensão Máxima reversa nos Diodos	111,2	V
Corrente Máxima nos Interruptores Principais	55,7	A
Corrente Máxima nos Interruptores Auxiliares	55,7	A
Corrente Máxima nos Diodos	55,7	A

Dos cálculos feitos determinam-se a corrente eficaz e média nos elementos do conversor.

Corrente Eficaz Máxima nos Interruptores Principais	25	A
---	----	---

Corrente Média Máxima nos Interruptores Principais	17,4	A
Corrente Eficaz Máxima nos Interruptores Auxiliares	12,4	A
Corrente Média Máxima nos Interruptores Auxiliares	5,6	A
Corrente Eficaz Máxima nos Diodos D ₁ e D ₂	5,6	A
Corrente Média Máxima nos Diodos D ₁ e D ₂	1,2	A

5.11.- EXEMPLO DE PROJETO PARA A SEGUNDA ESTRUTURA.

Para verificar as expressões obtidas, é realizado um exemplo de projeto para a estrutura proposta (Figura 3.8), com as seguintes especificações:

$P_A = 1 \text{ KVA}$	Potência de Saída
$V_S = 110 \text{ V}$	Tensão Eficaz de Saída
$f = 60 \text{ Hz}$	Frequência da Tensão de Saída
$E = 48 \pm 20\% \text{ V}$	Tensão de Entrada CC

a) Cálculo da Impedância de Carga.

$$|Z| = \frac{V_S^2}{P_A} = \frac{110^2}{1000} = 12,1 \quad \Omega$$

- Carga Resistiva.

$$R_c = |Z| = 12,1 \quad \Omega \quad (5.82)$$

- Carga Indutiva Para $\cos \phi = 0,85$.

$$R_c = |Z| \cos \phi = 12,1 \times 0,85 = 10,3 \quad \Omega$$

$$L_c = \frac{|Z| \sin \phi}{2 \pi f} = \frac{12,1 \times 0,527}{2 \times \pi \times 60} = 16,91 \quad \text{mH}$$

b) Cálculo da Corrente Eficaz Total no Primário.

$$\begin{aligned}
 P_{en_A} &= 1,15 P_A = 1,15 \times 1000 = 1150 \quad \text{VA} \\
 V_{E_{n_1, EFF}} &= \frac{4}{\sqrt{2} \pi} E_{min} = \frac{4 \times 38,4}{\sqrt{2} \times \pi} = 34,57 \quad \text{V} \\
 I_{P_{EFF, TOTAL}} &= \frac{P_{en_A}}{V_{E_{n_1, EFF}}} = \frac{1150}{34,57} = 33,3 \quad \text{A}
 \end{aligned}$$

c) Cálculo da Corrente Eficaz em Cada Primário.

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{P_{EFF, TOTAL}}}{\sqrt{2}} = \frac{33,3}{\sqrt{2}} = 23,5 \quad \text{A}$$

d) Interruptores.

Como interruptores serão empregados os MOSFET's IRF250 da MOTOROLA, com as seguintes características.

$V_{DS} = 200$	V	Tensão Dreno-Fonte Máximo
$I_D = 30$	A	Corrente de Dreno Média
$I_{Dpeak} = 120$	A	Corrente de Dreno Máxima
$R_{DS(on)} = 0,085$	Ω (à 25°C)	Resistência de Condução

e) Cálculo da Queda de Tensão no interruptor.

$$\Delta V = R_{DS(on)} I_{P_{EFF}} = 0,085 \times 23,5 = 2 \quad \text{V}$$

f) Cálculo do Transformador.

O cálculo da relação de transformação é feita para tensão de entrada mínima sendo que $\phi = \pi$.

$$V_p = E_{Min} - 2\Delta V = 38,4 - 2 \times 2 = 34,4 \quad \text{V}$$

$$V_s = \frac{\sqrt{2} \pi v_{s, \text{EFF}}}{4 \text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)} = \frac{\sqrt{2} \times \pi \times 110}{4 \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right)} = 122,22 \quad \text{V}$$

$$\frac{n_s}{n_p} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{122,22}{34,4} = 3,6$$

g) Cálculo da Impedância de Carga Refletida Para o Primário.

- Carga Resistiva

$$R'_c = \frac{R_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} = \frac{12,1}{3,6^2} = 0,934 \quad \Omega$$

- Carga Indutiva Para $\cos \phi = 0,85$

$$R'_c = \frac{R_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} = \frac{10,3}{3,6^2} = 0,795 \quad \Omega$$

$$L'_c = \frac{L_c}{\left(\frac{n_s}{n_p}\right)^2} = \frac{16,91 \times 10^{-3}}{3,6^2} = 1,305 \quad \text{mH}$$

5.11.1.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Mínima.

a) Corrente de Pico

$$I_{PK} = \frac{V_p}{R'_c} = \frac{36,4}{0,934} = 36,83 \quad \text{A}$$

b) Corrente Média e Eficaz Total

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = I_{PK} = 36,83 \quad \text{A}$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = I_{PK} = 36,83 \quad \text{A}$$

c) Corrente Média e Eficaz em cada Primário

$$I_{P_{MED}} = \frac{I_{PK}}{2} = 18,42 \quad A$$

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{PK}}{\sqrt{2}} = 26,1 \quad A$$

5.11.2.- Cálculo da Corrente de Pico, Eficaz e Média Para Carga Resistiva e Tensão de Entrada Máxima.

a) Cálculo do Tempo de Condução dos Interruptores Principais

$$V_p = E_{Máx} - 2\Delta V = 57,6 - 2 \times 2 = 53,6 \quad V$$

$$\phi = 2 \arcsen \left[\frac{\sqrt{2} \times \pi \times 110}{4 \times 3,6 \times 53,6} \right] = 1,372 \quad rd$$

$$t_c = \frac{\phi}{2 \times \pi \times 60} = 3,638 \quad ms$$

b) Corrente de Pico

$$I_{PK} = \frac{V_p}{R'_c} = \frac{53,6}{0,934} = 57,4 \quad A$$

c) Corrente Média e Eficaz Total

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = \frac{2}{T} I_{PK} t_c = \frac{2 \times 57,4 \times 3,638 \times 10^{-3}}{16,67 \times 10^{-3}} = 25,1 \quad A$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = I_{PK} \sqrt{\frac{2}{T} t_c} = 57,4 \sqrt{\frac{2 \times 3,638 \times 10^{-3}}{16,67 \times 10^{-3}}} = 37,93 \quad A$$

e) Corrente Média e Eficaz em Cada Primário

$$I_{P_{MED}} = \frac{I_{P_{MEDTOTAL}}}{2} = \frac{25,1}{2} = 12,55 \quad A$$

$$I_{P_{EFF}} = \frac{I_{P_{EFFTOTAL}}}{\sqrt{2}} = \frac{37,93}{\sqrt{2}} = 26,82 \quad A$$

5.11.3.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Mínima.

Para o cálculo considera-se $t_0 = 0$.

a) Tensão de Entrada

$$V_p = E_{mín} - 2\Delta V = 38,4 - 2 \times 2 = 34,4 \quad V$$

b) Cálculo de τ_c

$$\tau_c = \frac{L'_c}{R'_c} = \frac{1,305 \times 10^{-3}}{0,795} = 1,642 \times 10^{-3} \quad s$$

c) Corrente de Pico

$$I_{PK} = 42,73 \quad A$$

d) Corrente Média e Eficaz Total

$$I_{P_{MEDTOTAL}} = 26,43 \quad A$$

$$I_{P_{EFFTOTAL}} = 33,82 \quad A$$

e) Corrente Média e Eficaz em Cada Primário

$$I_{P_{MED}} = 13,2 \quad A$$

$$I_{P_{EFF}} = 23,9 \quad A$$

f) Cálculo de t_1 .

$$t_1 = 1,128 \quad ms$$

g) Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_0 < t < t_1$.

$$I_{P_{MED}} = -1,28 \quad A$$

$$I_{P_{EFF}} = 5,87 \quad A$$

h) Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$.

Onde:

$$t_1 = 1,128 \quad \text{ms}$$

$$t_2 = T/2 = 8,33333 \quad \text{ms}$$

$$I_{P_{MED}} = 14,5 \quad \text{A}$$

$$I_{P_{EFF}} = 23,18 \quad \text{A}$$

5.11.4.- Cálculo da Corrente de Pico, Média e Eficaz Para Carga Indutiva e Tensão de Entrada Máxima.

a) Tensão de Entrada

$$V_p = E_{Máx} - 2 \Delta V = 57,6 - 2 \times 2 = 53,6 \quad \text{V}$$

b) Cálculo de τ_c

$$\tau_c = \frac{L'_c}{R'_c} = \frac{1,305 \times 10^{-3}}{0,795} = 1,642 \times 10^{-3} \quad \text{s}$$

c) Cálculo do Tempo de Condução dos Interruptores Principais

$$\phi = 2 \arcsen \left[\frac{\sqrt{2} \times \pi \times 110}{4 \times 3,6 \times 53,6} \right] = 1,371 \quad \text{rd}$$

$$t_c = \frac{\phi}{2 \times \pi \times 60} = 3,638 \quad \text{ms}$$

d) Corrente de Pico e Corrente I_1

$$I_{PK} = 59,7 \quad \text{A}$$

$$I_1 = 3,4 \quad \text{A}$$

e) Corrente Média e Eficaz em Cada Primário

Para o cálculo da corrente em cada intervalo tem-se:

$$t_0 = 0$$

$$t_1 = 0,081 \text{ ms}$$

$$t_2 = 3,638 \text{ ms}$$

$$t_3 = T/2 = 8.3333 \text{ ms}$$

- Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_0 < t < t_1$,

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= -8,3 \quad mA \\ I_{P_{EFF}} &= 192 \quad mA \end{aligned}$$

- Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_1 < t < t_2$,

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= 8,51 \quad A \\ I_{P_{EFF}} &= 19,95 \quad A \end{aligned}$$

- Corrente Média e Eficaz Para o Intervalo $t_2 < t < t_3$,

$$\begin{aligned} I_{P_{MED}} &= 5,55 \quad A \\ I_{P_{EFF}} &= 13,23 \quad A \end{aligned}$$

f) Corrente Média e Eficaz Total

$$\begin{aligned} I_{P_{MEDTOTAL}} &= 28,1 \quad A \\ I_{P_{EFFTOTAL}} &= 33,84 \quad A \end{aligned}$$

A partir das expressões desenvolvidas no capítulo 3 e dos cálculos efetuados, determina-se os valores máximos nos elementos do conversor.

Tensão Máxima nos Interruptores Principais	53,6	V
Tensão Máxima nos Interruptores Auxiliares	53,6	V
Tensão Máxima reversa nos Diodos	53,6	V
Corrente Máxima nos Interruptores Principais	59,7	A
Corrente Máxima nos Interruptores Auxiliares	59,7	A
Corrente Máxima nos Diodos	59,7	A

Dos cálculos feitos determinam-se a corrente eficaz e média nos elementos do conversor.

Corrente Eficaz Máxima nos Interruptores Principais	26,8	A
Corrente Média Máxima nos Interruptores Principais	18,5	A
Corrente Eficaz Máxima nos Interruptores Auxiliares	26,8	A
Corrente Média Máxima nos Interruptores Auxiliares	18,5	A
Corrente Eficaz Máxima nos Diodos D_5 e D_6	13,23	A
Corrente Média Máxima nos Diodos D_5 e D_6	5,6	A

5.12.- CONCLUSÕES.-

Neste capítulo foram apresentado as equações básicas que regem o funcionamento das duas estruturas.

Dos cálculos efetuados para o projeto de cada uma das estruturas propostas, verifica-se vantagens e desvantagens de uma com relação a outra, conforme será descrito a seguir.

A primeira estrutura apresenta as seguintes vantagens e desvantagens, comparada com a segunda estrutura.

- Vantagens

- A corrente eficaz nos interruptores auxiliares é menor.
- A relação de espiras é menor, já que na transferência de energia tem-se um só interruptor conduzindo.
- A corrente no primário é menor.
- Para criar o terceiro nível, é usado um interruptor bidirecional em tensão e corrente.

- Desvantagens

- A máxima tensão nos interruptores é igual ao dobro da tensão de entrada.

A segunda estrutura apresenta as seguintes vantagens e desvantagens, comparada com a primeira estrutura.

- Vantagens.

- A máxima tensão aplicada sobre os interruptores é igual à tensão de entrada.

- Desvantagens.

- A corrente eficaz nos interruptores auxiliares é maior, porque elas conduzem meio período.

- A relação de transformação é maior, porque se tem dois interruptores conduzindo.

- A corrente no primário é maior que na primeira estrutura.

- Para criar o terceiro nível, são usados dois interruptores bidirecionais em corrente e dois diodos.

Considerando estes fatos, os componentes de cada uma das estruturas são dimensionados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1.- INTRODUÇÃO.-

Para cada uma das estruturas implementou-se um protótipo com os parâmetros projetados no capítulo 5, objetivando a verificação dos mesmos. O princípio de funcionamento das estruturas é testado em malha aberta, alimentando carga indutiva para tensão de entrada máxima e mínima.

Também se implementou o circuito de comando para cada uma das estruturas, sendo que para a primeira estrutura o comando dos interruptores auxiliares é complementar ao comando dos interruptores principais, e para a segunda estrutura o comando dos interruptores auxiliares sempre é meio período.

6.2.- CIRCUITO DE COMANDO DA PRIMEIRA ESTRUTURA.

O circuito de comando da primeira estrutura, é realizado a partir de sinais lógicos gerados por um oscilador de cristal (1,2MHz) e divisores de frequência até alcançar a frequência desejada (60 Hz). Este sinal vai para o circuito "driver" que é o encarregado de gerar os pulsos para a entrada em condução e bloqueio de cada interruptor. O diagrama de blocos é mostrado na Figura 6.1.

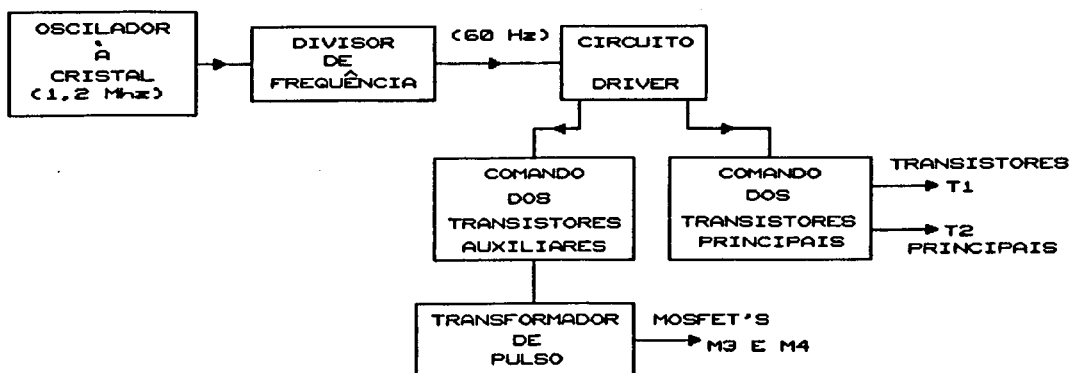


Figura 6.1.- Diagrama de Blocos do Circuito de Comando.

6.2.1.- Oscilador de Frequência.-

O oscilador de frequência é constituído por um circuito tendo como base um oscilador à cristal, dois resistores, um capacitor, e portas "NAND" (CI 4011), conseguindo-se alta precisão (Figura 6.2).

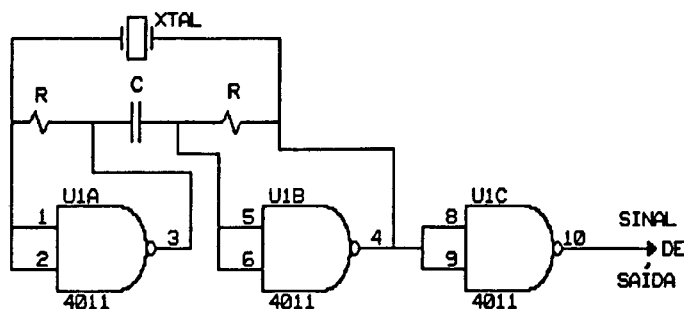


Figura 6.2.- Circuito Oscilador

Cálculo dos valores de R e C.

$$f_{osc} = \frac{1}{RC} \quad (6.1)$$

Adota-se $R = 100 \text{ K}$

$$C = \frac{1}{R f_{osc}} = \frac{1}{100 \times 10^3 \times 1,2 \times 10^6} = 820 \text{ nf}$$

6.2.2.- Divisor de Frequência.-

A frequência do oscilação do cristal é de 1,2 MHz. Para se obter uma frequência de 60 Hz (frequência de chaveamento dos interruptores), usou-se quatro contadores decimais (4 x CI 4017) e um contador binário (CI 4040). (Figura 6.3).

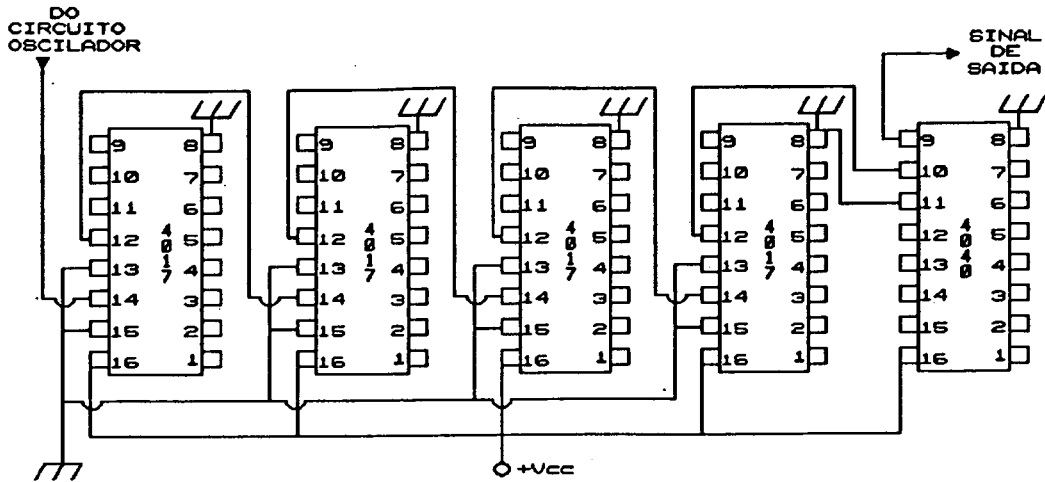


Figura 6.3.- Circuito Divisor de Frequência. (4017 -Contadores Decimais e 4040 -Contador binário).

6.2.3.- Circuito "Driver".

Como circuito "driver" foi utilizado o CI TCA-780 da Icotron, para gerar os pulsos de comando. O CI TCA-780, é usado para baixas frequências. Além de ter as saídas principais nos pinos 14 e 15 que estão desfasados cada uma meio período ($T/2$), tem outras saídas com sinais lógicos que podem ser usados.

Para o comando dos interruptores principais são usados os sinais lógicos do pinos 14 e 15, e para o comando dos interruptores auxiliares é usado o sinal lógico do pino 7 que é complementar aos sinais dos pino 14 e 15 (Figura 6.4).

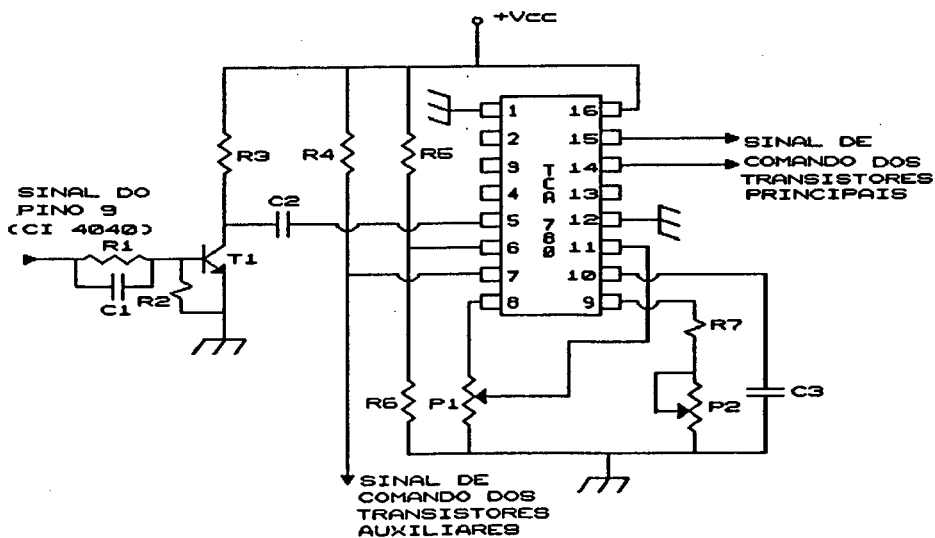


Figura 6.4.- Circuito Para Gerar os Pulsos de Comando.

6.2.4.- Circuito de Comando dos Interruptores Principais.

Nesta estrutura como interruptores principais foram utilizados transistores bipolares em configuração darlington.

A partir dos sinais lógicos gerados nos pinos 14 e 15 do circuito "driver", foi necessário introduzir um tempo morto, para o qual foi utilizado um circuito monoastável (CI 4528) e uma porta "AND" (CI 4081), através dos quais são atacadas as bases dos transistores principais. Na Figura 6.5 é mostrado o circuito de comando de um dos transistores principais. Para o segundo transistor bipolar é utilizado um circuito idêntico.

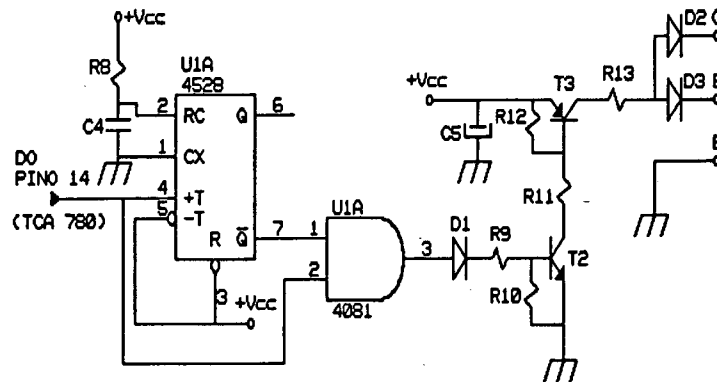


Figura 6.5.- Comando de Base dos Interruptores Principais.

6.2.5.- Circuito de Comando dos Interruptores Auxiliares.

Como interruptores auxiliares foram utilizados MOSFET's.

O comando dos MOSFET's é feito a partir do sinal lógico do pino 7 e tem que ser isolado, razão pela qual é usado transformador de pulso. O sinal de baixa frequência (pino 7) é modulado com um sinal de alta frequência (do circuito oscilador) através de portas "NOR" (CI 4001). O circuito é mostrado na Figura 6.6.

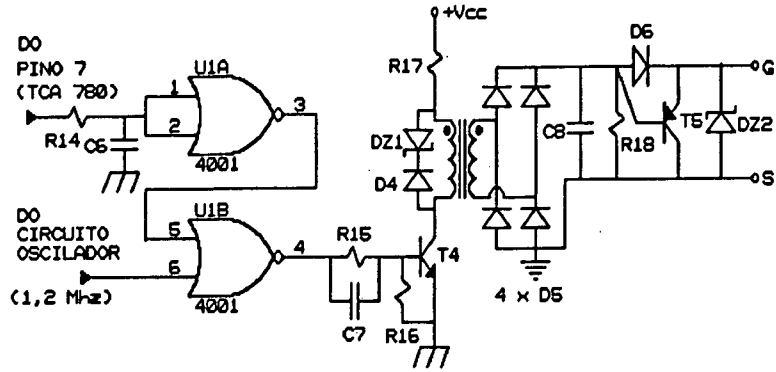


Figura 6.6.- Comando dos Transistores Auxiliares.

6.2.6.- Circuito Completo do Comando.-

Na Figura 6.7 é mostrado o circuito de comando completo utilizado para a primeira estrutura.

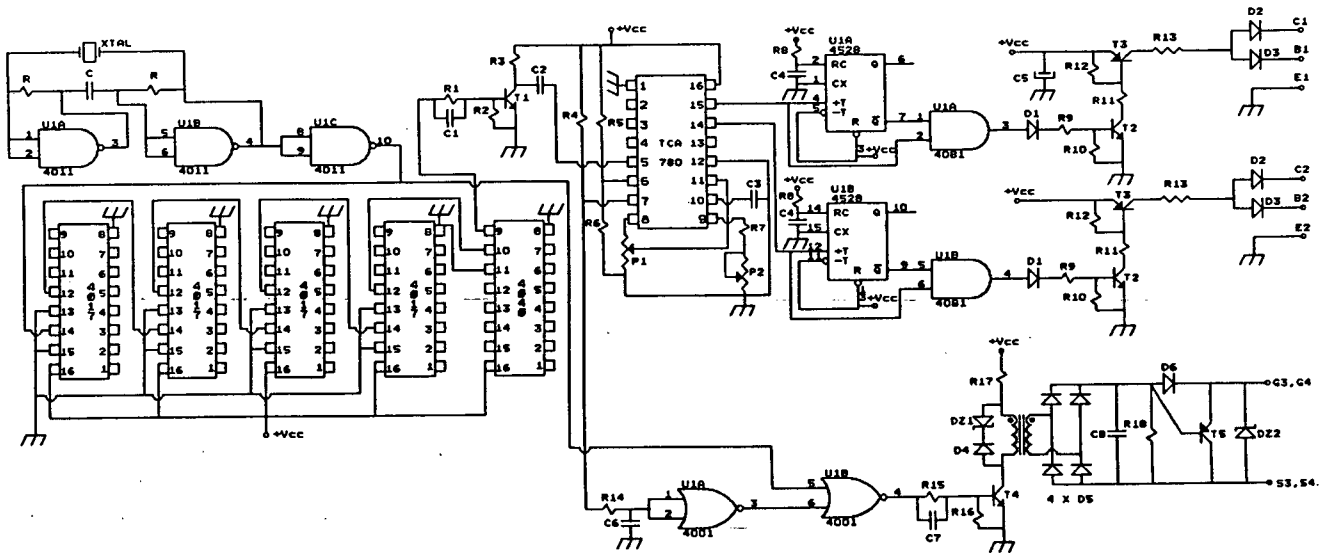


Figura 6.7.- Circuito de Comando Completo.

RELAÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO DE COMANDO

Capacitores:

C	820 nf	C5	1000 μF	(eletrolítico 16 V)
C1	680 pf	C6	3,3 nf	

C2	22 nf	C7	680 pf
C3	68 nf	C8	680 pf
C4	2,2 nf		

Todos os capacitores são cerâmicos, com exceção de C5.

Resistores:

<i>R</i>	100	K Ω	<i>R10</i>	100	Ω	
<i>R1</i>	120	Ω	<i>R11</i>	270	Ω	
<i>R2</i>	56	Ω	<i>R12</i>	330	Ω	
<i>R3</i>	270	Ω	<i>R13</i>	33	Ω	5W
<i>R4</i>	15	K Ω	<i>R14</i>	1	Ω	
<i>R5</i>	10	K Ω	<i>R15</i>	120	Ω	
<i>R6</i>	27	K Ω	<i>R16</i>	56	Ω	
<i>R7</i>	10	K Ω	<i>R17</i>	22	Ω	
<i>R8</i>	39	K Ω	<i>R18</i>	470	K Ω	
<i>R9</i>	1	K Ω	<i>R19</i>	330	Ω	

A tolerância dos resistores é igual à $\pm 10\%$. Todos os resistores são de potência igual à 1/8 W, com exceção de R13.

Potenciômetros:

<i>P1</i>	0-10	K Ω	<i>P2</i>	0-100	K Ω
-----------	------	------------	-----------	-------	------------

Diodos:

D1	1N4007	D4	1N4148
D2	4F1/06	D5	1N4148
D3	1N4004	D6	1N4148

Diodos Zener:

DZ1	Diodo zener	15 V	1/2 W
DZ2	Diodo zener	15 V	1/2 W

Transistores de sinal:

T1	BD 139	T4	BD 139
T2	TIP 31C	T5	BC 308
T3	TIP 32C		

Tensão de alimentação do circuito de comando:

$$+V_{cc} = + 12 \text{ V}$$

O terra do circuito de comando é referenciado ao terra do barramento CC.

6.2.7.- Circuito de Potência

Na Figura 6.8 é mostrado o circuito de potência implementado no laboratório, onde se pode observar o circuito limitador de sobretensão usado. Como interruptores principais foram usados transistores bipolares em configuração darlington e para os interruptores auxiliares foram usados MOSFET's.

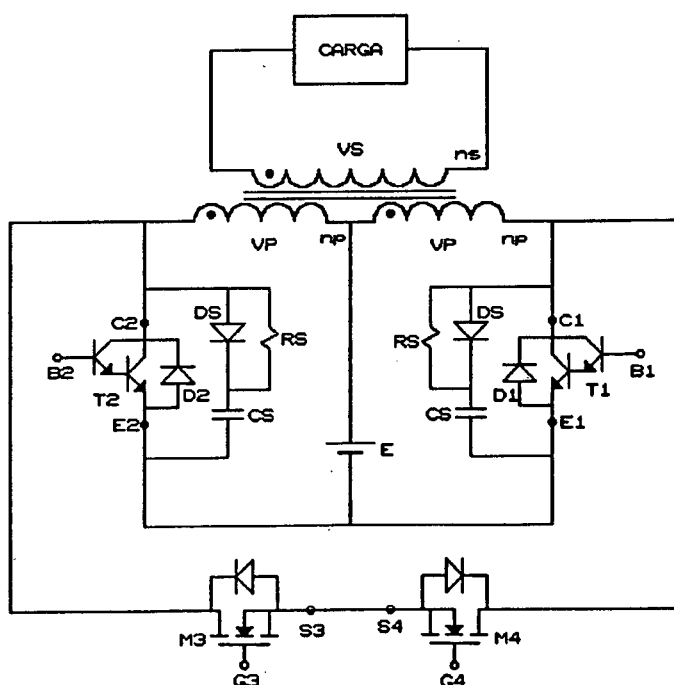


Figura 6.8.- Circuito de Potência.

COMPONENTES DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

T1,T2 BUY 69A	M3,M4 IRF250
D1,D2 4F2/06	Ds SK4F/08
Rs 68 Ω	Cs 2 μF

$$E = 48 \pm 20 \% V$$

$$V_s = 110 V \text{ (Eficaz)}$$

Os valores de Rs, Ds e Cs foram calculados no capítulo 4 e finalmente ajustados em bancada.

6.3.- RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO PROTÓTIPO DA PRIMEIRA ESTRUTURA.-

Serão apresentados os resultados obtidos com o protótipo de laboratório para:

- Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva.
- Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva.

6.3.1.- Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva.-

Este modo de funcionamento foi testado e se constata que seu desempenho é igual ao do conversor push-pull à dois níveis.

Na Figura 6.9 são mostradas as principais formas de onda.

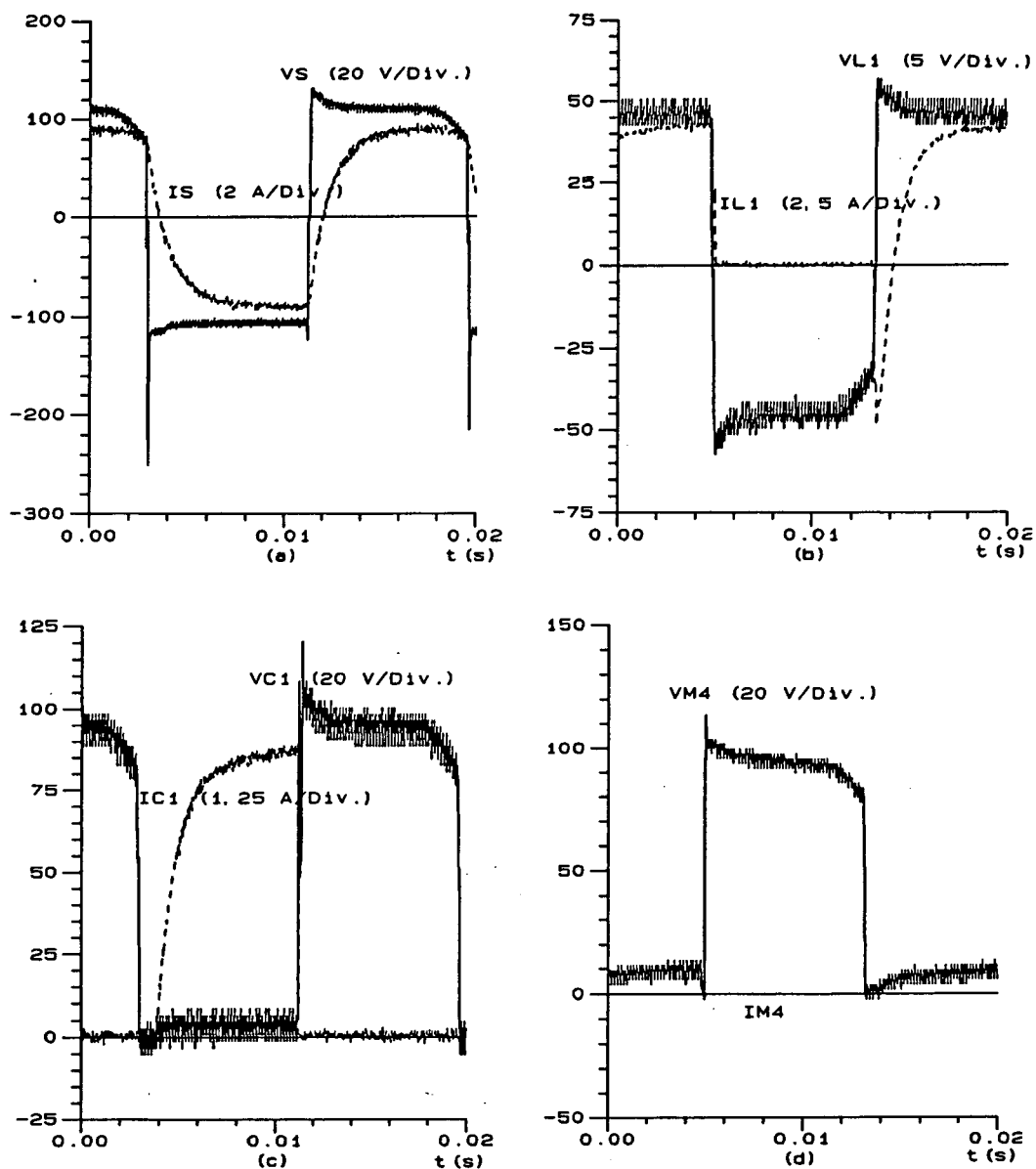


Figura 6.9.- Principais Formas de Onda Obtidas Experimentalmente. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente no transistor T_1 , d) Tensão e Corrente no MOSFET M_4 .

6.3.2.- Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva.-

Este modo de funcionamento foi testado, onde se constata que o terceiro nível permite impor uma tensão fixa na carga.

Na Figura 6.10 são mostradas as principais formas de onda.

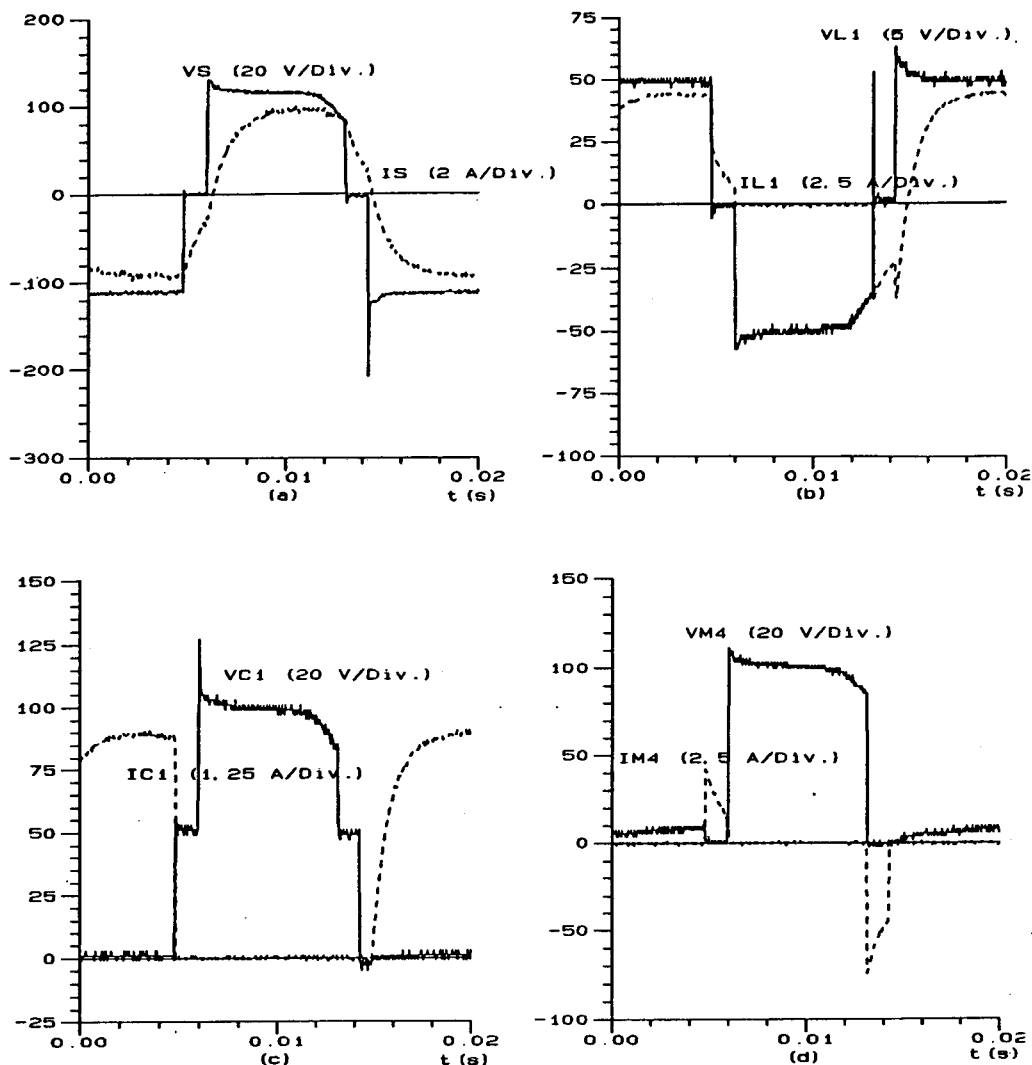


Figura 6.10.- Principais Formas de Onda Obtidas Experimentalmente. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente no transistor T₁, d) Tensão e Corrente no MOSFET M₄

Dos resultados experimentais obtidos pode-se observar que no momento da comutação, a sobretensão é limitada à valores toleráveis pelos interruptores, através do circuito limitador implementado, como é mostrado no circuito de potência.

6.4.- CIRCUITO DE COMANDO DA SEGUNDA ESTRUTURA.

O circuito de comando da segunda estrutura é realizado a partir de sinais lógicos gerados por um oscilador à cristal (1,2MHz). Como a frequência de chaveamento dos interruptores é de 60Hz, é usado um circuito divisor de frequência até alcançar a frequência desejada (60 Hz). O diagrama de blocos é mostrado na

Figura 6.11.

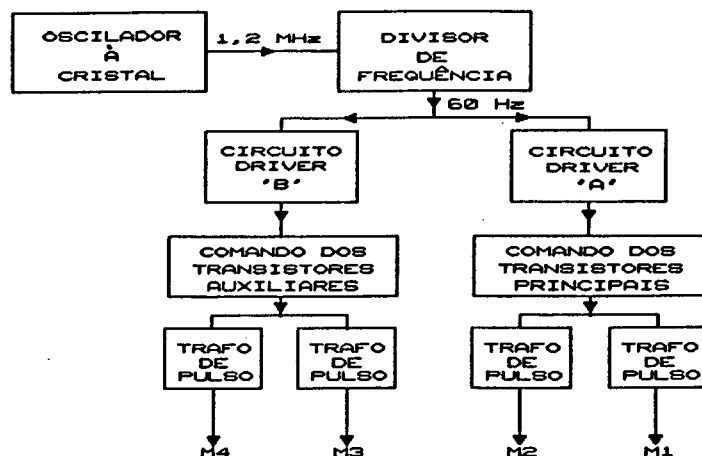


Figura 6.11.- Diagrama de Blocos do Circuito de Comando.

6.4.1.- Oscilador de Frequência.-

Usou-se o mesmo oscilador de frequência apresentado no item 6.2.1.

6.4.2.- Divisor de Frequência.-

Usou-se o mesmo divisor de frequência apresentado no item 6.2.2.

6.4.3.- Circuito "Driver".

Para gerar os pulsos de comando, neste caso foram utilizados dois CI TCA-780. Isto porque os interruptores auxiliares, independente da carga e da tensão de entrada, sempre conduzem meio período. Foi utilizado um CI TCA-780 ("Driver" 'A') com os sinais lógicos dos pinos 2 e 4, para o comando dos interruptores principais, e um CI TCA-780 ("Driver" 'B') com os sinais lógicos dos pinos 14 e 15, para o comando dos interruptores auxiliares (Figura 6.12).

6.4.5- Circuito de Comando dos Interruptores Auxiliares.-

A partir dos sinais gerados nos pinos 14 e 15 do "driver" 'B', para acionar os interruptores auxiliares, foi criado um tempo morto com um monoestável (CI-4528) e uma porta "AND" (CI-4081). Aqui também o sinal de comando (pino 2 ou pino 4) é modulado com um sinal de alta frequência gerada pelo oscilador, através de uma porta "AND" (CI-4081). O circuito de comando do interruptor auxiliar é mostrado na Figura 6.14, para o outro interruptor é utilizado um circuito idêntico.

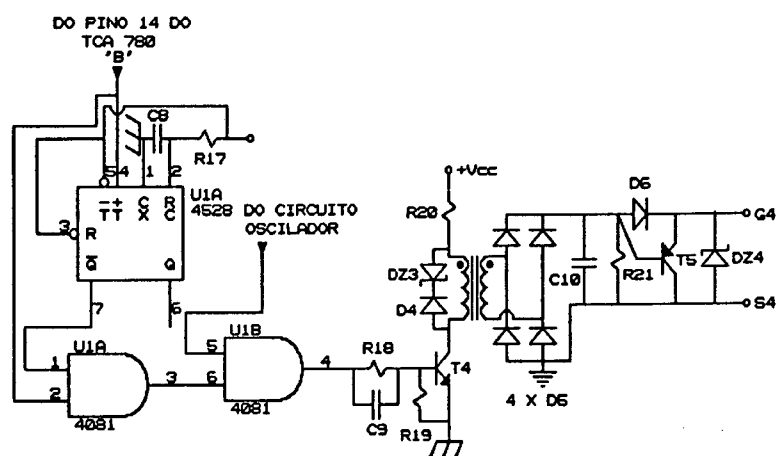


Figura 6.14.- Comando dos Interruptores Auxiliares.

6.4.6.- Circuito Completo do Comando.-

Na Figura 6.15 é mostrado o circuito de comando completo utilizado para a segunda estrutura.

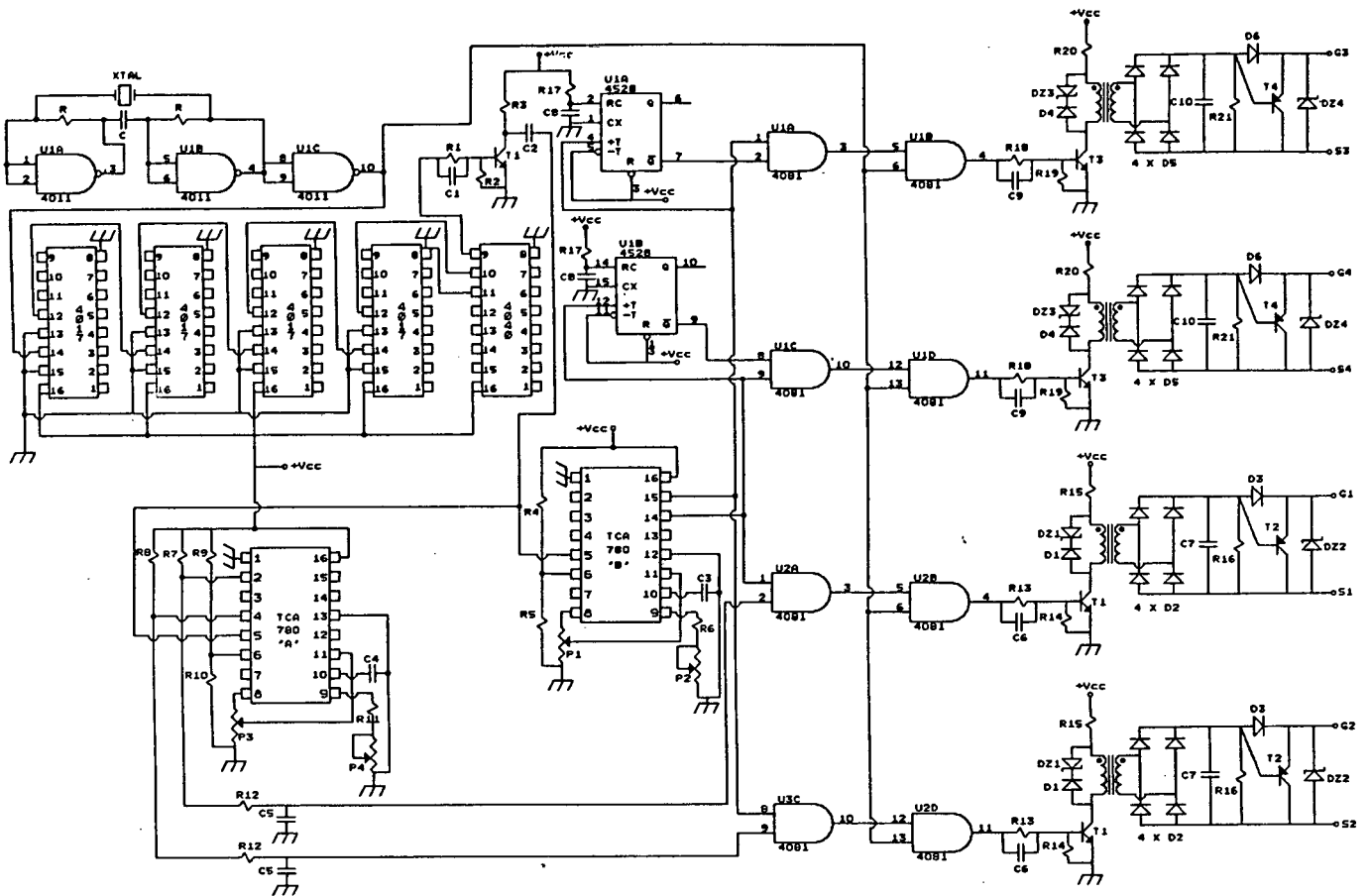


Figura 6.15.- Circuito de Comando Completo.

RELAÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO DE COMANDO

Capacitores:

C	820 nf	C6	680 pf
C1	680 pf	C7	680 pf
C2	15 nf	C8	2,2 nf
C3	68 nf	C9	680 pf
C4	68 nf	C10	680 pf
C5	330 pf		

Todos os capacitores são cerâmicos.

Resistores:

<i>R</i>	100 K Ω	<i>R11</i>	100 K Ω
<i>R1</i>	120 Ω	<i>R12</i>	47 K Ω
<i>R2</i>	56 Ω	<i>R13</i>	390 Ω
<i>R3</i>	330 Ω	<i>R14</i>	68 Ω
<i>R4</i>	10 K Ω	<i>R15</i>	82 Ω
<i>R5</i>	27 K Ω	<i>R16</i>	470 K Ω
<i>R6</i>	100 K Ω	<i>R17</i>	47 K Ω
<i>R7</i>	15 K Ω	<i>R18</i>	390 Ω
<i>R8</i>	15 K Ω	<i>R19</i>	68 Ω
<i>R9</i>	10 K Ω	<i>R20</i>	82 Ω
<i>R10</i>	27 K Ω	<i>R21</i>	470 K Ω

A tolerância dos resistores é igual à $\pm 10\%$. Todos os resistores são de 1/8 W de potência.

Potenciômetros:

<i>P1</i>	0-10 K Ω	<i>P3</i>	0-10 K Ω
<i>P2</i>	0-100 K Ω	<i>P4</i>	0-100 K Ω

Diodos:

<i>D1</i>	1N4148	<i>D4</i>	1N4148
<i>D2</i>	1N4148	<i>D5</i>	1N4148
<i>D3</i>	1N4148	<i>D6</i>	1N4148

Diodos Zener:

<i>DZ1</i>	Diodo zener 15 V	<i>DZ2</i>	Diodo zener 15 V
<i>DZ2</i>	Diodo zener 15 V	<i>DZ4</i>	Diodo zener 15 V

Todos os diodos Zener são de 1/2 W.

Transistores de sinal:

T1	BD 139	T4	BD 139
T2	BD 139	T5	BC 308
T3	BC 308		

Tensão de alimentação do circuito de comando:

$$+V_{cc} = + 12 \text{ V}$$

O terra do circuito de comando é referenciado ao terra do barramento CC.

6.4.7.- Circuito de Potência.-

O circuito mostrado na Figura 6.16 é o circuito de potência da segunda estrutura implementada em laboratório. Todos os interruptores usados são MOSFET's.

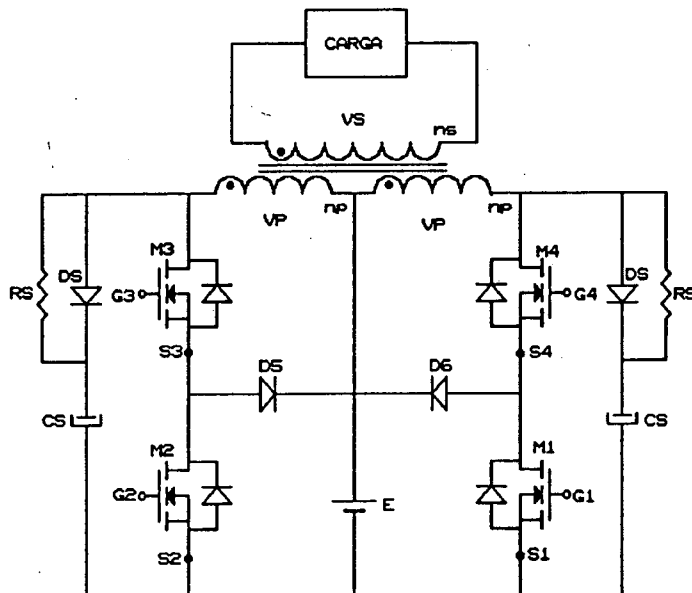


Figura 6.16.- Circuito de Potência da Segunda Estrutura.

COMPONENTES DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

M1,M2,M3,M4 IRF250

D5,D6 MUR1530

Ds 4F2/06

Rs 10 $K\Omega$

Cs 10 μF 250 V (eletrolítico)

$E = 48 \pm 20 \% V$

$V_s = 110 V$ (Eficaz)

Os valores de DS, RS e Cs foram calculados no capítulo 4 e finalmente ajustados em bancada.

6.5.- RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO PROTÓTIPO DA SEGUNDA ESTRUTURA.-

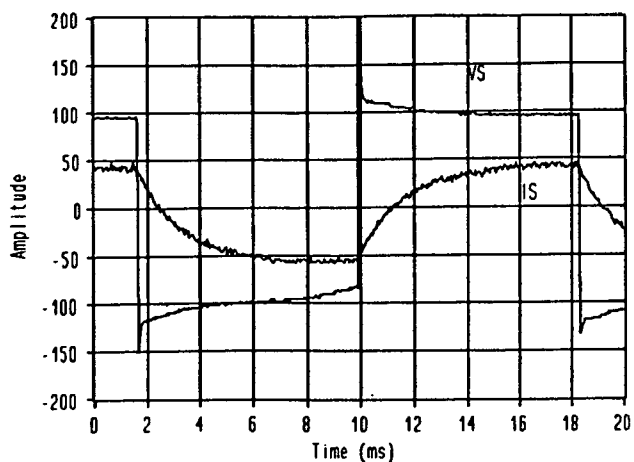
Serão apresentados os resultados obtidos com o protótipo de laboratório para:

- Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva.
- Tensão de Entrada Máxima e Carga Indutiva.

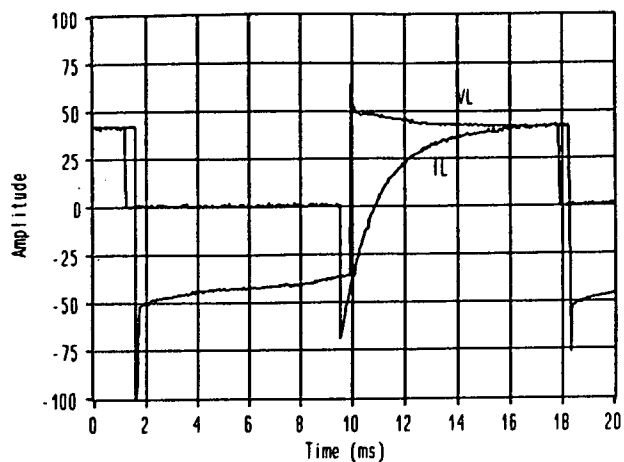
6.5.1.- Tensão de Entrada Mínima e Carga Indutiva.-

Neste modo de funcionamento os interruptores principais e auxiliares conduzem meio período e se constata que seu desempenho é igual ao do conversor push-pull à dois níveis.

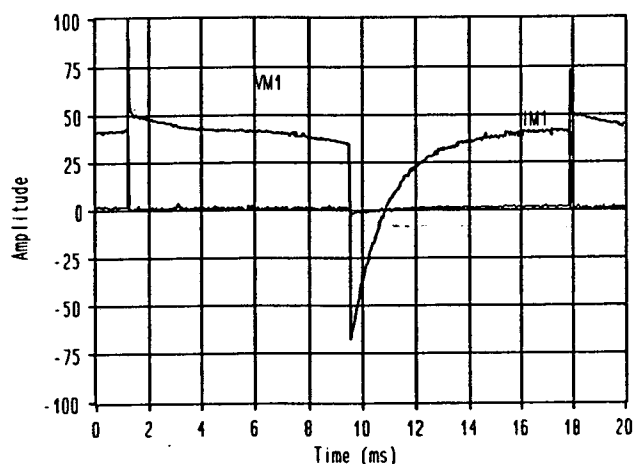
Na Figura 6.17 são mostradas as principais formas de onda.



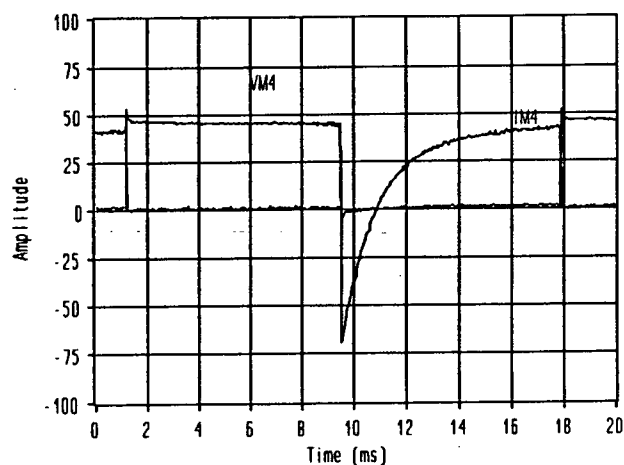
a) VS 50 V/D., IS 10 A/D.



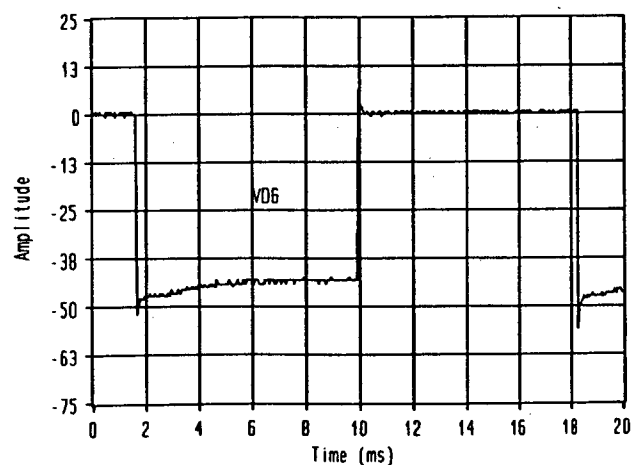
b) VL 25 V/D., IL 12,5 A/D.



c) VM1 25 V/D., IM1 12,5 A/D.



d) VM4 25 V/D., IM4 12,5 A/D.

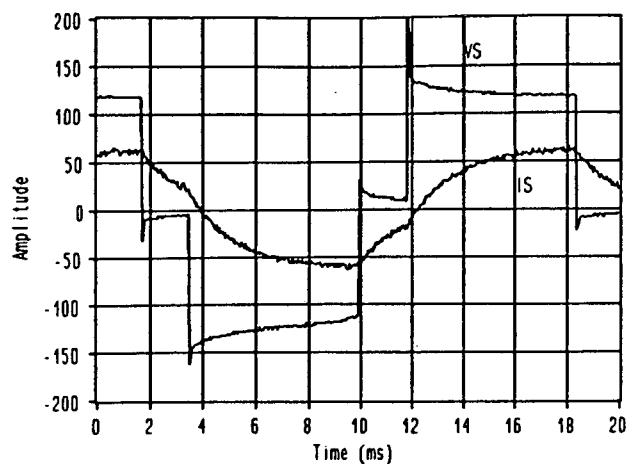


e) VD6 13 V/D.

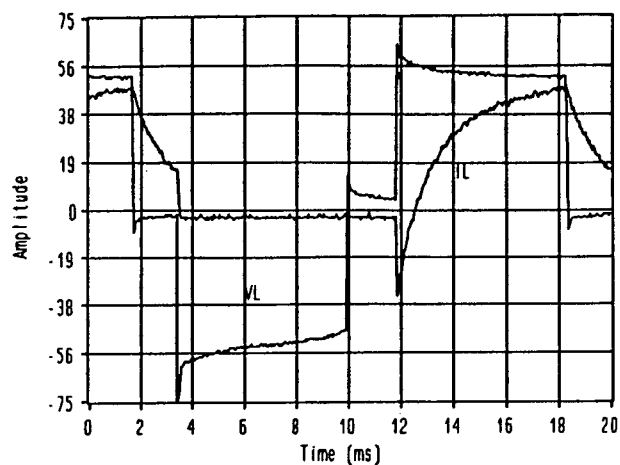
Figura 6.17.- Principais Formas de Onda Obtidas Experimentalmente. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no primário do transformador, c) Tensão e Corrente no MOSFET M_1 , d) Tensão e Corrente no MOSFET M_4 , e) Tensão e Corrente no Diodo D_6 .

6.5.2.- Tensão de Entrada Máxima e carga Indutiva.-

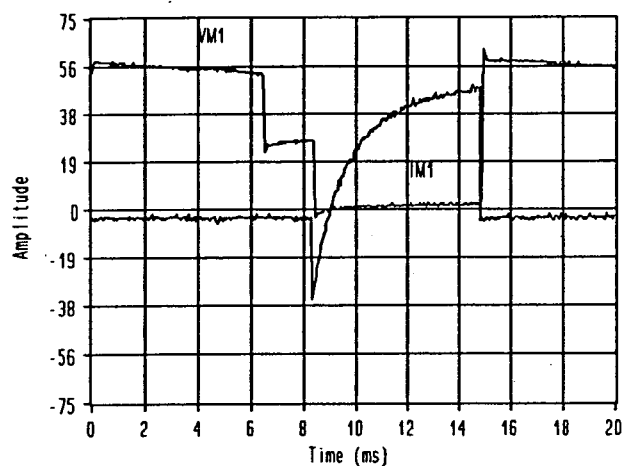
Na Figura 6.18 são mostradas as principais formas de onda.



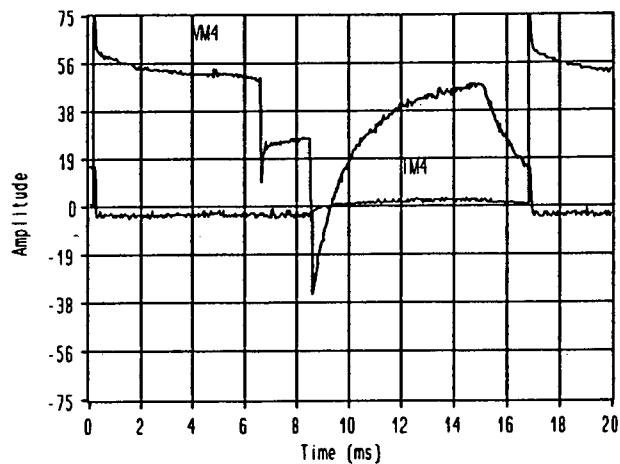
a) VS 50 V/D., IS 10 A/D.



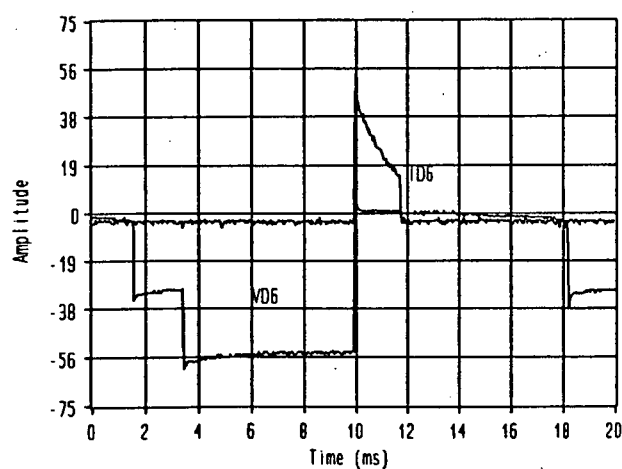
b) VL 19 V/D., IL 10 A/D.



c) VM1 19 V/D., IM1 10 A/D.



d) VM4 19 V/D., IM4 10 A/D.



e) VD6 19 V/D., ID6 10 A/D.

Figura 6.18.- Principais Formas de Onda Obtidas Experimentalmente. a) Tensão e Corrente na Carga, b) Tensão e Corrente no Primário do Transformador, c) Tensão e Corrente no MOSFET M_1 , d) Tensão e Corrente no MOSFET M_4 , e) Tensão e Corrente no Diodo D_6 .

Neste modo de funcionamento os interruptores auxiliares, independente da tensão de entrada e da carga, sempre conduzem meio período. Os

interruptores principais conduzem o tempo necessário para garantir tensão constante na saída, onde se constata que o terceiro nível permite impor uma tensão fixa na carga.

Dos resultados experimentais obtidos pode-se observar que no momento da comutação, a sobretensão é limitada à valores toleráveis pelos interruptores, através do circuito limitador implementado, como é mostrado no circuito de potência.

6.6.-CONCLUSÕES.

Foram apresentados os circuitos de comando implementados para cada uma das estruturas e os resultados experimentais obtidos pelos protótipos implementados em laboratório. É mostrada a forma de onda da tensão na carga variando desde uma onda quadrada a uma forma de onda à três níveis, que é o princípio de funcionamento das estruturas, garantindo na saída uma tensão constante.

A tensão nos interruptores na primeira estrutura é igual ao dobro da tensão de entrada e na segunda estrutura é igual à tensão de entrada.

Pode-se observar que a sobretensão causada pela indutância de dispersão do transformador é limitada à valores toleráveis pelos interruptores, através dos circuitos limitadores implementados.

CONCLUSÕES GERAIS

No presente trabalho mostrou-se que com o conversor push-pull modulado por pulso único, não é possível garantir na saída uma tensão constante independente da carga e compensar variações da fonte de entrada.

Como solução ao problema do conversor push-pull modulado por pulso único, utilizou-se o terceiro nível de tensão (nível zero na carga). É através do terceiro nível que se garante na saída uma tensão constante e o controle da energia a ser transferida para a carga. Com o terceiro nível também é possível compensar as variações da fonte de entrada.

Para se obter na saída uma forma de onda à três níveis foram apresentadas duas novas estruturas inversoras monofásicas, que são geradas a partir do conversor push-pull. A primeira estrutura, para criar o terceiro nível, acrescenta quatro interruptores (dois transistores e dois diodos), e a segunda estrutura acrescenta seis interruptores (dois transistores e quatro diodos).

Com os estudos teóricos, simulações efetuadas para as novas estruturas e os resultados experimentais obtidos pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A máxima tensão nos interruptores na primeira estrutura é igual ao dobro da tensão de entrada.

- A máxima tensão nos interruptores na segunda estrutura é igual à tensão de entrada. Este conversor pode ser usado como conversor CC-CA para altas potências e altas frequências, e também como conversor CC-CC, obtendo-se uma considerável diminuição da corrente nos interruptores.

- Durante a transferência de energia, a primeira estrutura só tem um interruptor conduzindo. Na segunda estrutura se tem dois interruptores conduzindo que para o caso de baixa tensão de alimentação, as quedas de tensão nos interruptores diminuem a tensão aplicada no primário. Isto faz com que a relação de transformação seja maior, e a corrente nos interruptores também será maior. Além disto, os interruptores auxiliares da segunda estrutura, tem que suportar correntes médias e eficazes maiores.

O princípio de funcionamento de cada estrutura foi testado para carga indutiva através de um protótipo de 1 KVA de potência, realizado em laboratório. Os resultados experimentais permitiram validar os estudos teóricos e efetuados por simulação.

Comprovou-se também a eficácia dos circuitos grampeadores da sobretensão gerada pelas indutâncias de dispersão do transformador. Observa-se que estas indutâncias poderiam ser bastante reduzidas com um bom projeto e cuidados na confecção do transformador.

Como continuidade, sugere-se para futuros trabalhos:

- Realizar o controle em malha fechada.
- Estudar a modulação por largura de pulso à três níveis para a segunda estrutura, de forma a se obter uma forma de onda senoidal na saída.
- Realizar o estudo da segunda estrutura para altas potências e altas frequências como conversor CC-CA e CC-CC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEDFORD, B.D. & HOFT, R.G. - "Principles of Inverter Circuits" John Wiley & Sons Inc., New York, 1966.
- [2] KASSAKIAN, J.C.; SCHLECHT, M.F.; VERGHESE, G.C. - "Principles of Power Electronics" Addison, Wesley 1991.
- [3] BARBI, I. - "Eletrônica de Potência II", Publicação Interna, UFSC, 1990.
- [4] E.N.S.E.E.I.H.T. - "Hacheurs et Onduleurs Autonomes" Toulouse - França 1978.
- [5] FLORERO, H.J. - "Inversor Monofásico Com Modulação PWM otimizada à Três Níveis" Dissertação de Mestrado, UFSC, 1989.
- [6] SOSA PAES DE LIMA, H.E. - "Princípio e implementação de um Conversor CC-CA Com Estágio Série-Ressonante Modulado por deslocamento de Fase em Alta Frequência" Dissertação de Mestrado, UFSC, 1990.
- [7] SOUZA, A.F.; MARTINS, D.C.; - "Manual de Utilização do Programa SCVOLT-Simulação de Conversores Estáticos, Método do Voltímetro" , Publicação Interna, UFSC, 1990.
- [8] HECTOR, J. - "DSN, Un Logiciel de Manipulation de Courbes", Manual de Referência do Programa DSN" Versão Autorizada, INPT, França, 1992.
- [9] MOTOROLA INTEGRATED CIRCUITS - "Cmos Databook" , 1978.
- [10] MOTOROLA SEMICONDUCTORS - "Rectifiers and Zeners, Diodes Data Book", 1988.
- [10] ICOTRON-SIEMENS, - TCA - 780 Data Sheets.
- [11] IBRAPE "Transistores-Dados e Curvas Para Projetos" 1974.