

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FONTE REGULADA DE BAIXA TENSÃO
PARA CORRENTES ELEVADAS

SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA

ORIENTADOR:

PROF. EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

1985

FONTE REGULADA DE BAIXA TENSÃO PARA CORRENTES
ELEVADAS

POR

SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA

TESE DE MESTRADO

APRESENTADA A COORDENAÇÃO SETORIAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DA PRÓ-REITORIA PARA ASSUNTOS DO INTERIOR DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA, EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

210P
CAMPINA GRANDE - DEZEMBRO DE 1985



S586f Silva, Simplicio Arnaud da.
Fonte regulada de baixa tensão para correntes elevadas /
Simplicio Arnaud da Silva. - Campina Grande, 1985.
115 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1985.
"Orientação : Prof. Edison Roberto Cabral da Silva".
Referências.

1. Fontes de Energia. 2. Correntes Elétricas. 3. Baixa
Tensão - Fonte Reguladora. 4. Dissertação - Engenharia
Elétrica. I. Silva, Edison Roberto Cabral da. II.
Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III.
Título

CDU 620.91(043)

FONTE REGULADA DE BAIXA TENSÃO
PARA CORRENTES ELEVADAS

SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/03/86

Edison Roberto Cabral da Silva
EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA
Orientador

Telmo Silva de Araújo
TELMO SILVA DE ARAÚJO
Componente da Banca

Evandro Fechine Alencar
EVANDRO FECHINE ALENCAR
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MARÇO - 1986

AGRADECIMENTOS

. Ao Professor EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA, pela sua orientação, que foi de suma importância na elaboração deste trabalho;

. Ao Professor TELMO SILVA DE ARAÚJO, pela ajuda na correção final do texto;

. Ao CNPq - CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA, pelo financiamento parcial da montagem realizada;

. Finalmente, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

DEDICATORIA

Aos meus pais: João Arnaud da
Silva e Maria
das N. Arnaud;

À minha esposa: Verônica Lacerda
Arnaud;

As minhas filhas: Dêbora e Karen

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, construção e a análise experimental de uma fonte de tensão contínua regulada de baixa tensão para correntes elevadas, alimentada por uma tensão alternada variável. A fonte foi projetada com características adequadas a produção de hidrogênio, a partir da eletrólise da água utilizando energia elétrica obtida através de um aerogerador. É feito, também, um estudo comparativo das várias possibilidades de realização de uma tal fonte, examinando as diferentes técnicas de regulação, que podem ser utilizadas, e de possíveis conexões dos semicondutores e dos enrolamentos no primário e secundário do transformador. A regulação da tensão de saída da fonte é obtida a partir da mudança de derivações no primário do transformador de retificação. Para a conversão em corrente contínua, utilizou-se um retificador hexafásico de meia onda.

ABSTRACT

It is described the design, manufacturing and experimental analysis of a regulated DC power source with secondary low voltage and high currents, feed by a variable AC voltage. The power source is intended for use in a hydrogen production plant by electrolysis of water using wind energy. It is also made a comparative study of several possible configuration of on voltage source by examining the diferent techniques of voltage regulation that could be used and the possible conection of semicondutors and windings on the primary an on the secondary of the transformer. The DC output voltage is regulated by changing the taps of the primary winding. A half-wave hexafase rectifier was used to obtain the AC/DC conversion.

SUMÁRIO

CAPITULO I

INTRODUÇÃO	1
1.1 - Aproveitamento da Energia Solar	2
1.2 - Apresentação do Trabalho	3

CAPITULO II

AEROGERADORES E ELETROLISADORES	5
INTRODUÇÃO	5
2.1 - Energia Eólica, Aerogeradores: Considerações	5
2.2 - Eletrólise	7
2.2.1 - Potencial de decomposição	8
2.2.2 - Sobretensão	10
2.2.3 - Eletrolisador	11
2.3 - Características do Sistema	12
2.3.1 - Características do aerogerador	13
2.3.2 - Características da célula	13
2.3.3 - Características da fonte	14

CAPITULO III

ESCOLHA DO PRINCIPIO DE OPERAÇÃO DA FONTE	18
INTRODUÇÃO	18
3.1 - Considerações sobre a Estrutura Retificadora no Secundário	21
3.1.1 - Retificador dupla estrela com bobina intermediária	24
3.1.2 - Retificador hexafásico com transfor mador a fluxos livres	27

3.2 - Técnicas de Regulação no Primário	29
3.2.1 - Controle de fase	33
3.2.1.1 - Controle a SCRS ou TRIACS	33
3.2.1.2 - Controle a SCR/Diodo	42
3.2.2 - Controle misto	43
3.2.2.1 - Circuito básico	43
3.2.2.2 - Circuito modificado	53
3.2.3 - Controle por derivação múltipla	54
3.2.3.1 - Derivação a contato mecâni co	55
3.2.3.2 - Derivação aditiva ou sub- trativa	58
3.2.3.3 - Derivação seletiva	61
3.3 - Possibilidades de Conexão no Primário	62
3.3.1 - Hexafásico de meia onda	65
3.3.1.1 - Primário em estrela	65
3.3.1.2 - Primário em triângulo	65
3.3.2 - Hexafásico com bobina de absorção...	67
3.3.2.1 - Primário em estrela	67
3.3.2.2 - Primário em triângulo	70
3.3.3 - Considerações sobre a análise	70
3.4 - Comparação Entre as Diversas Possibilidades	73

CAPITULO IV

A FONTE REGULADA	79
INTRODUÇÃO	79
4.1 - Circuito de Comando	82
4.1.1 - Sincronizador de pulsos	85

4.1.1.1 - Sensor de corrente	85
4.1.1.2 - Detector do zero de corrente	86
4.1.2 - Detector de Pico	89
4.1.3 - Comparador	91
4.1.4 - Distribuidor de pulsos	92
4.1.4.1 - Contador de pulsos	92
4.1.4.2 - Decodificador	93
4.1.5 - Monoestáveis de inibição	93
4.1.6 - Gerador de trem de pulsos	96
4.1.7 - Estágio de potência	96
4.1.8 - Circuito geral e diagrama no tempo do circuito de comando	96
CAPITULO V	
RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CONCLUSÕES	101
5.1 - Funcionamento em Transitório	105
CONCLUSÃO	105
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A - TRANSFORMADOR	111
APÊNDICE B - CIRCUITO DE COMANDO	114

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

A crise de energia que afeta o mundo atualmente, tem trazido a luz tanto para o público em geral, como para os cientistas, a importância geopolítica devido a focalização de matérias primas, em especial de combustíveis, no mundo. Outro fato importante que tem recebido atenção nos últimos anos, são os danos ocasionados pela poluição, devido ao uso crescente de combustíveis fósseis.

A reação do hidrogênio com o oxigênio, um dos elementos mais abundantes sobre o globo terrestre, resulta na liberação de energia. Um dos aspectos da química do hidrogênio é a sua combinação isotérmica com o oxigênio para formar água.

Se considerarmos que praticamente todos os países têm água em abundância, e que a combustão do hidrogênio não produz efeitos nocivos sobre o meio ambiente, não é surpreendente que a comunidade científica tenha começado a considerar o hidrogênio um combustível com possibilidade de utilização futura. Admite-se que o hidrogênio no futuro poderá ser utilizado em fábricas e mesmo em veículos automotores, uma vez resolvido os problemas do armazenamento.

Entre os usos previstos como mais imediatos e que provavelmente aumentarão de forma notável a demanda de hidrogênio, é a fabricação de amônia usada como fertilizante e a liquefa

ção e gaseificação de carbono para produzir hidro-carbonetos sintéticos.

A idéia de se obter hidrogênio a partir da água e sua utilização como combustível produzindo água, é conceitualmente simples, porém, deve-se lembrar que a decomposição da água requer um consumo de energia.

1.1 - Aproveitamento da Energia Solar

Na maioria dos casos, as diferentes fontes de energia são oriundas do sol.

1.1.1 - Energia eólica - ar em movimento devido a manifestação da energia solar;

1.1.2 - Energia hidráulica - resultado de um processo que começa com a evaporação das águas provocada pelo sol;

1.1.3 - Combustíveis renováveis - álcool, madeira, óleos vegetais etc, recebem a energia do sol através da fotossíntese;

1.1.4 - Energia fóssil - carvão mineral, petróleo, gás natural etc, onde a fotossíntese desempenha um papel importante.

O diagrama de blocos da figura 1.1, mostra as diversas fontes de energia com as opções de utilização da energia solar.

1.2 - Apresentação do Trabalho

Existem vários métodos para a obtenção do hidrogênio da água. Desses, a eletrólise é presentemente o método de geração mais prático.

Os eletrolisadores para este processo necessitam de tensão contínua e sobretudo regulável, para uma melhor eficiência da célula.

Com este trabalho, propõe-se a realização de uma fonte regulada específica onde a energia é fornecida por um gerador acionado por uma turbina eólica, portanto, com tensão e frequência variáveis.

No capítulo II são apresentados alguns conceitos de energia eólica e do princípio da eletrólise, inclusive as características do aerogerador e da célula a serem utilizados.

No capítulo III são analisadas diversas possibilidades de realização dessa fonte, e em seguida é apresentada a montagem escolhida. Nele serão analisadas também as várias ligações possíveis no primário e secundário do transformador e finalmente escolhida as configurações utilizadas na realização da fonte.

No capítulo IV é apresentada a montagem realizada detalhadamente, inclusive, o circuito de controle.

Os resultados das medições são apresentados no capítulo V. Neste capítulo são feito também comentários a respeito do desempenho da fonte.

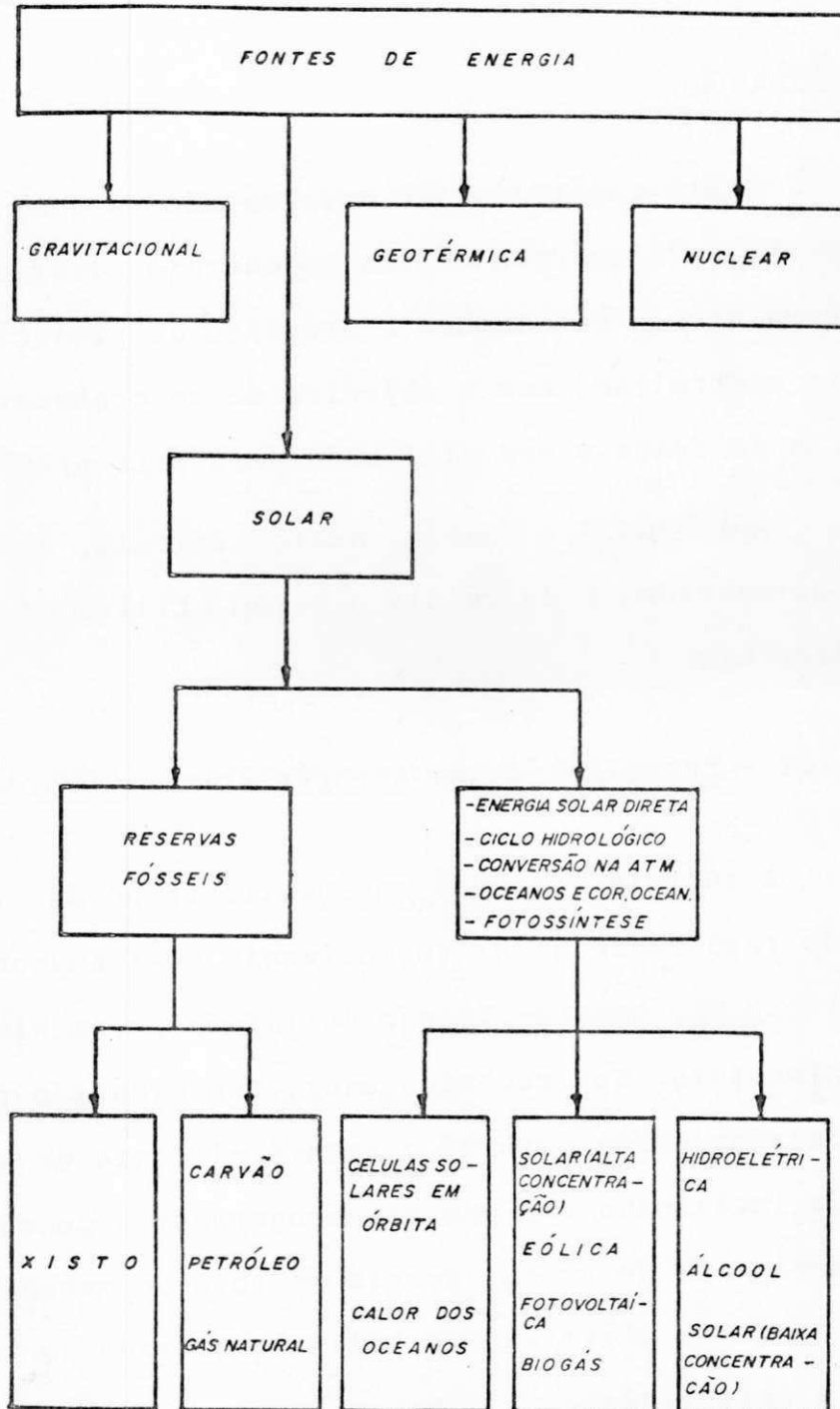


Fig - 11 - DIAGRAMA DE BLOCOS DAS FONTES DE ENERGIA

CAPITULO II

AEROGERADORES E ELETROLISADORES

INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos de conversão de energia eólica em energia elétrica através de aerogeradores, como também o processo de produção de hidrogênio pela eletrólise, com o objetivo de se conhecer as características da fonte a ser utilizada para este processo.

Apresenta-se também, neste capítulo, as características do aerogerador e da célula a serem utilizados na produção de hidrogênio.

2.1 - Energia Eólica, Aerogeradores: Considerações

A energia eólica é uma manifestação da energia solar, sendo resultante de ar em movimento continuamente regenerado, devido a uma pequena fração de insolação em níveis superiores da atmosfera. Nos recentes anos, tem crescido o interesse na utilização desta natural e renovável fonte de energia. Por causa da facilidade com que os aerogeradores convertem a energia do movimento do ar em energia de rotação mecânica, a conversão na forma elétrica tem sido considerada uma das mais práticas e apropriadas.

A potência do vento é expressa em função de sua velocidade e da área varrida [1].

$$P_v = 0.624 v^3 A \quad (2.1)$$

Para uma dada velocidade do vento, existe uma ótima velocidade do rotor em que a potência máxima é gerada. A velocidade do rotor é função do tipo de turbina como mostra a figura 2.1.

A potência extraída da turbina é dada por:

$$P_t = 0.624 v^3 A C_p \quad (2.2)$$

onde C_p é o coeficiente de potência.

As turbinas horizontais têm seus coeficientes de potência variando entre 0,415 e 0,475, enquanto que as verticais variam entre 0,15 e 0,35, dependendo das características aerodinâmicas de cada uma.

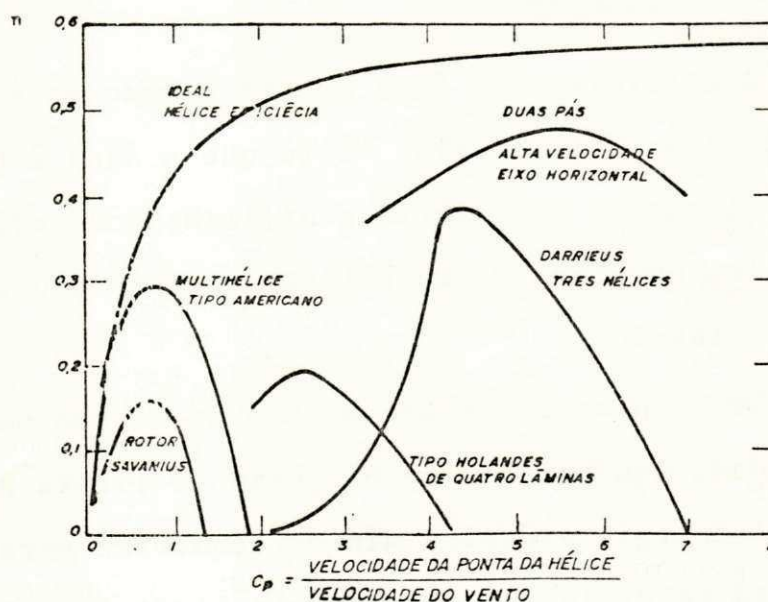


Fig. - 2.1 - EFICIÊNCIA X COEFICIENTE DE POTENCIA PARA VÁRIOS TIPOS DE TURBINAS [1]

Com vistas a uma visualização das partes das turbinas, a tabela 2.1 é apresentada, para potências maiores considerando um $C_p = 0,35$ [1].

TABELA 2.1

v (m/s) \ P_t (kw)	5	7,5	10	12,5	15
1	6,8	3,7	2,4	1,7	1,3
10	21,5	11,7	7,6	5,4	4,1
100	68,0	37,0	24,0	17,0	13,0
1000	++	++	75,9	53,8	41,1

DIÂMETROS EM METROS

Levantamento efetuado pelo Núcleo de Meteorologia de Campina Grande (PB), apresenta, em média, uma energia da ordem de 112 Kwh/ano - m^2 para aquela cidade [2].

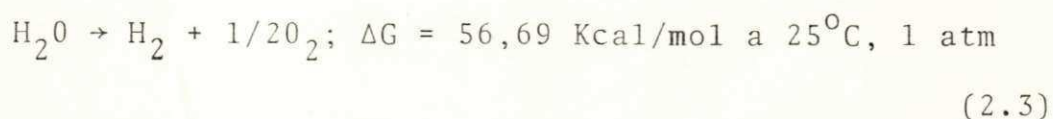
2.2 - Eletrólise

A eletrólise da água ocorre quando se passa uma corrente elétrica através dela. Visto que a água é um isolante elétrico, torna-se necessário a utilização de eletrólitos para torná-la condutor; o eletrólito geralmente usado é o hidróxido de potássio.

Neste processo o hidrogênio se libera no cátodo e uma quantidade equivalente de oxigênio se libera no anodo.

A energia elétrica mínima requerida para decompor a água está determinada pela energia livre de GIBBS [3] de decom

posição, que é igual e inversa a energia livre de formação da água a partir dos elementos:



A energia elétrica correspondente é dada por:

$$nFE = \Delta G$$

onde:

n = número de elétrons trocado na reação

F = constante de Faraday

E = tensão reversível (valor mínimo da tensão aplicada, a partir da qual é iniciada a decomposição).

2.2.1 - Potencial de decomposição

Praticamente não há passagem de corrente elétrica enquanto não for atingido um determinado valor da FEM aplicada, correspondente a tensão de decomposição. Acima da tensão de decomposição, a corrente aumenta rapidamente, como indicado na figura 2.2 [4].

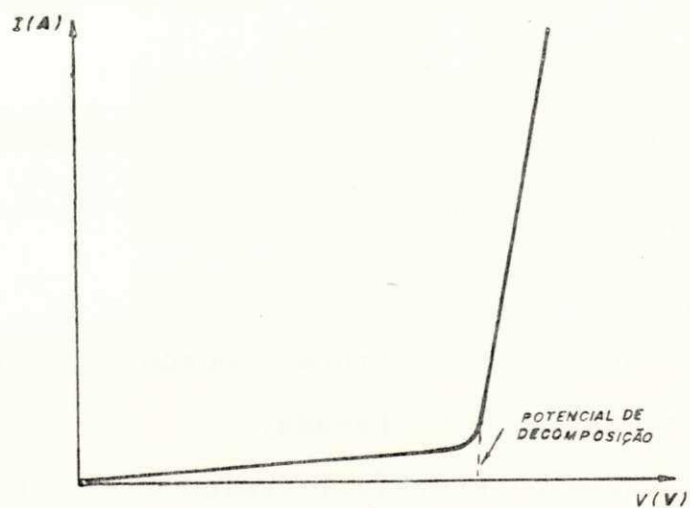


Fig. 2.2 - CORRENTE X TENSÃO NA CÉLULA [4]

TABELA 2.2
 POTENCIAIS DE DECOMPOSIÇÃO DE ALGUMAS SOLUÇÕES
 NORMAIS ENTRE ELETRODOS POLIDOS DE PLATINA

Eletrólito	Potencial da célula (V)	Eletrólito	Potencial da célula (V)
ZnSO ₄	2,55	NiCl ₂	1,85
CdSO ₄	2,03	ZnBr	1,80
CoSO ₄	1,92	Cocze	1,78
HNO ₃	1,69	Pb(NO ₃) ₂	1,52
H ₃ PO ₄	1,70	CuSO ₄	1,49
HCl	1,31	AgNO ₃	0,7
NiSO ₄	2,09	HBr	0,94
Cd(NO ₃) ₂	1,98	HI	0,52
CdCl ₂	1,88	NaOH	1,69
H ₂ SO ₄	1,67	KOH	1,67

2.2.2 - Sobretensão

A tensão necessária para decompor a solução de um eletrólito é, geralmente, superior ao valor da tensão reversível. A tensão adicional acima da tensão reversível da solução constitui a chamada sobretensão.

A sobretensão entre cátodo e anodo são função das seguintes variáveis:

- . da natureza e estado físico empregado nos eletrodos;
- . do estado físico da substância depositada;
- . da densidade da corrente elétrica utilizada no processo;
- . da variação de concentração e do gradiente de concentração.

A figura 2.3 apresenta um diagrama de densidade de corrente versus sobretensão para uma solução hidróxido de potássio com vários tipos de eletrodos.

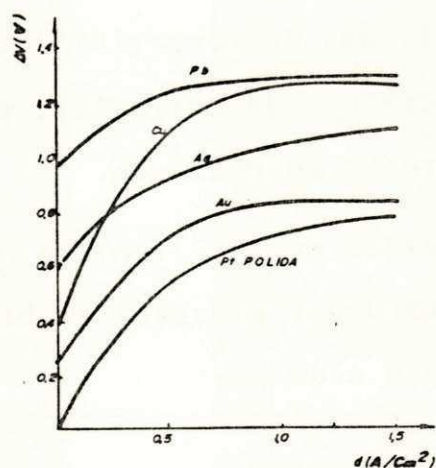


Fig. 2.3 — SOBRETENSÃO X DENSIDADE DE CORRENTE [4]

2.2.3 - Eletrolisador [5]

O eletrólito normalmente usado é uma solução de hidróxido de potássio de baixo teor de cloretos, e uma concentração de 25 a 28% em peso na qual se consegue a máxima condutividade.

Não havendo troca de calor com as vizinhanças, as leis da termodinâmica mostram que a tensão reversível diminui com o aumento da temperatura, tomando valores de 1,23 a 1,16 V a 25°C e 80°C respectivamente, a pressão atmosférica. Para haver equilíbrio térmico é necessário que se trabalhe a tensões maiores, da ordem de 1,48 volts a 25°C e 1,46 volts a 40°C.

O valor da tensão na célula, em condições reais de equilíbrio térmico, deve ser maior do que o valor da tensão nas condições de reversibilidade para que a decomposição se inicie.

A eficiência do eletrolisador é, geralmente, definida como a relação entre o consumo da energia necessária para produzir 1 Nm³ de hidrogênio caso a operação se realizasse nas condições ideais (condições de reversibilidade e equilíbrio térmico a 100% de eficiência de corrente), e o consumo de energia nas condições reais de operação.

O consumo de energia por Nm³ (volume do gás nas condições normais de temperatura e pressão) de hidrogênio em condições reais de operação é dado por:

$$W_{op} = \frac{(\text{tensão na célula})}{0,418 \times (\text{eficiência da corrente})} \text{ KW-h/Nm}^3 \quad (5)$$

(2.4)

A eficiência do eletrolisador é:

$$\eta = \frac{W_{rev}}{W_{op}} = \frac{V_{rev}}{V_{op}} \times 100/Ni \quad (2.5)$$

onde a eficiência de corrente Ni é a produção volumétrica de hidrogênio, por ampère-hora, em relação a fornecida pelo equivalente de Faraday próximo de 100%, variando de 96% a 99%, dependendo do projeto do eletrolisador. Portanto, quanto mais a tensão de operação se aproxima da tensão de decomposição, maior é a eficiência do eletrolisador.

2.3 - Características da fonte regulada

A fonte proposta tem por finalidade converter uma tensão alternada variável, em tensão contínua regulada entre níveis pré-determinados. A figura 2.4 mostra um sistema em que a regulação é utilizada na produção de hidrogênio por meio de uma célula eletrolítica, e a fonte sendo alimentada por um aerogerador.

Nesse caso, a regulação deve ser feita atendendo aos limites de variação de tensão contínua sobre a célula e a tensão alternada produzida pelo aerogerador.

Seja um aerogerador do tipo três hélices da ELEKTRO com uma relação de velocidade igual a quatro (velocidade do rotor sobre a velocidade da turbina).

O aerogerador é provido de um regulador mecânico, no sentido de minimizar as variações de velocidades no rotor da máquina. Com isso, a tensão e a frequência de saída do mesmo, são ajustadas para a faixa de variação desejada, com os limites superiores em torno de 110 V e 60 Hz.

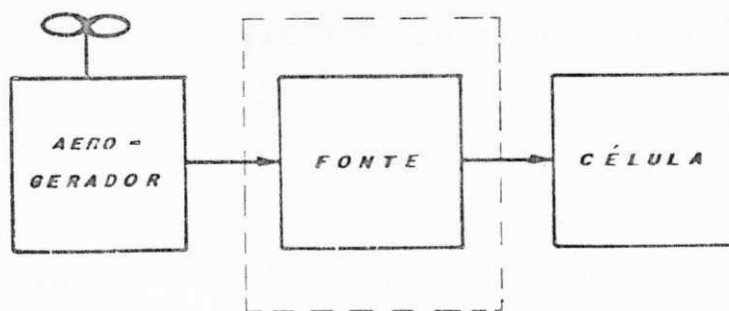


Fig. 2.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA

Os dados desse aerogerador são os seguintes:

Potência: 8 KVA

Tensão: 80 a 110 VCA

Frequência: 45 a 60 Hz
 Número de polos: 06
 Relação de velocidade (velocidade do rotor/velocidade da turbina): 04

Seja também uma célula unipolar típica (tipo tanque), como a indicada na figura 2.5, o cátodo (eletrodo negativo) é de aço e em sua superfície é produzido hidrogênio, enquanto que o anodo (eletrodo positivo) é de aço carbono revestido por niquelação especial e em sua superfície é produzido oxigênio [6]. Ela é composta, na realidade, por uma associação de células, de menor capacidade em paralelo, sendo possível a utilização parcial da mesma.

Condições de operação:

Temperatura: 70°C
 Solução de hidróxido de potássio: 28 a 30% em peso
 Tensão: 2,1 VCC*
 Corrente máxima: 4.000 ACC
 Densidade de corrente: $13,6 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$
 Produção de hidrogênio: $1,67 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{h}$
 Energia elétrica consumida: 5 kWh para Nm^3 de H_2

(*) - Uma tensão maior do que 2,1 VCC compromete o rendimento da célula. Os eletrolisadores industriais, na maior parte, operam na faixa de 1,7 a 2,1 V [5], sendo o limite inferior (1,7 V) corresponde ao valor mínimo da tensão nos terminais da célula para a ocorrência da eletrólise.

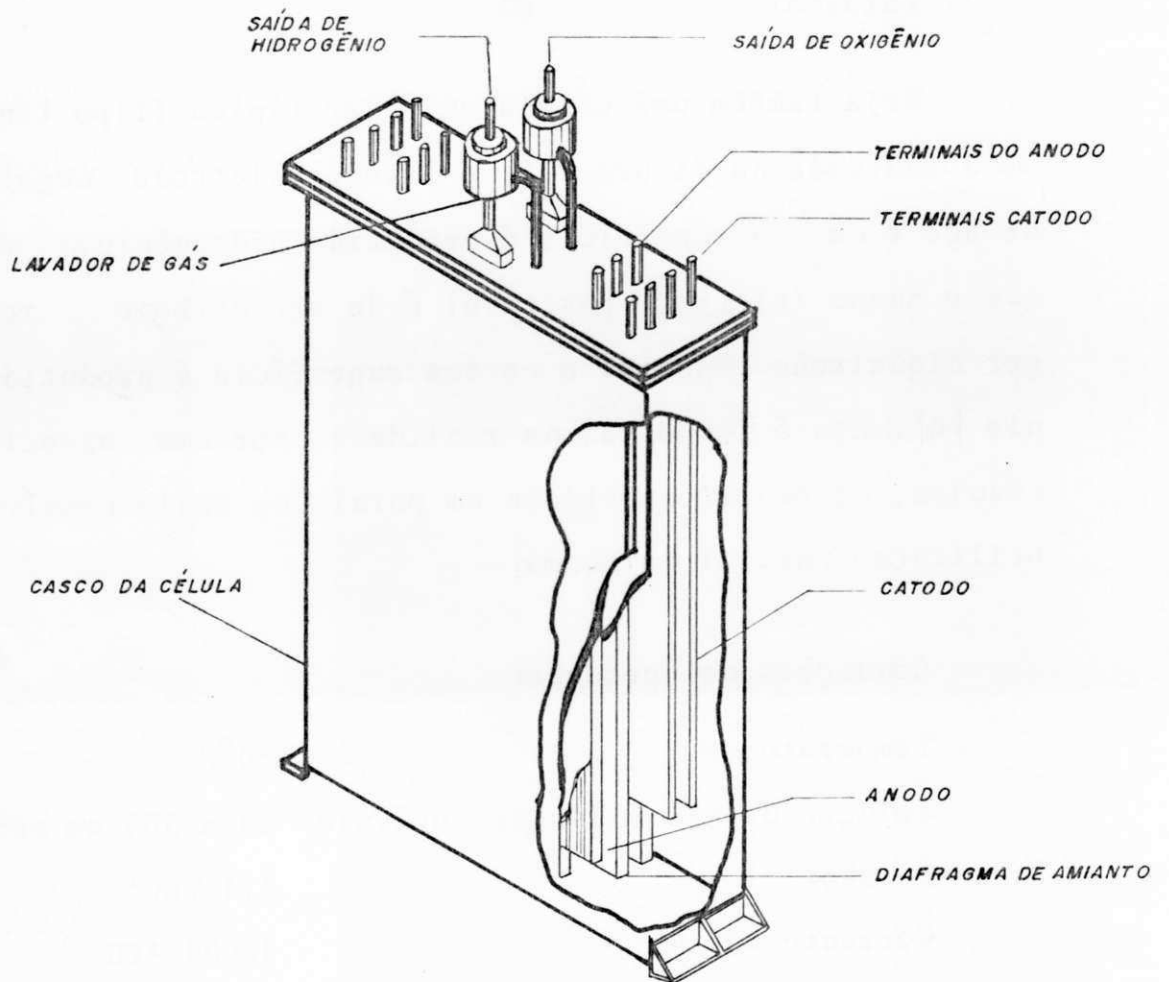


Fig. 2.5 - CÉLULA ELETROLÍTICA
MOD. 4.000 A

Esta célula apresenta uma gama de operação muito grande, podendo operar desde 10% de sua capacidade até a capacidade total em temperaturas de 25 a 70°C, permitindo a sua utilização para uma corrente de 300 A.

As figuras 2.6 e 2.7 apresentam os diagramas de eficiência versus temperatura e eficiência versus densidade de corrente para a mesma célula (curvas típicas fornecidas pelo fabricante) [6].

A fonte desenvolvida foi prevista para trabalhar em um sistema com tais características, ou seja:

Corrente máxima:	300 ACC
Tensão de entrada:	80 a 110 VCA
Tensão média de saída:	2,1 VCC
Frequência de alimentação:	45 a 60 Hz.

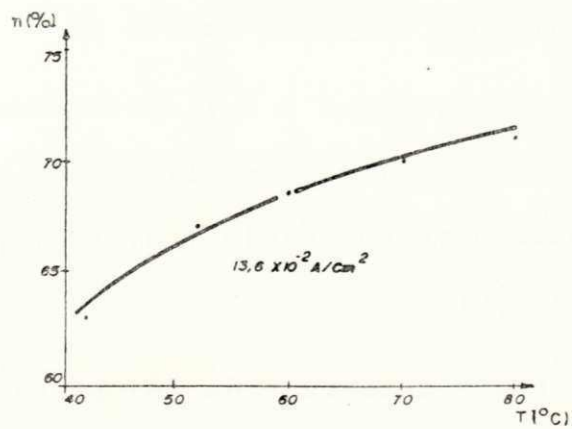


Fig. 2.6 — EFICIÊNCIA X TEMPERATURA PARA UMA DENSIDADE DE CORRENTE DE $13,6 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$

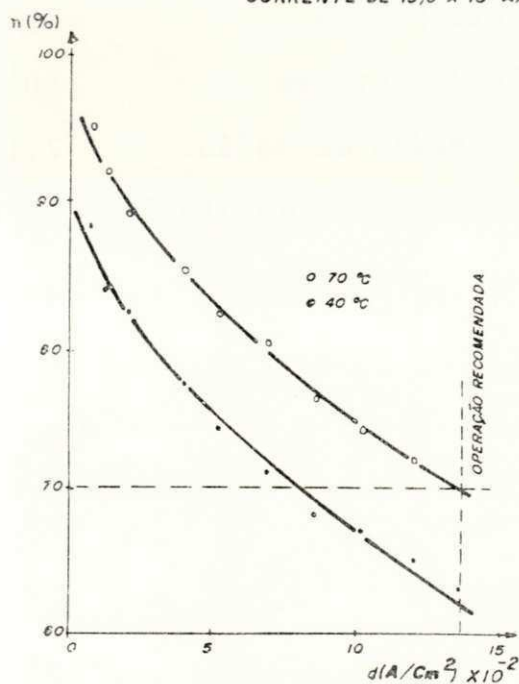


Fig. 2.7 — EFICIÊNCIA X DENSIDADE DE CORRENTE PARA DOIS VALORES DE TEMPERATURA

CAPITULO III

ESCOLHA DO PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DA FONTE

INTRODUÇÃO

A análise a seguir, examina as diferentes possibilidades de realização de uma fonte de baixa tensão CC, regulada, fornecendo correntes elevadas.

As fontes CC, reguladas, de potência são compostas basicamente de um transformador de retificação, de um dispositivo de regulação, podendo ter ou não, dependendo dos princípios utilizados, um retificador. A regulação da tensão CC pode ser feita no primário ou no secundário do transformador.

Alguns pontos devem ser analisados antes da escolha de uma regulação no primário ou secundário do transformador. A regulação no secundário pode ser realizada através de um retificador controlado, com ou sem derivações, ou de um retificador a diodos seguido de um chaveador. A regulação no primário acarreta a utilização de um retificador não controlado no secundário e de um dispositivo de regulação no primário.

1. Tipos de dispositivos

Um nível elevado de correntes no secundário do transformador implica na utilização de diodos ou SCRs no secundário; o controle no primário, permite a utilização de triacs, dependendo da relação de transformação do transformador.

2. Confiabilidade

A taxa de falha em tiristores e diodos é insignificante [7]. Entretanto, a utilização de mais tiristores para um determinado nível de corrente, assim como os periféricos (comando, etc) tornam os diodos mais confiáveis.

3. Rendimento [8]

O rendimento é considerado em termos das perdas nos dispositivos, perdas nas linhas CA e CC, perdas magnéticas e perdas auxiliares.

- perdas nos semicondutores:

Os tiristores possuem maiores perdas que os diodos, uma vez que a queda de tensão é menor nos diodos.

- perdas nas linhas CC e CA:

Necessita-se mais tiristores que diodos para um determinado valor nominal de corrente; assim, as unidades de tiristores são maiores em tamanho, com barras maiores, e conseqüentes perdas, do que no caso de diodos.

- perdas magnéticas:

As perdas no transformador são as mesmas nos dois casos; entretanto, se o controle no primário utilizar equipamento magnético, como regulador e reatores saturáveis, foi mostrado que as perdas magnéticas globais da montagem são maiores.

. perdas auxiliares:

Sistemas de refrigeração aumentam as perdas devido aos barramentos maiores e maiores perdas. O equipamento a tiristores no secundário exige maior sistema de refrigeração e portanto, maiores perdas; abaixo de 75 V na tensão de saída, as perdas são menores nos sistemas de regulação com tiristores no primário e retificador a diodos no secundário, do que nos sistemas com regulação a tiristores no secundário [19].

4. Aspectos Econômicos

Para uma dada corrente o custo básico de um equipamento a tiristores é duas vezes mais caro do que um equipamento a diodos. Além disso, circuitos de amortecimentos necessitam de maior valor e o custo mais elevado de circuitos de disparo aumentam o custo do equipamento a tiristores. Os tiristores no primário são menos onerosos do que aqueles necessários à retificação no secundário. Esta vantagem não é diminuída, senão parcialmente, pelo acréscimo de diodos no secundário [10]. A possibilidade de utilização de triacs no primário, possibilita uma redução dos custos. O custo de um sistema com regulação a tiristores no primário mais retificadores a diodos no secundário é maior do que o custo de um sistema com tiristores no secundário, se a tensão de saída é abaixo de 75V [19].

No caso de correntes elevadas na carga, uma regulação no secundário acarreta um aumento tanto no custo quanto nas

perdas do sistema. Quando o valor da tensão fornecida pelo sistema é baixo, é mais atraente a utilização de diodos no secundário do transformador, devido a menor queda de tensão desses dispositivos. Por essa razão serão consideradas, neste estudo, apenas as técnicas de regulação no primário.

3.1 - Considerações sobre a Estrutura Retificadora no Secundário

A fim de se obter uma tensão contínua, a partir de tensões alternadas no secundário de um transformador, é necessário realizar uma retificação. Quatro princípios podem ser utilizados:

- a) Retificadores de meia onda, onde os enrolamentos são agrupados em estrela (RMO);
- b) Retificadores em ponte com os secundários do transformador em estrela (RPE);
- c) Retificadores em ponte com os secundários do transformador conectados em polígono (RPP);
- d) Retificadores em dupla estrela com reator interfase (RDE).

SÉGUIER [9], em um estudo de comparação geral de retificadores, conclui que são cinco as estruturas retificadoras mais interessantes.

- . Retificador trifásico de meia onda, RM03

- . Retificador trifásico em ponte, secundário em estrela, RPE3
- . Retificador trifásico em ponte, secundário em triângulo, RPP3
- . Retificador hexafásico de meia onda, RM06
- . Retificador enefásico em ponte, secundário em polígono, RPP9.

As características a seguir foram comparadas para as cinco montagens:

- . nos diodos:

a corrente média; a tensão inversa máxima; os valores relativos das quedas indutivas e das correntes (em caso de curto circuito); a sobrecarga (em caso de curto circuito) em função da queda indutiva, relativa a plena carga.

- . no secundário do transformador:

a tensão eficaz; a corrente eficaz; o fator de potência; a intensidade de corrente; a corrente contínua constante, em função da tensão retificada.

- . no primário do transformador:

o fator de potência e, se o primário é conectado em triângulo, o fator de potência da linha.

O exame dessas características e da ondulação, leva às seguintes observações:

- . Das quatro montagens com três ou seis tiristores, as estruturas RPE3 e RPP3 são, de longe, as de melhores características. Somente a necessidade da divisão da corrente de carga em seis diodos e a queda de tensão nesses diodos quando conectados em série, podem limitar a utilização das estruturas.
- . A estrutura RMO3 apresenta um desempenho médio. O desempenho do RMO6 é ruim.
- . As características das montagens RPE3 e RPP3 são absolutamente idênticas.
- . A montagem RPP9, tendo em vista o grande número de diodos que utiliza, é reservado a um domínio de aplicação bem distinto.

Uma fonte de tensão com as características propostas pode ser considerada como uma fonte de tensão de baixo valor (2,0 V) constante, com uma taxa de ondulação pequena (em torno de 4,2%). Retificadores de seis pulsos de saída satisfazem aos limites da taxa de ondulação. A conexão no lado secundário é praticamente imposta. Desde que se retifica uma tensão muito baixa, não se pode tolerar a queda de tensão de dois diodos em série. Para baixos valores da tensão retificada, e,

devido ao fraco desempenho da estrutura RMO6, prefere-se substituir essa montagem por uma montagem em dupla estrela com bobina intermediária. Apesar da queda de tensão de 15% que é produzida no início da característica em carga, quando passa da operação em vazio para o ponto de operação da intensidade crítica, essa montagem em dupla estrela é superior a RMO6, desde que se trabalhe com alguma potência. Essa montagem utiliza diodos com a metade do valor da corrente nominal e divide por dois as perdas nos mesmos. Entretanto, a tensão inversa duplica, necessitando de um transformador de construção mais difícil e de potência mais elevada, de uma bobina de absorção e produzir a variação brusca de tensão já mencionada. Apesar disso, DORMENVAL [10] mostrou que para tensões inferiores a 100V, no caso de baixo valor de potência, e para tensões inferiores a 200V e valores elevados de potência, essa montagem apresenta melhor desempenho até mesmo do que as estruturas RPE3 e RPP3, aspectos esses que serão discutidos mais adiante. Vale a pena ressaltar, contudo, que é possível modificar, se necessário, o funcionamento do RMO6, fazendo-o operar como um retificador dupla estrela, dependendo do circuito magnético do transformador [9]. Essa possibilidade é discutida a seguir, e baseia-se na operação de um transformador a fluxos livres.

Um estudo comparativo desenvolvido por ROMBAUT [9] entre três soluções possíveis, ou seja, transformador a cinco colunas, três transformadores monofásicos ou transformador a três colunas com bobina intermediária, mostrou que a primeira solução é a mais econômica e se adapta melhor que as outras.

Um transformador trifásico-hexafásico, cujas tensões secundárias são retificadas, forneceria, se essas tensões permanecessem senoidais, a condução de um único diodo por vez. Para se obter a condução simultânea de dois diodos, é preciso deformar as tensões alternadas retificadas. A fim de facilitar o entendimento do fenômeno é discutido primeiramente o funcionamento da estrutura em dupla estrela.

3.1.1 - Retificador dupla estrela com bobina intermediária

No caso da estrutura com bobina intermediária, figura 3.1, o primário induz nos enrolamentos secundários, tensões senoidais V_1, V_3, V_5, V_4, V_6 e V_2 . Quando a corrente retificada i_c é desprezível, a tensão que ela induz nos enrolamentos da bobina também o é. Os terminais N'', N e N' são equipotenciais e cada diodo conduz $1/6$ do período das tensões de alimentação.

Quando i_c aumenta, essas correntes, passando ora em um dos semi-enrolamentos, ora no outro, faz com que a bobina tenha seu circuito magnético atravessado por um fluxo alternado e uma tensão alternada apareça em seus terminais. Esta tensão torna as tensões, a serem retificadas, $V'_1, V'_3, V'_5, V'_4, V'_6, V'_2$ diferentes das tensões secundárias. Ela cresce inicialmente com i_c , alargando os intervalos onde duas tensões, uma do sistema V'_1, V'_3, V'_5 e outra do sistema V'_4, V'_6 e V'_2 , são iguais e onde dois diodos conduzem simultaneamente. Quando i_c

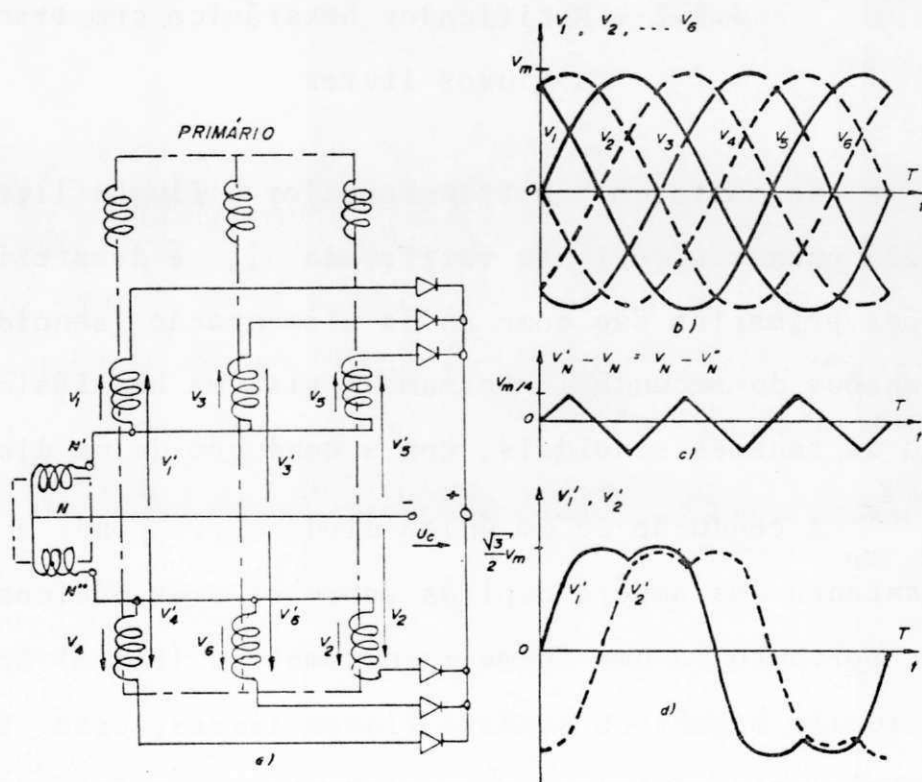


Fig. 3.1 — a) RETIFICADOR HEXAFÁSICO COM BOBINA INTERMEDIARIA
 b) TENSÃO NAS FASES SECUNDÁRIAS
 c) TENSÃO NA BOBINA
 d) TENSORES SECUNDÁRIAS DEFORMADAS

é igual ou superior ao valor crítico (menor valor da corrente de carga, na qual a montagem funciona em regime de dupla estrela), existem sempre dois diodos em condução e as tensões $V'1, V'2 \dots$ têm a mesma forma como está representado na figura.

3.1.2 - Retificador hexafásico com transformador a fluxos livres

Na montagem com transformador a fluxos livres, figura 3.2, quando a corrente retificada i_c é desprezível, as tensões primárias são como as da alimentação (senoidais), e as tensões do secundário formam um sistema hexafásico equilibrado de tensões senoidais, com a condução de um diodo por vez.

A condução de um único diodo corresponde a uma soma instantânea dos ampère-espiras sobre os três núcleos bobinados e, portanto, a uma forma-magnetomotriz (f.m.m) homopolar. O circuito magnético sendo a fluxos livres, essa força-magnetomotriz cria em todos os enrolamentos, uma força eletromotriz (f.e.m) alternada de frequência tripla em relação àquela da rede. Esta (f.e.m) deforma todas as tensões e dá origem a intervalos de duas tensões secundárias iguais, com dois diodos condutores. Quando a corrente i_c cresce, a (f.m.m) homopolar aumenta. Depois, quando ela é suficiente para que haja dois diodos condutores, permanece constante. Na figura, foram traçadas as formas de onda de uma tensão primária em vazio, e da (f.m.m) homopolar ϵ_0 , quando um só diodo conduz, supondo a

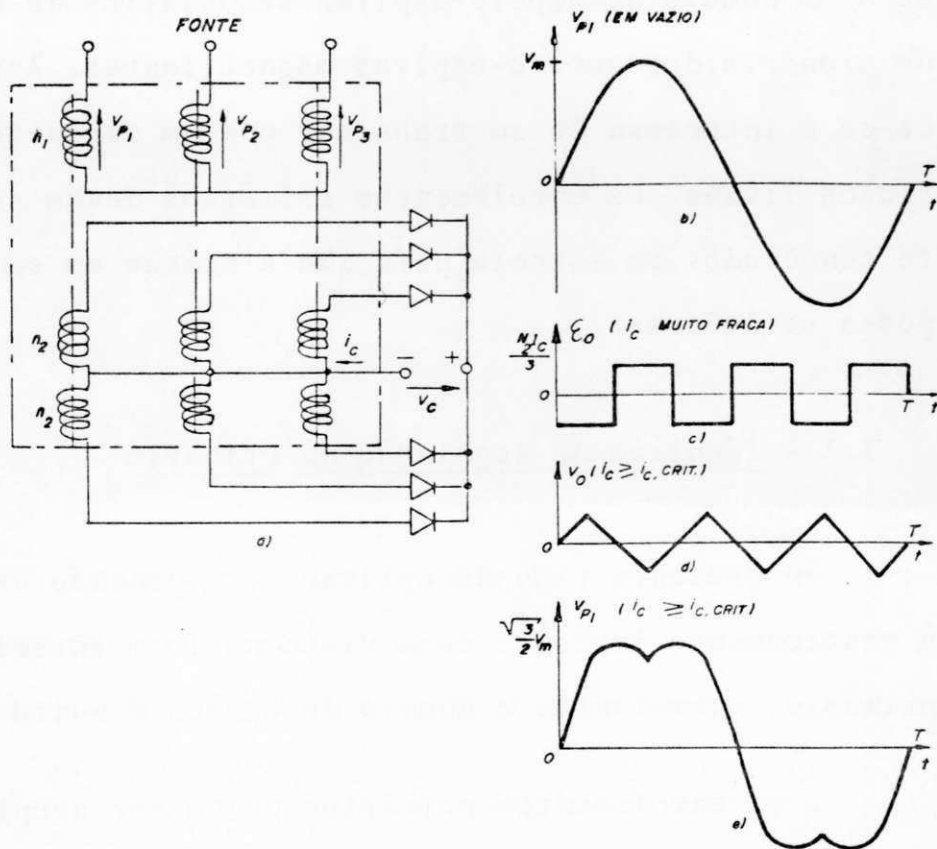


Fig. 3.2 — a) RETIFICADOR HEXAFÁSICO COM TRANSFORMADOR A FLUXOS LIVRES
 b) TENSÃO PRIMÁRIA EM VAZIO
 c) f.m.m. HOMOPOLAR
 d) TENSÃO HOMOPOLAR
 e) TENSÃO PRIMÁRIA DEFORMADA

corrente retificada i_c sem ondulação. Também são apresentadas a forma de onda da tensão homopolar V_o obtida quando i_c é igual ou superior ao valor crítico, e a forma de onda de uma tensão primária. As formas de ondas das tensões secundárias são as mesmas das primárias com amplitudes dependentes da relação de transformação. A intensidade crítica corresponde a um número de ampère-espiras secundários da mesma ordem de grandeza dos ampère-espiras magnetizantes. Assim, verifica-se o interesse de se trabalhar com um circuito magnético a fluxos livres. Os enrolamentos primários devem ser forçosamente conectados em estrela para que a tensão em seus terminais possa se deformar.

3.2 - Técnicas de Regulação no Primário

No presente tipo de aplicação, a conexão no secundário é praticamente imposta, como visto no item anterior. No lado primário, entretanto, o número de opções é muito maior:

- . os enrolamentos primários podem ser acoplados em estrela ou triângulo;
- . pode ser usado um transformador ou um autotransformador;
- . várias técnicas de regulação podem ser utilizadas;
- . o regulador pode ser por contatos, a SCRs, a SCRs e diodos ou a triacs;

. existem várias possibilidades, aplicáveis a quase todas as técnicas de regulação, de conexão dos SCRs ou triacs, se o regulador for em estado sólido.

A fim de possibilitar isolamento entre o sistema de alimentação e o retificador, serão considerados apenas os sistemas que operam com transformador.

- Técnicas de regulação propriamente ditas

Três técnicas de regulação podem ser utilizadas:

1) Controle de fase: a) tiristores (SCRs ou triacs)

b) SCRs e diodos

2) Controle misto (controle de fase/derivação)

3) Controle a derivação múltipla:

. Derivação por contatos (mudança mecânica das derivações)

. Derivação aditiva ou subtrativa

. Derivação seletiva

Essas técnicas são discutidas a seguir, sendo em cada caso, examinados o fator de potência, os harmônicos e a necessidade de indutância de filtragem para manutenção em algumas estruturas da corrente de saída da fonte dentro de limites que permitam valores adequados de tensão.

Nessa discussão, o fator de potência é definido como o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, comumente referenciado como fator de potência de deslocamento. Nas três técnicas mencionadas, o controle de fase pode ser

utilizado ou não. De um modo geral a corrente é defasada em relação à tensão pela reatância de comutação no controle de fase, seja ele realizado pelo disparo de reatores saturáveis ou por tiristores. Além dessa defasagem ocorre uma outra defasagem introduzida pelo ângulo de controle α responsável pela regulação. Portanto, de uma maneira geral, o fator de potência englobando os dois casos, é: [8]

$$FP = 1 - \frac{\Delta E\alpha}{E_0} - \frac{\Delta Ex}{E_0} \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta E\alpha$ = queda de tensão para um ângulo de disparo α

ΔEx = queda de tensão devido a reatância de comutação

E_0 = tensão retificada para um ângulo de disparo nulo.

A componente alternada que entra na curva de tensão contínua pode ser considerada como uma série harmônica. As frequências de espectro nesta série são determinadas pela seguinte igualdade [14]:

$$f_n = K' mf \quad (3.2)$$

onde:

f = frequência de alimentação

m = número de fases secundárias

K' = fator de multiplicação que determina a relação entre o número de ordem do harmônico considerado e o número de fases.

Os valores numéricos das amplitudes podem ser calculadas pelos coeficientes das séries senoidal e cossenoidal cor

Os espectros dos harmônicos que compõem a curva de corrente primária estão relacionados por uma determinada lei com a composição dos harmônicos da curva de tensão contínua. Esta lei se conserva, inclusive, com qualquer número de fases secundárias. Pode-se afirmar [14], que na curva de corrente primária entram somente os harmônicos cuja ordem se diferencia da ordem dos harmônicos da curva de tensão contínua em ± 1 , ou seja:

$$n = Km \pm 1 \quad (3.3)$$

Utilizando-se essa expressão, pode-se calcular os harmônicos que entram na curva de corrente primária para qualquer número de fases, independente do circuito de conversão utilizado. A máxima amplitude do harmônico de ordem n , com respeito à fundamental é $1/n$ ou $(100/n, \text{ em termos percentuais})$, se a reatância de comutação é zero.

O rendimento do retificador se determina pela relação [14]:

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \Delta P} \quad (3.4)$$

sendo que ΔP representa as perdas totais do sistema. Essas perdas são:

- a) perdas nos semicondutores (tiristores e/ou diodos);
- b) perdas no transformador;
- c) perdas na bobina intermediária e na bobina de filtração (onde for o caso);
- d) perdas no circuito de disparo.

Em si, como já foi dito, o regulador pode usar tiristores (SCRs ou triacs), ou auto-transformador com mudança de derivação por contato.

Como todas as técnicas mencionadas, utilizam retificadores adiodos, as diferenças nas perdas aparecem devido a técnica utilizada. Devido ao fato de que na aplicação pretendida, a relação de transformação é grande, as correntes no primário do transformador são pequenas. Portanto, as diferenças passam a existir em função do maior ou menor número de tiristores utilizados. Esse aspecto não será considerado no trabalho.

3.2.1 - Controle de fase

O controle de fase pode ser realizado com tiristores (SCRs ou triacs) [12], ou por um conjunto SCR/diodo [11].

3.2.1.1 - Controle a SCRs ou triacs

O circuito básico é mostrado na figura 3.3. Se adequa-dos pulsos de disparo são aplicados aos tiristores ou triacs, a condução é iniciada. O ângulo de condução depende do ângulo de disparo, medido com relação a tensão de anodo e o ângulo da fase da carga para uma corrente de alimentação senoidal. O valor da tensão retificada pode ser variado de zero, correspondente ao bloqueio total dos tiristores, ao valor máximo correspondente à condução completa.

Se cada tiristor é disparado para um mesmo ângulo com relação às tensões de anodo, a forma de onda da tensão na saída é chamada de "controle de fase".

Fator de Potência e Harmônicos

Se não for considerada a reatância de comutação, o fator de potência é dado pela expressão:

$$FP = 1 - \frac{\Delta E \alpha}{E_0} \quad (3.5)$$

onde:

$$\Delta E \alpha = E_0 (1 - \cos \alpha) \quad (3.6)$$

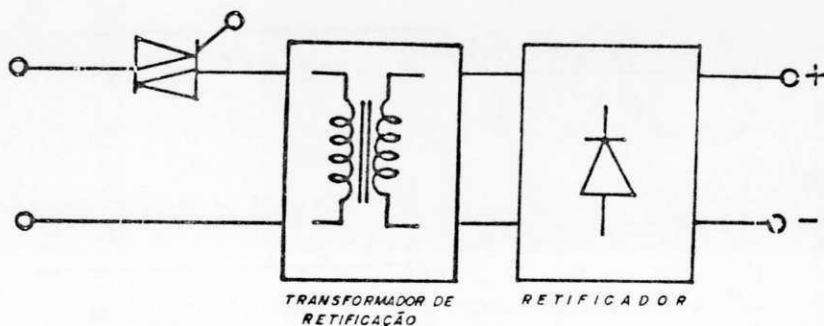


Fig. 3.3.- CONTROLE DE FASE
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

A figura 3.4 mostra como varia o fator de potência em função do ângulo de disparo para um retificador com saída hexafásica.

As expressões gerais para a amplitude do n -ésimo harmônico das séries senoidal e cossenoidal são as seguintes:

$$A_n = \frac{mEm}{\pi} \frac{2K'm}{K'^2m^2-1} \operatorname{sen} \pi/m \operatorname{sen} \alpha \quad (3.7)$$

$$B_n = - \frac{mEm}{\pi} \frac{2}{K'^2m^2-1} \operatorname{sen} \pi/m \cos \alpha \quad (3.8)$$

A amplitude total do n-ésimo harmônico é:

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} = \frac{m \cdot Em}{\pi} \frac{2}{K'^2m^2-1} \operatorname{sen} \pi/m \sqrt{K'^2m^2 \operatorname{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

para $m = 6$, temos:

$$C_6 = \frac{2 Em}{36 K'^2 - 1} \sqrt{1 + 36 K'^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (3.9)$$

onde:

$$\frac{C_6}{Em} = \frac{2}{36 K'^2 - 1} \sqrt{1 + 36 K'^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (3.10)$$

Como é observado na figura 3.5, as amplitudes dos harmônicos crescem rapidamente com o incremento do ângulo de disparo. Na figura é apresentado o harmônico de ordem seis, o qual corresponde a um fator de multiplicação (K') igual a um.

Cálculo da indutância crítica

Como mostra a figura 3.6, a tensão sobre a indutância determina a razão de subida e de descida da corrente, e a integral desta tensão tomada sobre um certo intervalo de tempo,

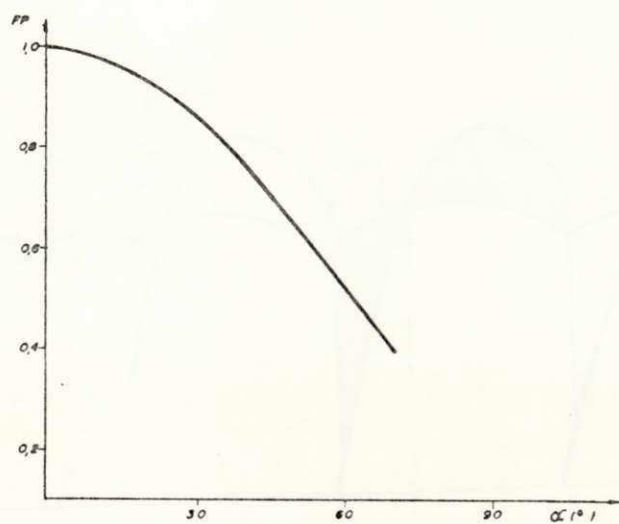


Fig. 3.4 - FATOR DE POTÊNCIA X ÂNGULO DE DISPARO

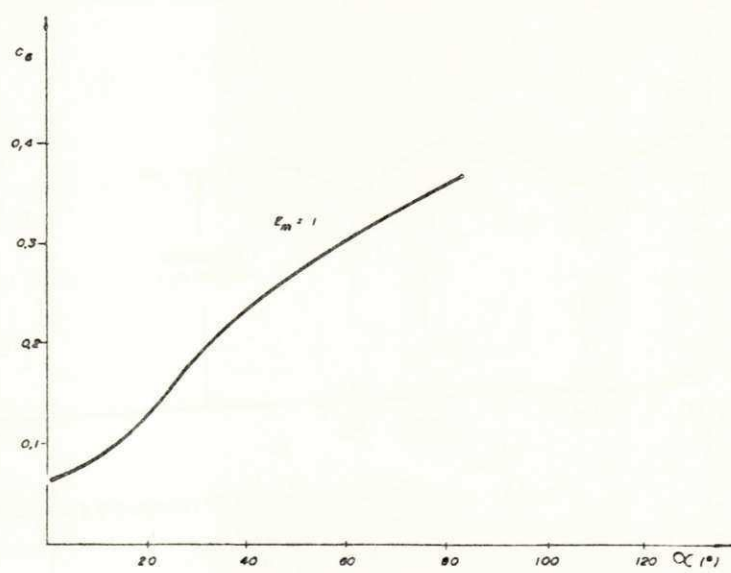


Fig. 3.5 - SEXTO HARMÔNICO X ÂNGULO DE DISPARO

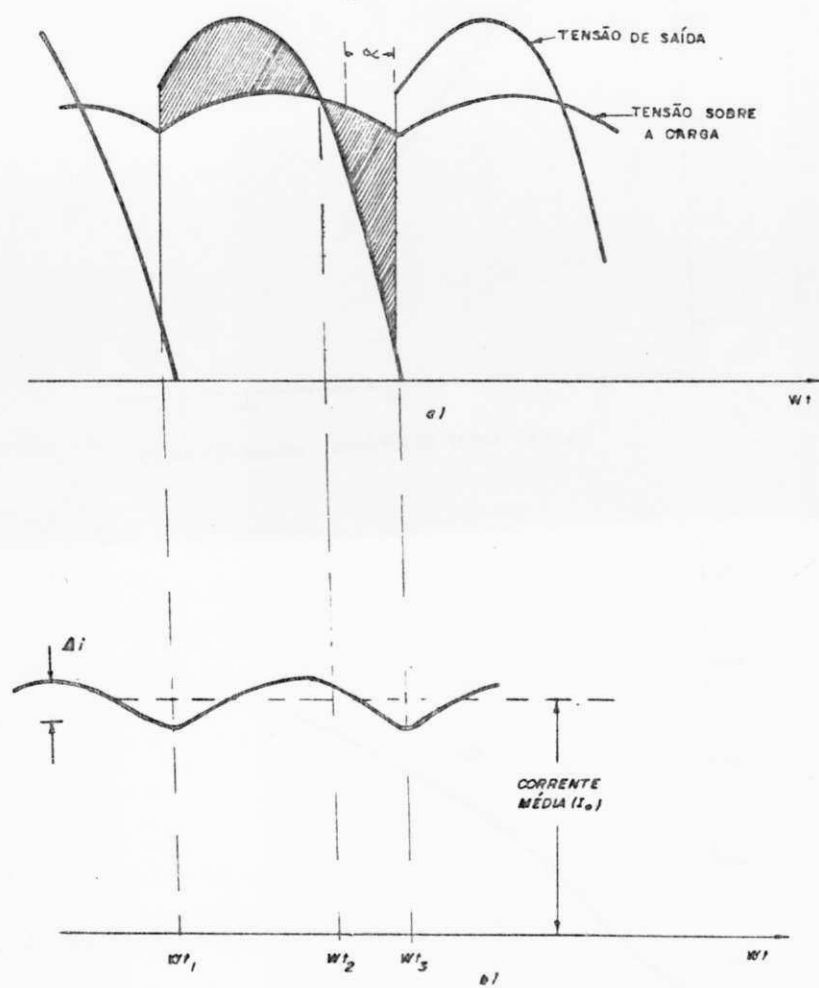


Fig. 3.6— a) TENSÃO DE SAÍDA DO RETIFICADOR E TENSÃO SOBRE A CARGA
b) CORRENTE NA CARGA

representa a variação total da corrente durante este tempo de acordo com a expressão:

$$\int e dt = L \int di \quad (3.11)$$

O intervalo de integração de Wt_1 a Wt_2 , tem área igual ao intervalo Wt_2 a Wt_3 , o qual representa a variação total da corrente entre os valores máximos e mínimos, como ilustra a figura 3.6a e 3.6b.

A integral no tempo da ondulação de tensão é representada pela área sombreada da figura 3.7.

Diante de uma variação na tensão de saída, o ângulo de disparo deve ser ajustado no sentido de manter o valor médio constante. Assim, será introduzido um fator K que é dado por:

$$K = \frac{E_{mx}}{E_m}$$

onde:

E_{mx} = valor da tensão de pico para um determinado ângulo de disparo;

E_m = valor da tensão de pico para um ângulo de disparo nulo. Neste caso, o valor médio a ser mantido é dado por $3 E_m/\pi$.

$$\frac{\int e dt}{E/w} = \frac{\pi}{3} \left[K \left(\cos \phi + \frac{\cos \alpha}{2} - \sqrt{3}/2 \sin \alpha \right) - \right. \\ \left. - 3/\pi (2\pi/3 - \phi - \alpha) \right] \quad (3.12)$$

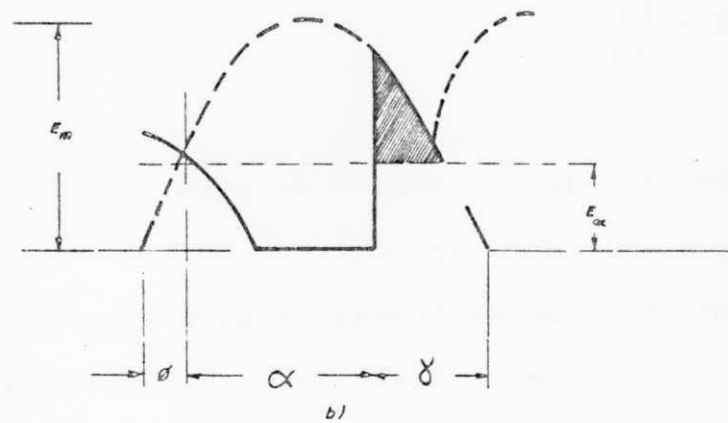
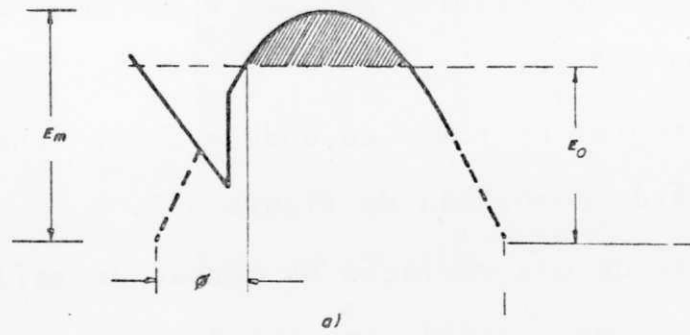


Fig. 3.7 — a) TENSÃO DE SAÍDA PARA $\alpha = 0^\circ$

b) TENSÃO DE SAÍDA PARA α QUALQUER

Os valores médios são dados pelas seguintes expressões:

$$E_{\alpha} = \frac{3K E_m}{\pi} \cos \alpha, \quad \alpha \leq \pi/3 \quad (3.13)$$

$$E_{\alpha} = \frac{3K E_m}{\pi} \left| 1 + \cos (\alpha + \pi/3) \right|, \quad \pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3 \quad (3.14)$$

As relações entre K e α , são as seguintes:

$$\alpha = \cos^{-1} 1/K, \quad \alpha \leq \pi/3 \quad (3.15)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{1 - K}{K} \right) - \pi/3, \quad \pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3 \quad (3.16)$$

A figura 3.8 mostra o gráfico da integral da tensão normalizada em função do ângulo de disparo, na qual se verifica um crescimento rápido da área quando o ângulo de disparo é grande.

Vantagens:

- 1) não usa derivações no transformador;
- 2) circuito de comando relativamente simples;
- 3) precisão no controle da tensão de saída.

Desvantagens:

- 1) redução no fator de potência e aumento no nível dos harmônicos com o aumento do ângulo de disparo;
- 2) é necessário a utilização de uma indutância de filtragem;
- 3) devido aos harmônicos enviados a rede, não pode ser utilizada na realização de equipamentos de forte potência.

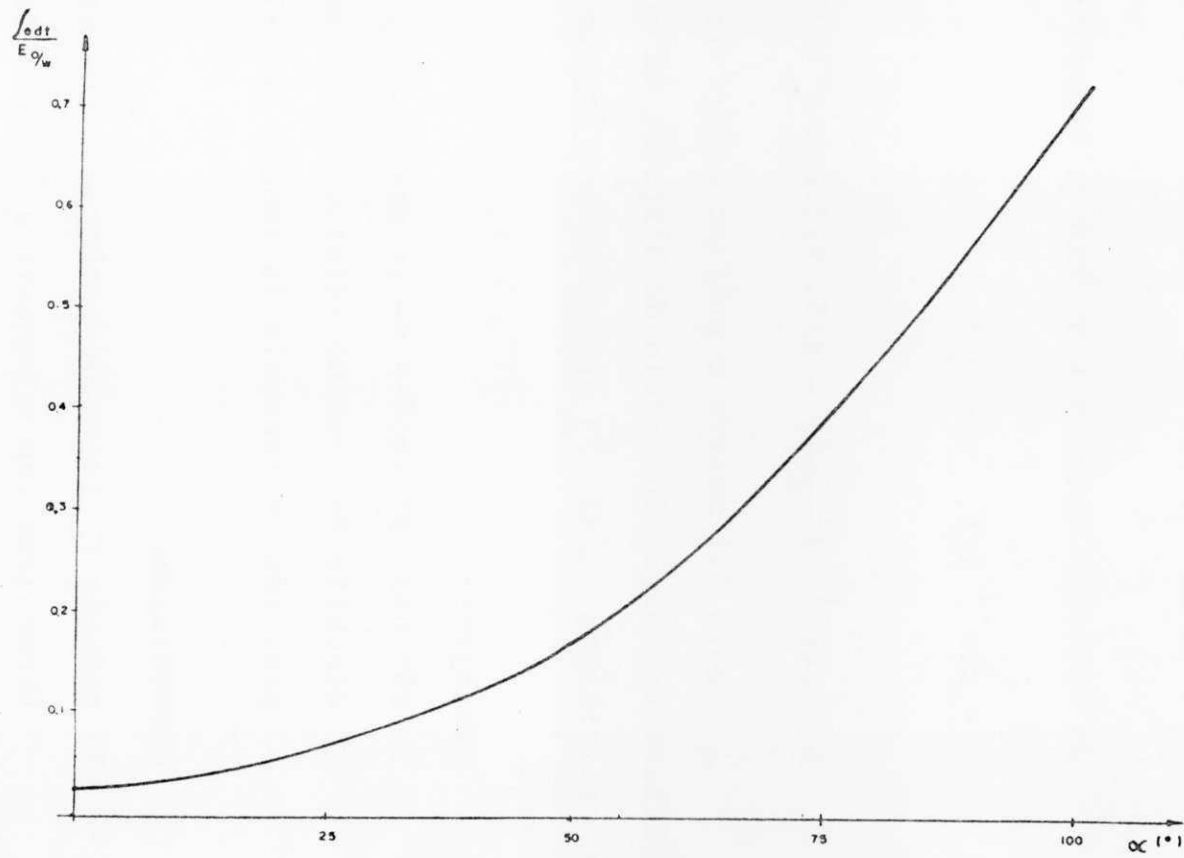


Fig. 3.8 - INTEGRAL DA TENSÃO NORMALIZADA x ÂNGULO DE DISPARO

cia.

3.2.1.2 - Controle a SCR/diodo

O circuito básico é mostrado na figura 3.9. Em um dos meio-períodos, a tensão é controlada pelo disparo do SCR.

Com relação a uma montagem somente a tiristores, ela possui um melhor rendimento [13]. Entretanto, seu fator de potência é maior, necessitando, também, uma indutância de filtragem. Suas vantagens e desvantagens são basicamente as mesmas do caso anterior.

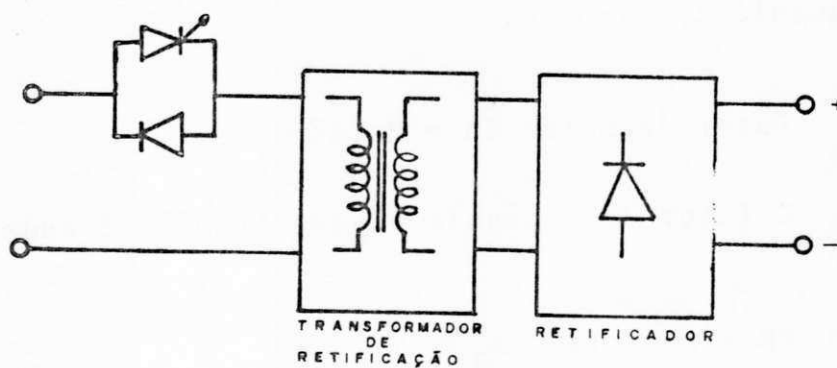


Fig. 3.9 - CONTROLE A SCR/DIODO
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

3.2.2 - Controle misto

Essa técnica utiliza o controle de fase conjuntamente com uma mudança de variação. Dois tipos de circuitos podem ser utilizados:

3.2.2.1 - Circuito básico

A figura 3.10 mostra um esquema monofásico de circuito. Os tiristores colocados em antiparalelo operam como uma chave bilateral, no início de cada semi-ciclo, um dos tiristores de par superior conduz a corrente de carga. Algum tempo depois no mesmo semi-ciclo, um dos tiristores do par inferior é disparado. Isto provocará um aumento de tensão na carga ao mesmo tempo que bloqueia o tiristor do par superior. No fim de cada ciclo, o tiristor do par inferior é bloqueado como é mostrado na figura 3.10. Assim, a tensão na carga pode ser variada através da mudança de derivação, seguido de um adequado ângulo de disparo.

Fator de Potência e Harmônicos

O fator de potência desse circuito é dado pela expressão:

$$FP = \cos (\operatorname{tg}^{-1} A_1/B_1) \quad (3.17)$$

onde:

A_1 e B_1 são as componentes cossenoidal e senoidal da fundamental.

Para um circuito com saída hexafásica como mostra as formas de onda da figura 3.10, essas componentes são dadas por:

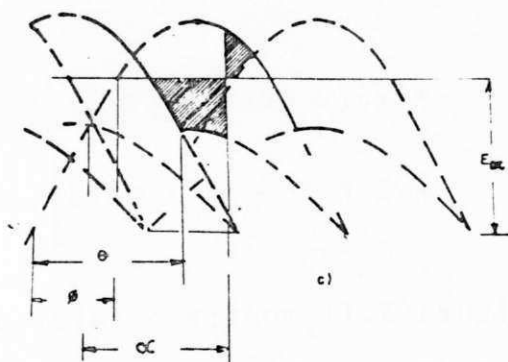
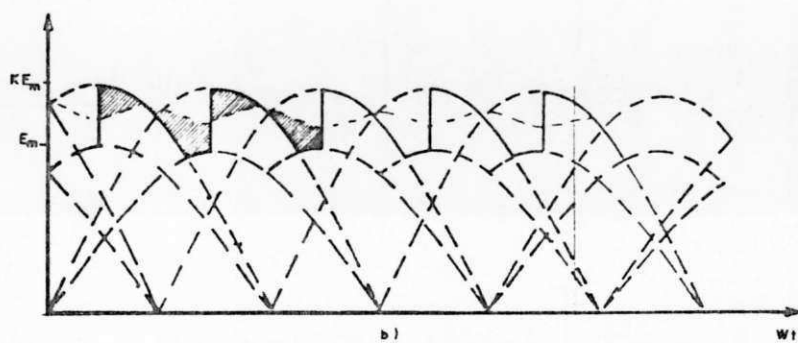
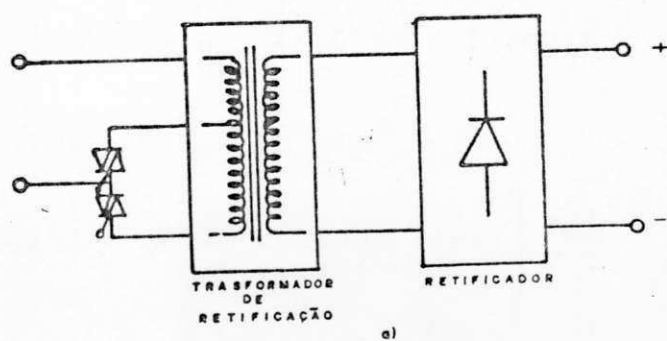


Fig. 3.10 — a) CONTROLE MISTO (ESQUEMA MONOFÁSICO)
 b) e c) TENSÃO DE SAÍDA DO RETIFICADOR
 PARA α QUALQUER

$$A_1 = \frac{3Em}{2\pi} \left\{ -\cos 2(\alpha + \pi/3) + \cos 2\theta + K \left[-\cos 2(\theta + \pi/3) + \cos 2(\alpha + \pi/3) \right] \right\}, \alpha \leq \pi/3 \quad (3.18)$$

$$B_1 = \frac{3Em}{2\pi} \left[(K-1) \sin 2(\alpha + \pi/3) - K \sin 2(\theta + \pi/3) + \sin 2\theta + 2(\theta - \alpha) (K-1) + 3\pi/2 \right] \alpha \leq \pi/3 \quad (3.19)$$

$$A_1 = \frac{3Em}{2\pi} \left\{ (K-1/2) \cos 2(\alpha + \pi/3) - K \cos 2(\theta + \pi/3) + \cos 2\theta - \sqrt{3} \left[\alpha - \pi/3 + \frac{\sin 2(\alpha + \pi/3)}{2} \right] - 1/2 \right\} \alpha \geq \pi/3 \quad (3.20)$$

$$B_1 = \frac{3Em}{2\pi} \left[(K-1/2) \sin 2(\alpha + \pi/3) - K \sin 2(\theta + \pi/3) + \sqrt{3}/2 \cos (\alpha + \pi/3) + \sin 2\theta + \pi + \alpha - 2\theta + 2K(\theta - \alpha) + \sqrt{3}/2 \right], \alpha \geq \pi/3 \quad (3.21)$$

A figura 3.11 mostra o fator de potência de circuito em função do ângulo de disparo para vários valores de K.

Como se pode observar, para pequenos valores de K (entre 1 e 2), o fator de potência é relativamente alto e varia pouco com a variação do ângulo de disparo.

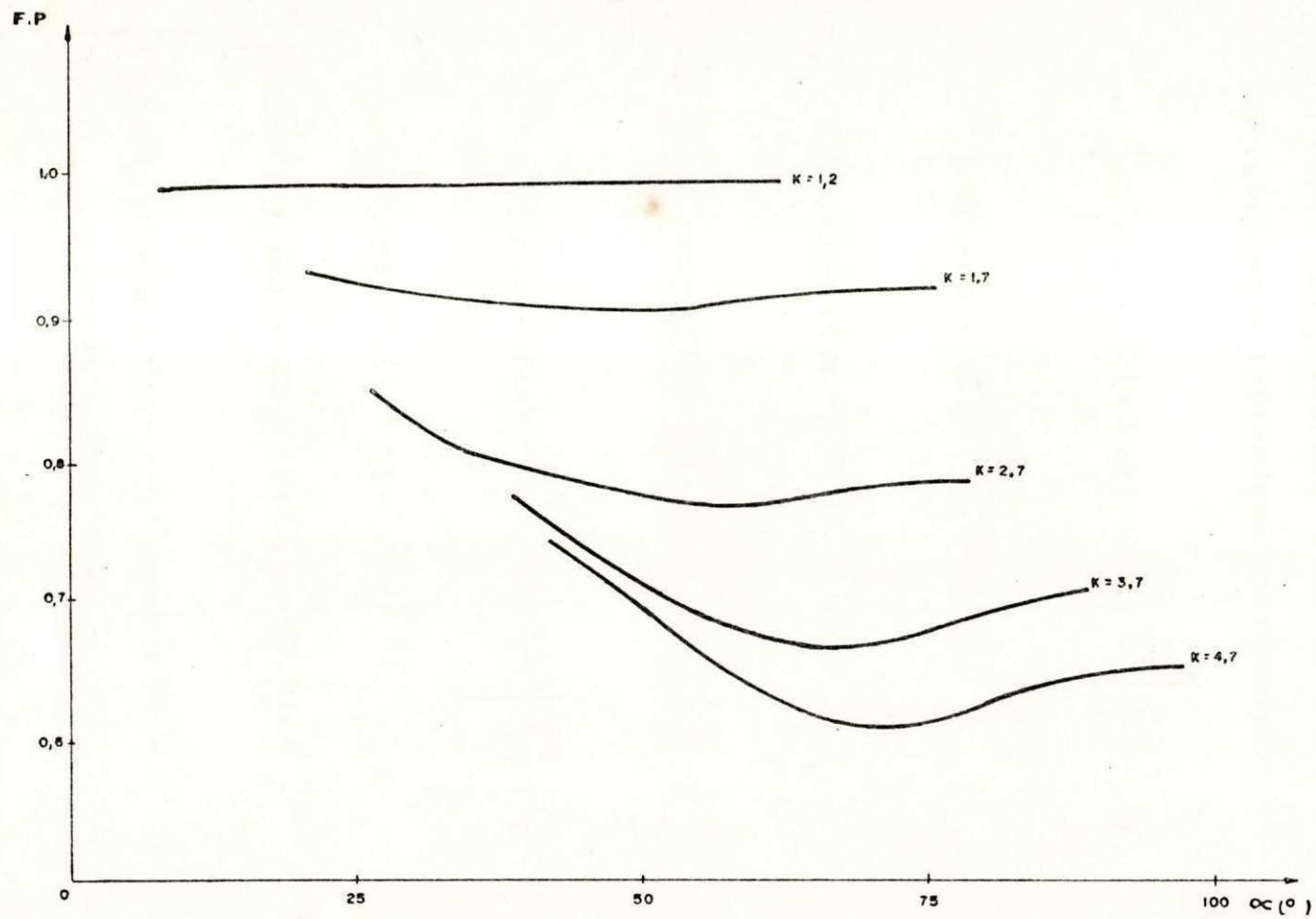


Fig. 3. II — FATOR DE POTÊNCIA X ÂNGULO DE DISPARO

Como foi dito anteriormente, o número de ordem dos harmônicos que aparecem na curva de tensão contínua é múltiplo do número de fases. Diante disso, os harmônicos de ordem superior a seis são muito pequenos, não sendo apresentados aqui.

As componentes cossenoidal e senoidal de ordem seis são:

$$\begin{aligned}
 A_6 = \frac{E_m}{70} & \left\{ 10 \left[-\cos 7(\alpha + \pi/3) + \cos 7\theta \right] + \right. \\
 & + 14 \left[\cos 5(\alpha + \pi/3) - \cos 5\theta \right] + \\
 & + 10 K \left[-\cos 7(\theta + \pi/3) + \cos 7(\alpha + \pi/3) \right] + \\
 & \left. + 14 K \left[\cos 5(\theta + \pi/3) - \cos 5(\alpha + \pi/3) \right] \right\}, \alpha \leq \pi/3
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
 B_6 = \frac{E_m}{70} & \left\{ 14 \left[\sin 5(\alpha + \pi/3) - \sin 5\theta \right] - \right. \\
 & - 10 \left[\sin 7(\alpha + \pi/3) - \sin 7\theta \right] + \\
 & + 14 \cdot K \cdot \left[\sin 5(\theta + \pi/3) - \sin 5(\alpha + \pi/3) \right] - \\
 & \left. - 10 K \left[\sin 7(\theta + \pi/3) - \sin 7(\alpha + \pi/3) \right] \right\}, \alpha \leq \pi/3
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}
 A_6 = \frac{Em}{70} \left\{ - 2 + 10 \cos 7\theta - 14 \cos 5\theta + 2 - \right. \\
 - 5 \cos 7(\alpha + \pi/3) + 7 \cos 5(\alpha + \pi/3) - \\
 - \sqrt{3} \left[\sqrt{3} + 7 \sin 5(\alpha + \pi/3) + 10 \sin 7(\alpha + \pi/3) \right] - \\
 - 10 K \left[\cos 7(\theta + \pi/3) - \cos 7(\alpha + \pi/3) \right] \\
 \left. + 14 K \left[\cos 5(\theta + \pi/3) - \cos 5(\alpha + \pi/3) \right] \right\}, \alpha \geq \pi/3
 \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
 B_6 = \frac{Em}{70} \left\{ - 6\sqrt{3} + 7 \sin 5(\alpha + \pi/3) - 5 \sin 7(\alpha + \pi/3) - \right. \\
 - 14 \sin 5\theta + 10 \sin 7\theta + \sqrt{3} \left[6 + 5 \cos 7(\alpha + \pi/3) + \right. \\
 + 7 \cos 5(\alpha + \pi/3) \left. \right] + 14 K \left[\sin 5(\theta + \pi/3) - \right. \\
 - \sin 5(\alpha + \pi/3) \left. \right] + 10 K \left[- \sin 7(\theta + \pi/3) + \right. \\
 \left. + \sin 7(\alpha + \pi/3) \right] \left. \right\}, \alpha \geq \pi/3
 \end{aligned} \quad (3.25)$$

A amplitude do sexto harmônico é:

$$C_6 = \sqrt{A_6^2 + B_6^2} \quad (3.26)$$

A figura 3.12 mostra a curva de amplitude do sexto harmônico em função do ângulo de disparo para vários valores de K.

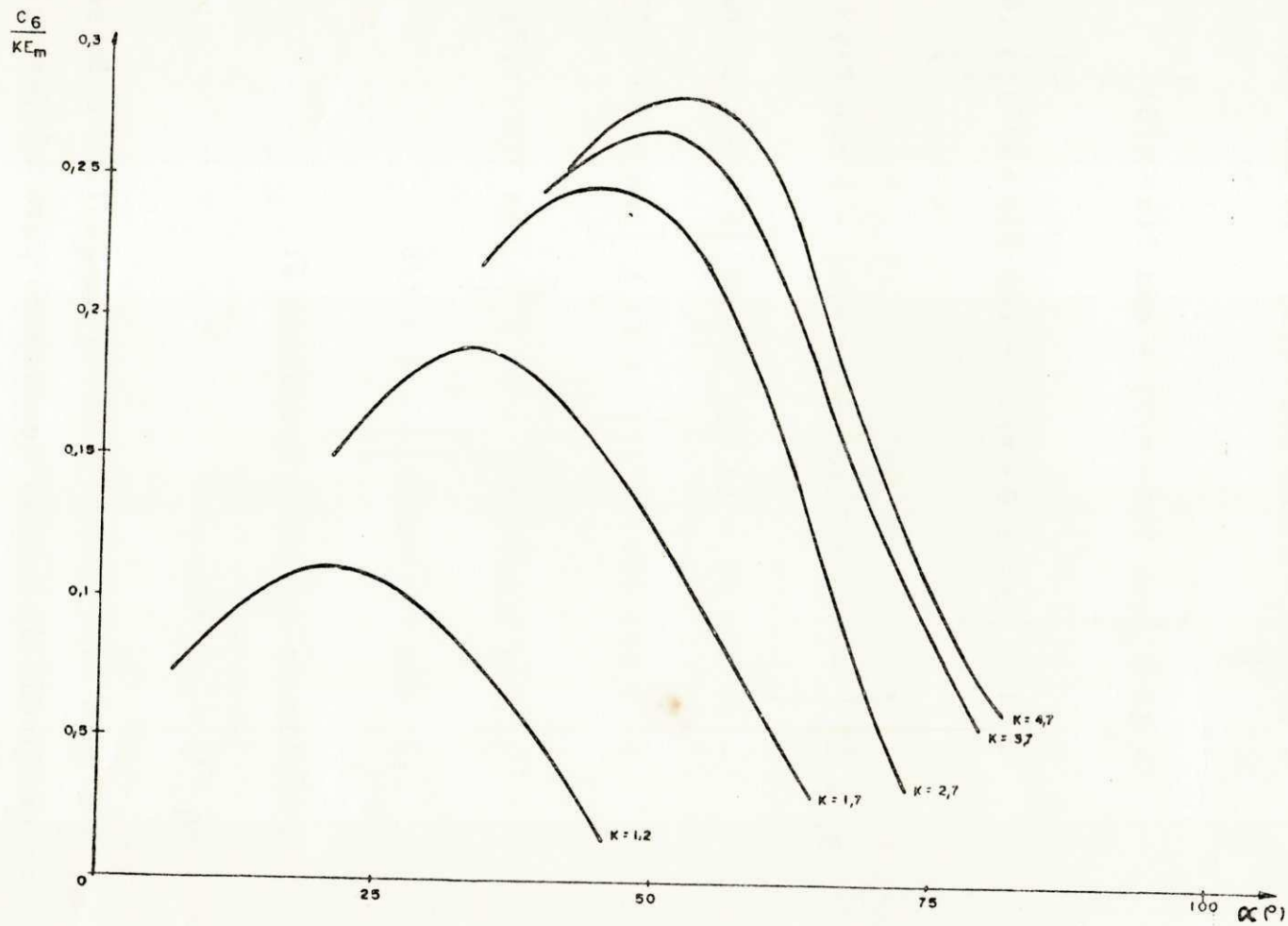


Fig. 3.12 — AMPLITUDE DO SEXTO HARMÔNICO X ÂNGULO DE DISPARO

Cálculo da Indutância Crítica

O valor médio da tensão de saída é dado por:

$$E_{\alpha} = \frac{3K_1 E_m}{\pi} \left[\frac{\cos \alpha}{2} (1 - K) + \cos \theta (K/2 - 1) + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} \alpha (K - 1) - \frac{K\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} \theta \right], \quad \theta \leq \alpha \leq \pi/3 \quad (3.27)$$

$$E_{\alpha} = \frac{3K_1 E_m}{\pi} \left[\cos \alpha (1 - K/2) + \cos \theta (K/2 - 1) - \right. \\ \left. - \frac{K\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} \theta + \frac{K\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} \alpha - 1 \right], \quad \theta \leq \alpha \leq 2\pi/3 \quad (3.28)$$

A integral no tempo da parte sombreada da figura 3.7 é:

$$\int edt = \frac{KE_m}{\omega} \left[K_1 (\cos \phi + 1/2 \cos \alpha - \sqrt{3}/2 \operatorname{sen} \alpha) - \right. \\ \left. - 3/\pi \left(\frac{2\pi}{3} - \phi - \alpha \right) \right] \quad (3.29)$$

logo:

$$\frac{\int edt}{E_o/\omega} = \pi/3 \left[K_1 \left(\cos \phi + \frac{\cos \alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) - \right. \\ \left. - 3/\pi \left(\frac{2\pi}{3} - \phi - \alpha \right) \right] \quad (3.30)$$

onde K_1 está relacionado com o ângulo do disparo pelas seguintes expressões:

$$K_1 = -K/ \left[\frac{\cos \alpha}{2} (1 - K) + \cos \theta (K/2 - 1) + \right. \\ \left. + \frac{K\sqrt{3}}{2} \operatorname{sen} \theta \right], \quad \theta \leq \alpha \leq \pi/3 \quad (3.31)$$

$$K_1 = - K \left[\cos \alpha (1 - K/2) + \cos \theta (K/2 - 1) - \frac{K\sqrt{3}}{2} \sin \theta + \frac{K\sqrt{3}}{2} \sin \alpha - 1 \right] \quad \pi/3 \leq \alpha \leq 2\pi/3 \quad (3.32)$$

A figura 3.13 mostra o gráfico da integral no tempo de tensão normalizada em função do ângulo de disparo para vários valores de K . Como mostra a figura 3.13, a integral tem um máximo para valores intermediários de α , os quais dependem do valor de K .

Vantagens:

- 1) fator de potência relativamente alto, desde que K seja pequeno (entre 1 e 2);
- 2) utiliza apenas uma derivação no primário do transformador;
- 3) precisão no controle da tensão de saída.

Desvantagens:

- 1) faixa de controle limitada;
- 2) necessidade de utilização de indutância de filtragem;
- 3) instante de cessação de condução dos tiristores afetados pelo fator de potência da carga. Isto resulta na necessidade de prevenir a mudança de derivação, por causa de tensão reversa no tiristor a ser disparado, aumentando a complexidade do circuito de co-

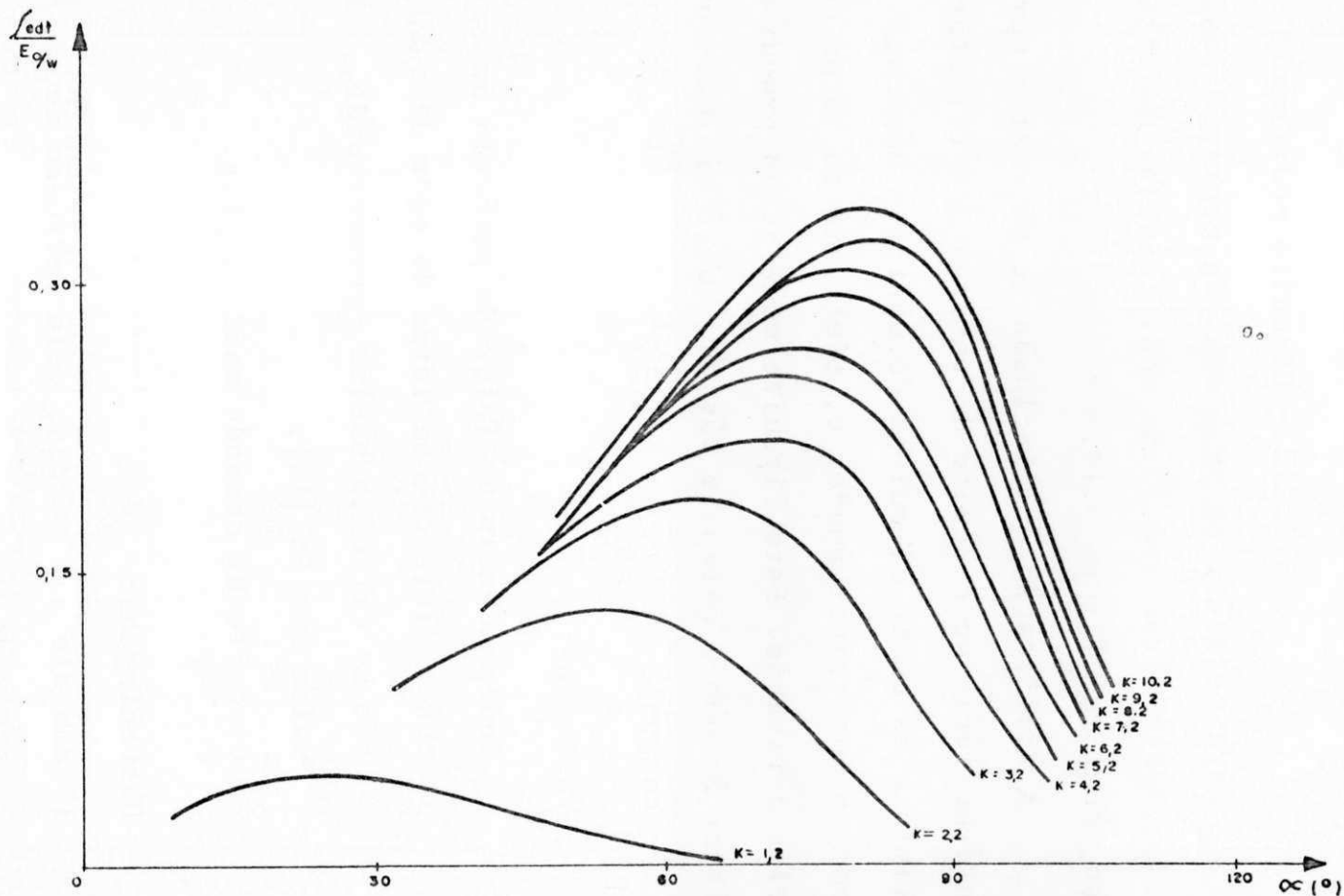


Fig. 3,13 — INTEGRAL DA TENSÃO NORMALIZADA X ÂNGULO DE DISPARO

mando, ou em um outro circuito entre derivações através de dois tiristores [14];

4) produz distorção ainda considerável.

3.2.2.2 - Circuito modificado

Para resolver os problemas da montagem básica, THOMPSON [14], desenvolveu uma forma modificada na mudança da derivação, conforme figura 3.14.

A modificação é a inclusão de um reator com derivação intermediária no circuito de entrada dos tiristores. Além de eliminar os curto circuitos da montagem básica, o reator atua como um autotransformador e, efetivamente, atua como uma terceira derivação. Este circuito modificado produz uma menor distorção que o circuito básico, que é mínima, quando a tensão é nominal.

Vantagens:

- 1) independência do fator de potência da carga;
- 2) menor distorção na forma de onda de saída, em relação ao circuito básico, permanecendo, entretanto, maior que 5% [16];
- 3) circuito de comando mais simples.

Desvantagens:

- 1) aumento das perdas, pela inclusão de um reator em separado;
- 2) necessidade da indutância de filtragem;

- 3) pequena faixa de controle, embora maior do que a do circuito básico;
- 4) impossibilidade do uso de triacs.

3.2.3 - Controle por derivação múltipla

O controle por derivação múltipla é realizado com a comutação de derivações, sempre que houver necessidade de correção da tensão de alimentação do sistema. A tensão no primário do transformador é corrigida pela mudança de derivações, e a tensão na saída do retificador sendo a mesma obtida através de um retificador alimentado senoidalmente.

Fator de Potência e Harmônicos

Já que a reatância de dispersão foi considerada desprezível, nesse caso não existe, praticamente, atraso da corrente em relação a tensão, a menos no sistema convencional (a contato). Isto caracteriza um sistema com fator de potência unitário.

O alto fator de potência é uma das grandes vantagens dos sistemas eletrônicos deste tipo de regulação.

Os harmônicos da curva de tensão contínua podem ser calculados com o uso da expressão (3.10), bastando fazer $\alpha = 0$, ou seja:

$$\frac{C_n}{E_m} = \frac{2}{36 K'^2 - 1} \quad (3.33)$$

Então, para $K' = 1$, $\frac{C_6}{E_m} = 0,057$, valor correspondente à amplitude do sexto harmônico.

Ondulação

A ondulação, nesse caso, é a mesma de um retificador hexafásico alimentado senoidalmente, ou seja, 4,2%.

Vantagens:

- 1) alto fator de potência, a exceção do caso de derivações a contato como indicado antes;
- 2) baixo nível de harmônicos;
- 3) não há necessidade, para a aplicação pretendida, de reator de filtragem.

Desvantagens:

- 1) discontinuidade no controle da tensão de saída;
- 2) maior número de tiristores para efetuar um controle mais fino.

Vários circuitos podem ser utilizados na regulação a derivações. A diferença entre eles sendo estabelecida pelo fato da mudança de derivações poder ser a contato ou a semicondutores. O número de tiristores depende do princípio utilizado, e da regulação de tensão desejada. As desvantagens específicas de cada possibilidade serão assinaladas quando de seu estudo.

3.2.3.1 - Derivações a contato mecânico

Este é o método antigo e é chamado de convencional. A regulação é feita através de um autotransformador regulável por derivações (TCD), conectado ao primário do transforma

dor de retificação, figura 3.15. Um retificador a diodos retifica a tensão no secundário. Um reator auto-saturável provê um ajuste fino entre os degraus obtidos com a mudança de derivações [8], [10]. A potência reativa, nesse tipo de controle, é função da corrente de carga [19]. Entre as derivações, a componente reativa cresce com a redução da carga, devido à ação do controle de fase dos reatores de controle fino. Em níveis mais baixos de corrente, esse efeito é reduzido, mas existe, quando não se usa os reatores de ajuste fino. A potência reativa nas derivações é proporcional à potência de saída. GALLOWAY [19] mostrou que o fator de potência de um sistema desse tipo é maior do que um sistema de regulação a tiristores, com controle de fase.

Desvantagens:

- 1) utilização de um auto-transformador, além de mudança das derivações;
- 2) manutenção elevada do (TCD), quando são previstas muitas variações da tensão da fonte, acarretando o uso de um número excessivo de mudança de derivações [8];
- 3) resposta lenta na mudança de tensão; entretanto, muitos processos não necessitam de resposta rápida;
- 4) baixo fator de potência.

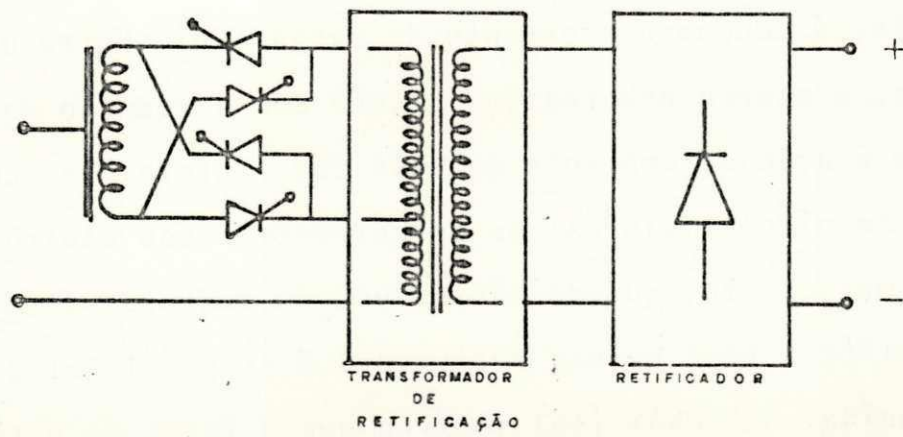


Fig. 3,14 - CIRCUITO MODIFICADO
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

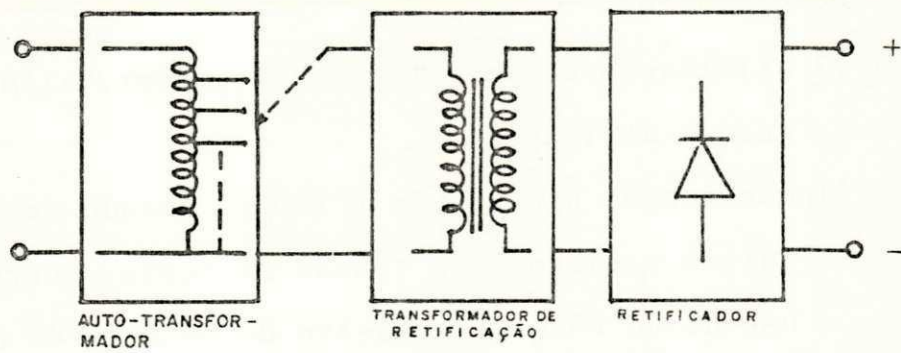


Fig. 3,15 - DERIVAÇÃO A CONTACTO MECÂNICO
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

3.2.3.2 - Derivação aditiva ou subtrativa

Algumas possibilidades são apresentadas na literatura técnica e discutidas a seguir.

Uma primeira possibilidade consiste [15], em n bobinas no primário do transformador, figura 3.16, de maneira que para uma relação de transformação adequada, a tensão de saída é baseada na escala binária.

$$E, 2E, 4E \dots 2^{n-1}E$$

onde E é o valor da menor tensão de saída.

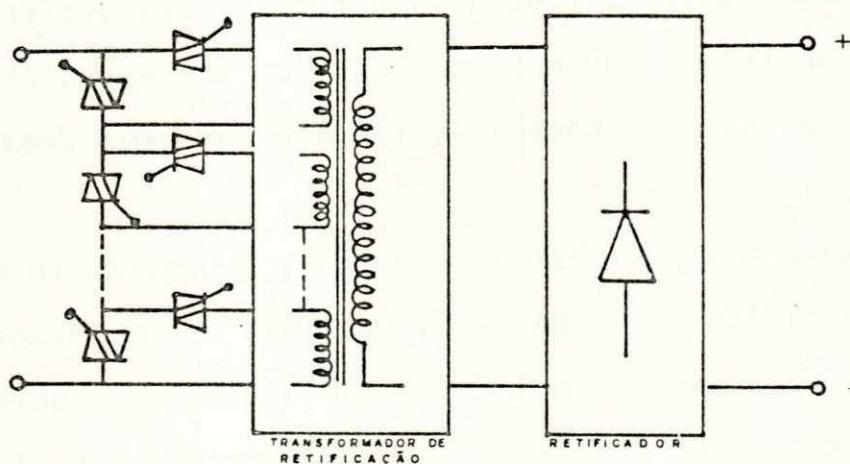


Fig. 3.16 - DERIVAÇÃO ADITIVA OU SUBTRATIVA
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

Com uma conexão de tiristores em anti-paralelo, e uma combinação adequada destas bobinas, a tensão de saída pode ser variada desde E até $E (1 + 2 + 4 \dots + 2^{n-1})$ volts em graus de E volts.

Um conversor analógico digital com uma saída de n bits paralelo, controla um conjunto de elementos lógicos. Estes elementos lógicos operam os tiristores com uma combinação das bobinas para dar uma tensão de saída desejada.

Este circuito apresenta algumas desvantagens, tais como a complexidade do circuito de comando, e a utilização de um grande número de tiristores.

Uma outra possibilidade é obtida a partir de uma técnica desenvolvida por SERVETAS [16]. O circuito regulador é composto por vários enrolamentos em série, cada qual possuindo um número diferente de derivações. A cada derivação é conectado um triac, ou um par de SCRs em anti-paralelo, possibilitando várias combinações de tensão, conforme demonstrado na figura 3.17.

Uma outra possibilidade, ainda, é baseada em um circuito desenvolvido por LIRA [17]. Consiste em um transformador com três enrolamentos primários flutuantes e um outro para compensar a queda de tensão nos tiristores (figura 3.18). Os enrolamentos V_1 , V_2 e V_3 podem atuar de forma aditiva ou subtrativa, dependendo da combinação de tiristores que utilize. Assim, uma mesma derivação pode compensar uma subida de tensão, com uma ação subtrativa, ou uma baixa de tensão, com uma ação aditiva.

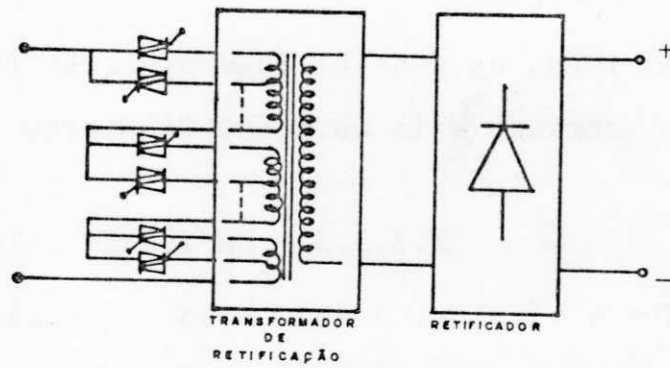


Fig. 3.17— TÉCNICA DE DESENVOLVIMENTO POR **SERVETAS**
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

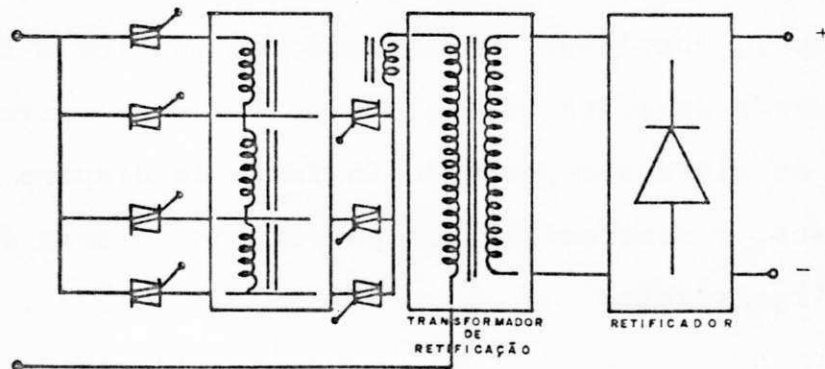


Fig. 3.18— TÉCNICA DESENVOLVIDA POR **LIRA**
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

Desvantagens:

- 1) o circuito de LIRA permite o menor número de tiristores das possibilidades apresentadas. Entretanto, como as outras montagens operam com tiristores em série, o que diminui a confiabilidade do sistema;
- 2) necessidade de compensação da queda de tensão nos tiristores;
- 3) todas as possibilidades necessitam de circuitos de comando mais ou menos complexos.

3.2.3.3 - Derivação seletiva

Nesta técnica, a regulação da tensão é feita através da seleção da derivação no primário do transformador como mostra a figura 3.19. Para cada derivação, tem-se uma relação de transformação no sentido de regular a tensão de saída. Os dispositivos usados em série com cada derivação (SCRs e/ou triacs), funcionam como chaves, de maneira a fazer conduzir apenas a derivação selecionada. Tendo em vista que o desempenho do sistema depende do instante de disparo dos SCR's e/ou triacs, o sincronismo dos pulsos com o zero da corrente é indispensável.

Vantagens:

- 1) circuito de comando relativamente simples, quando comparado a outras montagens.

Desvantagens:

- 1) número maior de derivações, em relação as montagens de LIRA e SERVETAS.

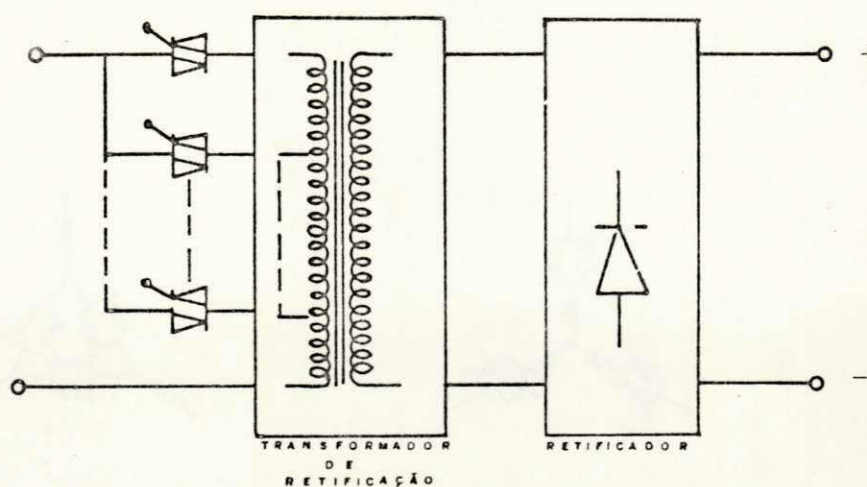


Fig. 3.19 — DERIVAÇÃO SELETIVA
(ESQUEMA MONOFÁSICO)

3.2.2 - Possibilidades de Conexão de Enrolamentos e de Semicondutores

McMURRAY [21], analisa quatro montagens (figura 3.20) aqui denominadas I, II, III e IV, com relação às quais são feitas as seguintes observações:

- uma mudança na montagem I, em que a carga é conectada em triângulo envolve uma simples transformação entre la-triângulo com a possibilidade de circulação de um terceiro harmônico sobre os enrolamentos em triângulo, mas não afeta os tiristores;

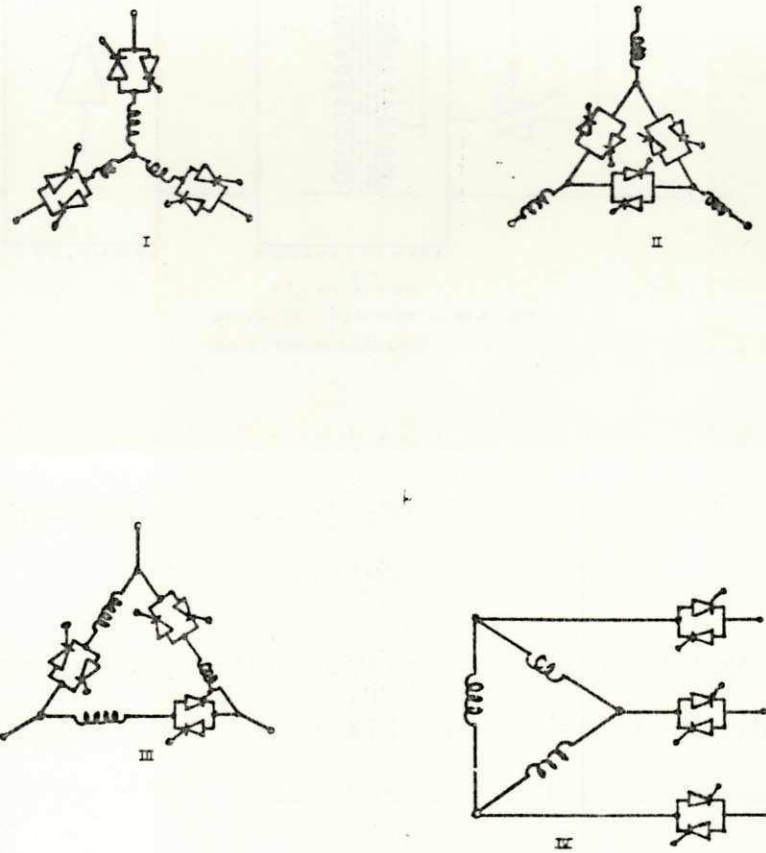


Fig. 3.20 — POSSIBILIDADES DE CONEXÕES NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR

I • IV — TIRISTORES EM ESTRELA
 II • III — TIRISTORES EM TRIÂNGULO

- similarmente, o desempenho da montagem I com o neutro ligado ao neutro do sistema de alimentação, é facilmente obtida pela transformação da montagem III, em que o terceiro harmônico flui através do fio neutro;
- as correntes de linha nos enrolamentos da montagem II são iguais às da montagem I. Somente as correntes nos tiristores são diferentes;
- uma solução completa da montagem II inclui a solução para o circuito I, sendo necessário apenas detalhar as análises das estruturas II e III para se cobrir todos os casos.

McMURRAY afirma também, que uma montagem assimétrica, semelhante à montagem I com somente uma ou duas fases controladas por tiristores, ou com um diodo e um tiristor em cada fase, ou a montagem II, com somente três tiristores, são montagens de baixo custo, tendo, entretanto, um pobre desempenho para grandes faixas de controle.

A seguir, é feita uma análise dessas estruturas considerando-se o retificador hexafásico de meia onda e a duplo estrela com bobina de absorção.

Nesta análise, as correntes são consideradas retangulares, e a relação de transformação é unitária.

3.3.1 - Hexafásico de Meia Onda [23]

3.3.1.1 - Primário em estrela

O primário está bem utilizado com um fator de utilização vizinho da unidade (1,05), por outro lado, o secundário apresenta um fator de utilização de (1,814), figura 3.21.

O circuito magnético é objeto de uma f.e.m. residual de harmônica tripla que pode provocar perdas suplementares se o circuito oferecido ao fluxo de dispersão correspondente, apresenta uma permeância não desprezível (trata-se do caso de um circuito magnético sem retorno de fluxo; se esse existisse, obter-se-ia o funcionamento e características do retificador com bobina de absorção). É devido à f.m.m. residual que esta estrutura não é recomendada para potências elevadas.

3.3.1.2 - Primário em triângulo

As observações feitas para esta estrutura, são as mesmas que no caso da ligação estrela, com as seguintes exceções:

O primário é mal utilizado com um fator de utilização igual a 1,28, o que é explicado pelo fato de que as correntes primárias duram um sexto do período (em lugar de meio período no caso precedente). Essas correntes são munidas de harmônicos múltiplos de três, o que não acontece com a ligação estrela.

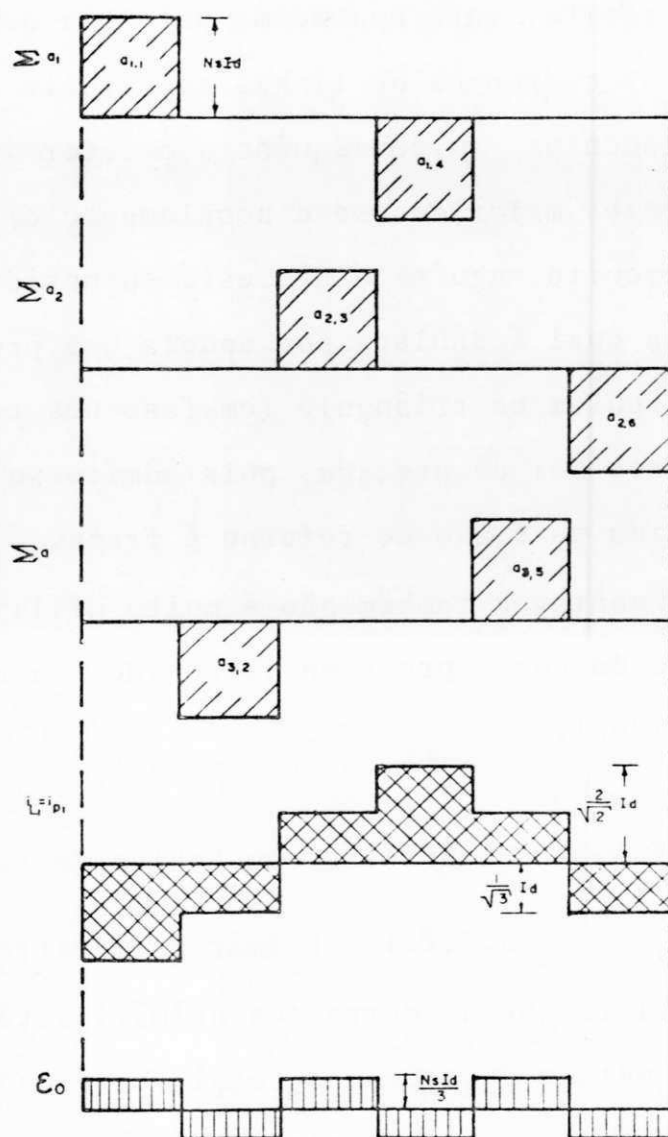


Fig. 3.21 - DIAGRAMA DE CORRENTES PARA O RETIFICADOR (PRIMÁRIO EM ESTRELA) HEXAFÁSICO DE MEIA ONDA
 Σa_n = f.m.m. SECUNDÁRIO, i_L = CORRENTE NA LINHA,
 i_p = CORRENTE PRIMÁRIA

Contrariamente aos sistemas de condução um sexto do período, a corrente de linha na ligação triângulo, não é $\sqrt{3}$ vezes a corrente primária, mas somente $\sqrt{2}$ vezes. Isto explica o mal fator de utilização deste.

Com efeito, para uma mesma potência debitada do lado contínuo, as correntes de linhas são iguais (fig. 3.22) nos dois acoplamentos, em consequência o fator de utilização é $\sqrt{3} / \sqrt{2}$ vezes maior do que o acoplamento em estrela.

O circuito magnético não está submetido a uma f.m.m. residual, a qual é anulada por aquela que produz as correntes que circulam no triângulo (em fase nos três enrolamentos). Esta corrente foi desprezada, pois admite-se que a permeância oferecida ao fluxo de retorno é fraca.

Esta montagem também não é muito utilizada, mas é mais recomendada do que a precedente, devido a não apresentar f.m.m. residual.

3.3.2 - Hexafásico com Bobina de Absorção [23]

3.3.2.1 - Primário em estrela

Foi visto que as correntes primárias têm um valor máximo igual à metade da corrente total retificada durante um terço do período, as quais são iguais às correntes secundárias do transformador (fig. 3.23).

A composição dos ampère-espiras secundários mostram que não existe f.m.m. residual sobre o circuito magnético. Tendo em vista se tratar de correntes retangulares de duração um

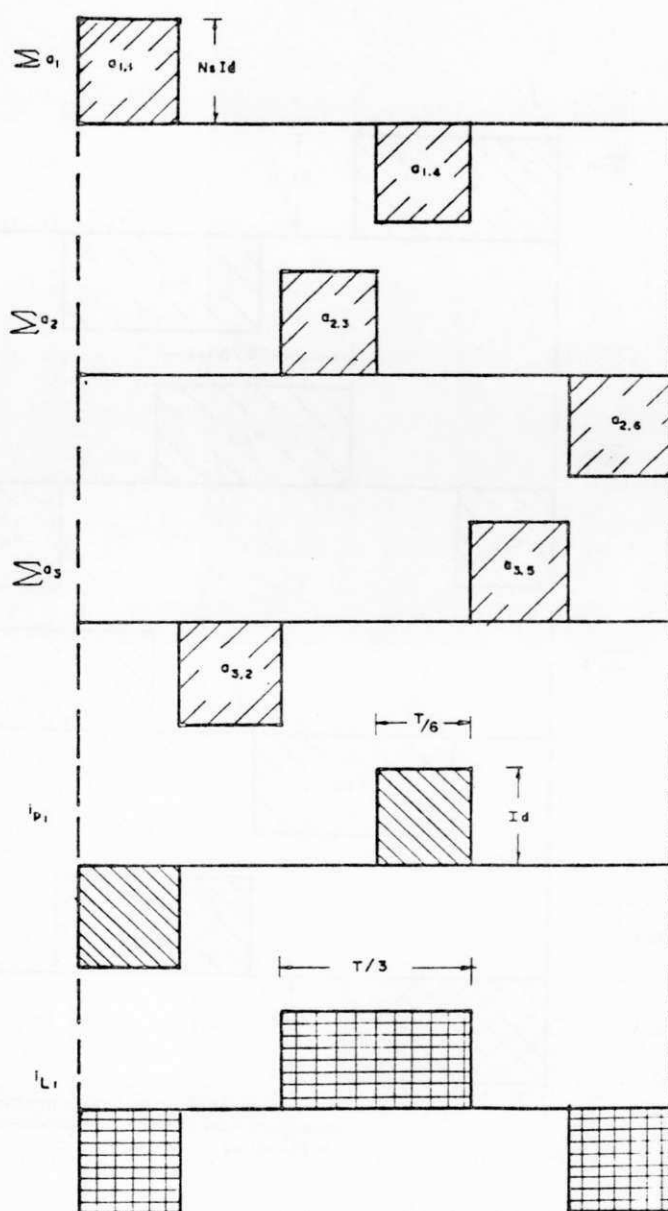


Fig. 3.22 — DIAGRAMA DE CORRENTES PARA O RETIFICADOR HEXA-FÁSICO DE MEIA ONDA (PRIMÁRIO EM TRIÂNGULO)

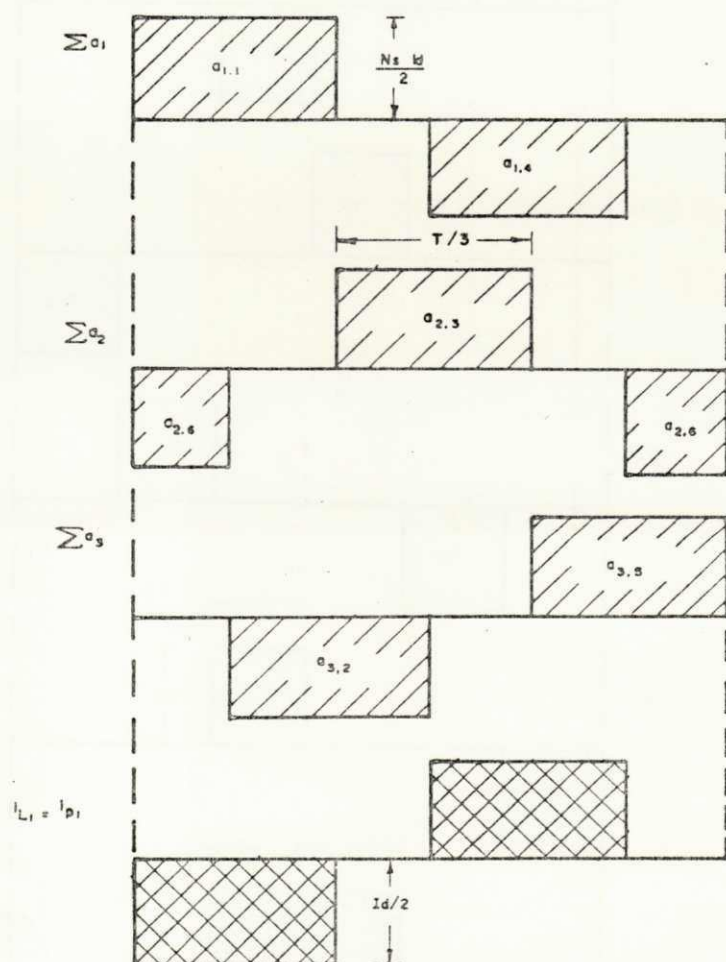


Fig 3.23 - DIAGRAMA DE CORRENTES PARA O RETIFICADOR HEXAFÁSICO COM BOBINA DE ABSORÇÃO (PRIMÁRIO EM ESTRELA)

terço do período, elas não contêm harmônicos múltiplos de três.

3.3.2.2 - Primário em triângulo

A disposição dos enrolamentos secundários, é a mesma do caso em estrela (fig. 3.24). As correntes secundárias são idênticas e sua composição conduz a uma mesma forma de corrente primária, o que é um caso geral quando a soma dos ampéres re-espiras secundários é nula a qualquer instante.

3.3.3 - Considerações Sobre a Análise

Na análise feita anteriormente, não foi considerada a ligação dos tiristores no primário, o que resultou numa análise para um ângulo de disparo nulo. Estes resultados podem ser estendidos para um ângulo de disparo qualquer, tendo em vista que as diferenças apresentadas por uma estrutura, ao se variar o ângulo de disparo, são análogas as apresentadas, também na outra, com excessão da tensão reversa nos tiristores [22]. Isto torna a análise válida para qualquer situação.

A tabela 3.1, apresenta os valores das correntes nos diversos ramos do circuito, e o fator de utilização para cada estrutura. Nela são apresentadas também, os valores das correntes nos tiristores em função da posição que os mesmos ocupam na ligação primária.

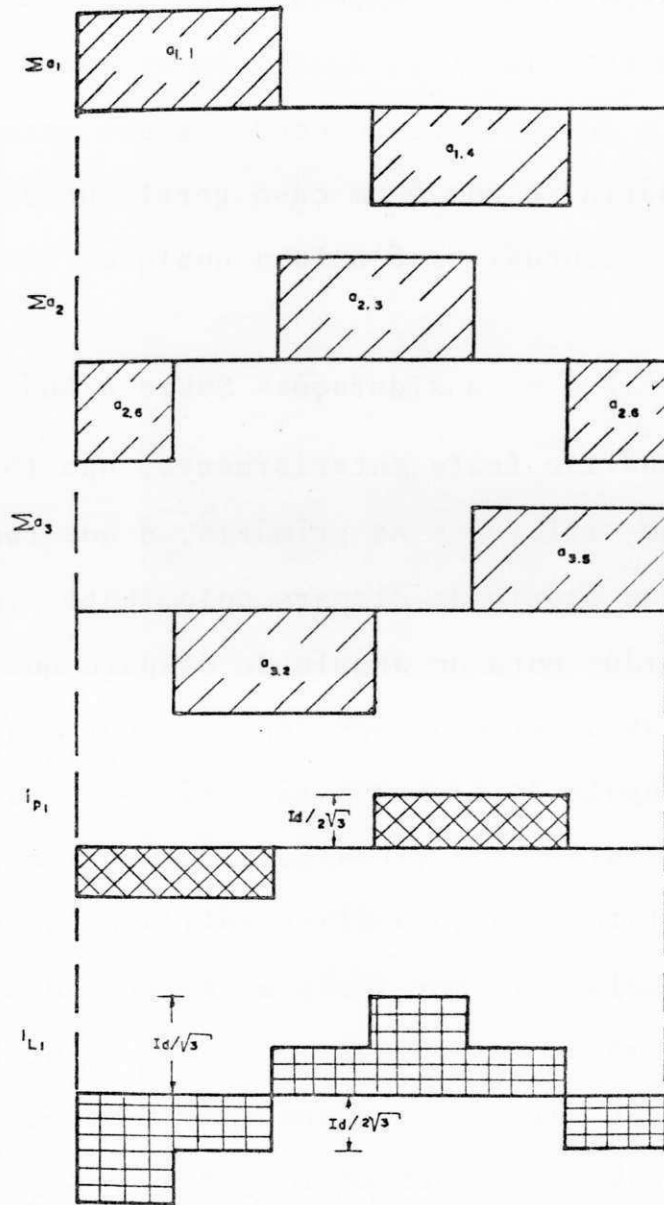


Fig. 3.24 DIAGRAMA DE CORRENTE PARA O RETIFICADOR HEXAFÁSICO COM BOBINA DE ABSORÇÃO (PRIMÁRIO EM TRIÂNGULO)

Tabela 3.1

Conexão secundária		Hexafásico de meia onda				Dupla estrela com bobina de absorção			
Conexão primária		estrela		triângulo		estrela		triângulo	
Variáveis	Conexão dos tiristores	est.	triân.	est.	triân.	est.	triân.	est.	triân.
	I_R		0,82Id	0,82Id	0,82Id	0,82Id	0,41Id	0,41Id	0,41Id
I_A		0,82Id	0,82Id	0,58Id	0,58Id	0,41Id	0,41Id	0,23Id	0,23Id
I_{TH}		0,58Id	0,23Id	0,58Id	0,41Id	0,29Id	0,17Id	0,29Id	0,17Id
Fator de utilização do primário		1,047		1,280		1,047		1,047	

- I_R - valor eficaz da corrente de linha
 I_A - valor eficaz da corrente primária
 I_{TH} - valor eficaz da corrente num tiristor

3.4 - Comparação entre as Diversas Possibilidades

Foi visto que, para a aplicação desejada, ou seja, para a obtenção de uma baixa tensão, com corrente elevada, é mais interessante realizar uma regulação no primário utilizando um retificador a diodos de seis pulsos no secundário.

Dentre as técnicas de regulação, cada uma apresenta suas vantagens e desvantagens. O controle de fase e o controle misto, introduzem harmônicos na rede e necessitam de reatores de filtragem para reduzir a ondulação no secundário. Quando se trata de altas correntes, os reatores de filtragem necessitam de núcleos com grandes seções transversais para evitar a saturação dos mesmos. Isto acarreta a utilização de grande quantidade de ferro.

Os circuitos à derivação múltipla, eliminam essa desvantagem.

A montagem com regulação por contatos exige uma manutenção elevada quando existem muitas variações na fonte de alimentação. Além disso, apresenta baixo fator de potência.

A derivação aditiva ou subtrativa a tiristores, permite pela composição das derivações e/ou acoplamentos separados a correção da variação da tensão de entrada, as diferenças se estabelecendo em relação ao número de tiristores ou a complexidade do circuito de comando. Entretanto, utiliza tiristores em série, o que diminui a confiabilidade e necessita de uma tensão de compensação de queda de tensão nos mesmos.

O controle seletivo evita esse problema, embora utilize um número um pouco maior de tiristores para um mesmo caso.

Como as formas de onda e a tensão média na saída do retificador, para um ângulo de disparo nulo, são idênticas para todos os casos e a tensão reversa no tiristor é de baixo valor, a comparação pode focar apenas as correntes nos tiristores e o fator de utilização do transformador.

O valor das correntes nos tiristores do primário está ligado a conexão dos mesmos, em estrela ou em triângulo e ao tipo de retificador usado no secundário (hexafásico de meia onda, ou dupla estrela com bobina de absorção).

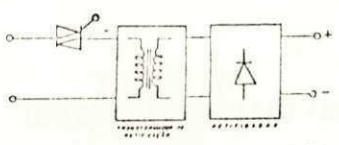
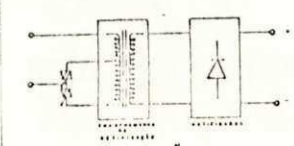
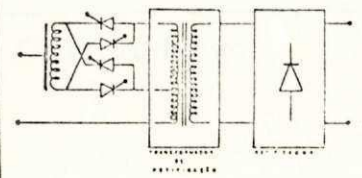
Os estudos efetuados mostraram que esses valores são menores quando a conexão dos tiristores é em triângulo (tabela 3.1), os menores valores sendo obtidos no caso do retificador dupla estrela com bobina de absorção no secundário, independentemente da conexão do primário do transformador utilizado.

A utilização de um retificador dupla estrela com transformador a três colunas, aumenta os custos da montagem, em virtude da necessidade de uma bobina de absorção. Por outro lado, um transformador a cinco núcleos com retificador hexafásico de meia onda, elimina o uso de tal bobina, diminuindo os custos, além de formar um conjunto mais compacto [12]. Vale ressaltar, que o retificador hexafásico, quando utilizado com transformador a cinco colunas, apresenta as mesmas características da montagem dupla estrela com transformador a três colunas.

Tendo em vista as considerações acima, concluiu-se que, uma fonte, consistindo de um transformador a cinco colunas, com o secundário conectado a um retificador hexafásico de meia onda e que utilize o controle seletivo no primário, é a solução mais adequada para o problema estudado. Como este tipo de controle utiliza tiristores no primário do transformador, os mesmos devem ser conectados em triângulo.

Em seguida, apresenta-se um quadro com o resumo das vantagens e desvantagens das técnicas de regulação analisadas.

QUADRO RESUMO DAS TÉCNICAS DE REGULAÇÃO

TÉCNICA DE REGULAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<p>CONTROLE DE FASE</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não usa derivação no transformador 2. Circuito de comando relativamente simples 3. Precisão no controle da tensão de saída. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Redução no fator de potência e aumento no nível dos harmônicos quando o ângulo de disparo aumenta. 2. Precisa de indutância de filtragem. 3. Não é aconselhável para potências elevadas.
<p>CONTROLE MISTO (Circuito Básico)</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto fator de potência, desde que K seja pequeno 2. Utiliza apenas uma derivação no transformador 3. Precisão no controle da tensão de saída. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Faixa de controle limitada. 2. Precisa de indutância de filtragem. 3. Instante de bloqueio dos tiristores afetado pelo fator de potência da carga. 4. Produz distorção na saída.
<p>(Circuito Modificado)</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Independência do fator de potência da carga. 2. Menor distorção na saída em relação ao circuito básico. 3. Circuito de comando mais simples do que o circuito básico. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumento das perdas com relação ao circuito básico. 2. Precisa de indutância de filtragem. 3. Pequena faixa de controle, embora maior que o circuito básico.

continua

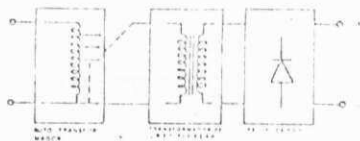
continuação

TÉCNICA DE REGULAÇÃO

VANTAGENS

DESVANTAGENS

DERIVAÇÃO A CONTATOS
MECÂNICOS

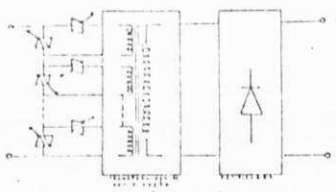


1. Baixo nível de harmônicos
2. Não precisa de indutância de filtragem.

4. Impossibilidade do uso de triacs.

1. Utiliza um auto-transformador além da mudança de derivações
2. Manutenção elevada do TCD
3. Resposta lenta na mudança de tensão
4. Baixo fator de potência.

DERIVAÇÃO ADITIVA OU
SUBTRATIVA



1. Alto fator de potência
2. Baixo nível de harmônicos
3. Não precisa de indutância de filtragem.

1. Descontinuidade no controle da tensão de saída
2. Usa muitos tiristores para efetuar um controle mais fino
3. Confiabilidade reduzida por utilizar tiristores em série
4. Precisa compensar a queda de tensão nos tiristores
5. Utiliza circuito de comando complexo.

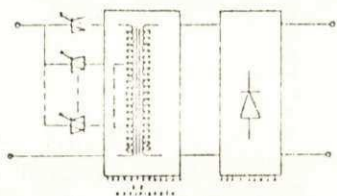
continuação

TÉCNICA DE REGULAÇÃO

VANTAGENS

DESVANTAGENS

DERIVAÇÃO SELETIVA



1. Alto fator de potência
2. Baixo nível de harmônicos
3. Não precisa de indutância de filtragem
4. Circuito de comando relativa
mente simples.

1. Descontinuidade no controle da tensão de saída
2. Utiliza um grande número de derivações, para efetuar um controle mais fino.

CAPITULO IV

A FONTE REGULADA

INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram estudadas as possibilidades de realização de uma fonte de baixa tensão fornecendo corrente elevada, tendo-se concluído que a regulação da mesma deveria ser no primário.

Analizadas as diversas possibilidades de regulação no primário do transformador, concluiu-se que, nesse caso, a regulação com derivação seletiva apresenta vantagens sobre os outros tipos.

A ligação dos tiristores no primário, pode ser efetuada de várias maneiras. A ligação estrela ou triângulo com tiristores em triângulo apresentaram melhores características para o caso do retificador hexafásico com bobina de absorção, ou com transformador a cinco colunas. Contudo, diante das limitações impostas pelos sensores de correntes (necessidade de um ponto comum na ligação estrela), conforme discussão mais adiante, torna-se impossível o uso de outra configuração que não seja a conexão do primário em estrela com tiristores em estrela.

As características da fonte a ser desenvolvida são as seguintes:

- . Potência: 0,6 Kw
- . Tensão de entrada: 80 a 110 VCA

- . Tensão média de saída: 2,0 VCC (estabilidade com ondulação de 4,2%)
- . Frequência de alimentação: variável, com limitação superior em 60 Hz
- . Dispositivo de proteção para desligamento do sistema quando a tensão de alimentação estiver fora dos limites permissíveis.

Para a manutenção de um valor médio de 2,0 VDC na saída da fonte, é necessário um valor de pico de 2,1V (retificador hexafásico). Com isso, é obedecida a especificação do fabricante (2,1 VCC), tendo em vista acarretar uma diminuição na eficiência da célula se a tensão na mesma for maior do que 2,1 V.

Tendo em vista as variações de tensão gerada, a necessidade de uma regulação da tensão de saída torna-se evidente. A figura 4.1 mostra o princípio de regulação utilizado.

A regulação é feita no primário do transformador através de triacs. O instante de disparo dos triacs, necessita ser sincronizado em relação à alimentação. A sincronização pode ser feita em relação à tensão. Entretanto, se o sincronismo é feito com relação à corrente, o controle torna-se independente do fator de potência.

A detecção da passagem por zero da corrente, pode ser feita com transformador de corrente (TC) ou com shunt.

O transformador de corrente, produz uma defasagem entre primário e secundário, que depende da carga. Esta defasagem,

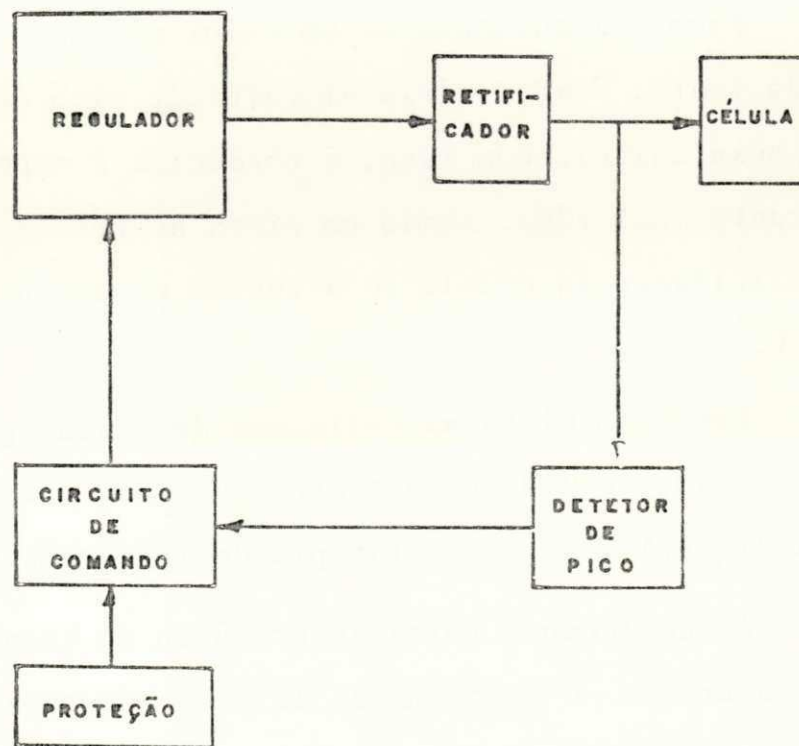


Fig. 4.1 -- DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO

acarreta erro no instante de disparo dos tiristores, causando falhas no circuito. O erro acarretado será tão pequeno quanto menor for a corrente de magnetização do TC. Para evitar tal inconveniente, é necessário a utilização de um transformador de corrente de boa qualidade.

O Shunt, elimina o problema da defasagem, mas impõe o tipo de ligação no primário do transformador de retificação, tendo em vista a necessidade de um ponto comum para aterramento.

Como verificou-se no capítulo anterior (tabela 3.1), as ligações com os tiristores em triângulo, requerem tiristores de menor capacidade. Este tipo de ligação não permite o uso de shunts por causa da inexistência do ponto comum.

Entretanto, diante da indisponibilidade de um transformador de corrente com tais características (corrente de magnetização muito pequena), tornou-se impossível a utilização de outras ligações no primário do transformador de retificação, a não ser a ligação estrela com tiristores em estrela.

Por outro lado, diante da falta de um transformador a cinco colunas, optou-se pela utilização de um transformador a três colunas com a finalidade de testar o circuito de comando. A montagem realizada é apresentada na figura 4.2.

4.1 - Circuito de Comando

Um diagrama simplificado do comando do sistema é indicado na figura 4.3. Os pulsos de disparo dos triacs são sincro

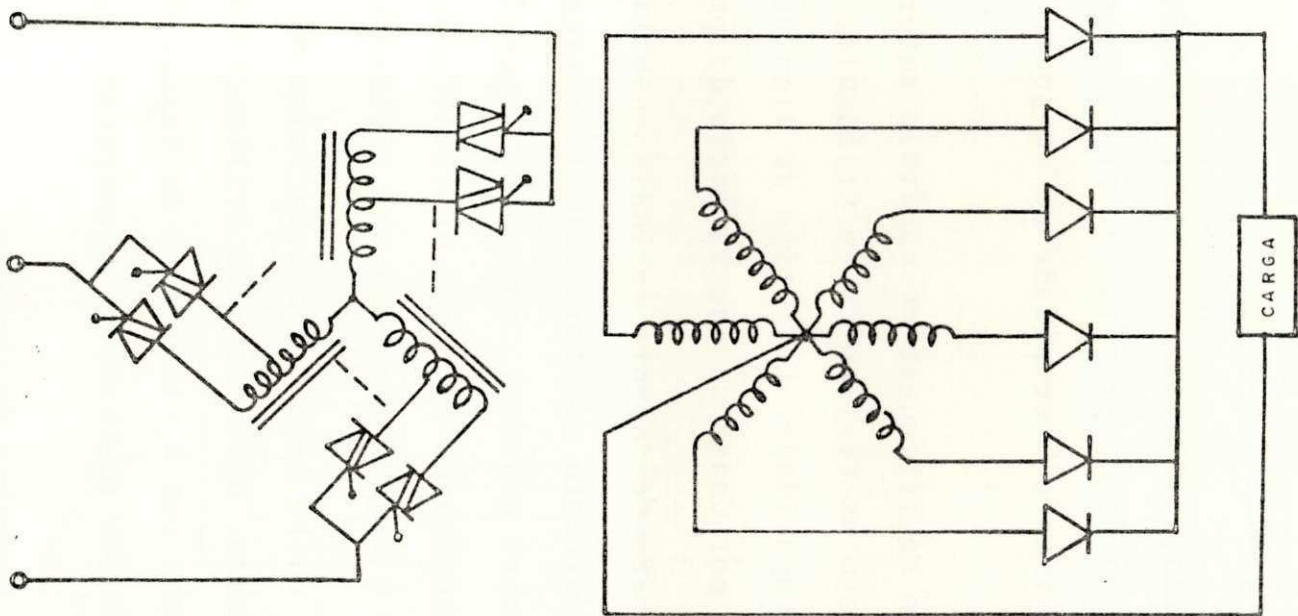


Fig. 4.2 — CIRCUITO DE POTÊNCIA DA FONTE

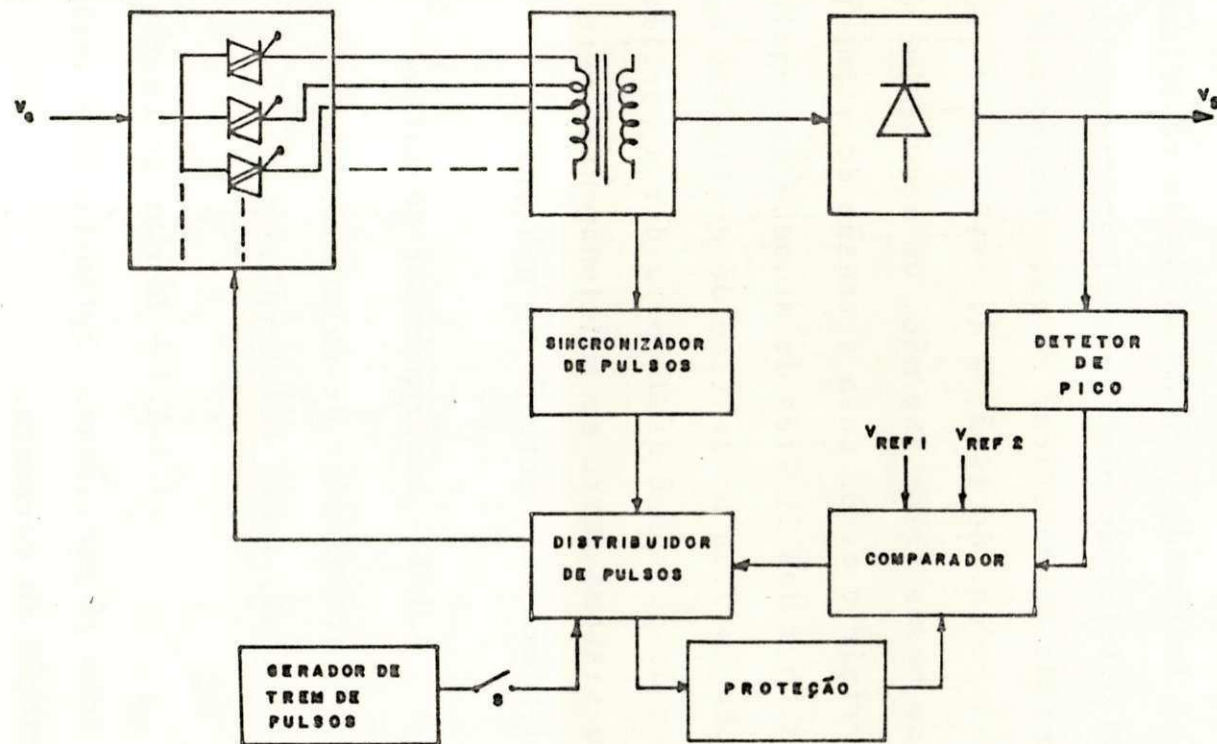


Fig. 4.3 — DIAGRAMA SIMPLIFICADO DO CIRCUITO DE COMANDO

nizados com a passagem por zero da corrente do primário do transformador, como já mencionado. Um detetor de zero, gera os pulsos sincronizados, de maneira a determinar o instante de disparo dos triacs (sincronizador de disparo).

A tensão de pico de saída do retificador, é detectada por um detetor de pico, o qual aciona um circuito comparador no sentido de verificar se esta tensão está dentro dos limites desejados. Se está, o distribuidor de pulsos mantém o disparo do mesmo triac. Se não, um novo triac é acionado a fim de corrigir o erro. Caso a tensão de alimentação do sistema esteja fora dos limites de atuação do regulador, um circuito de proteção atua no sentido de desligá-lo da rede. Um gerador de trem de pulsos é usado para dar a partida ao sistema. Tão logo o sistema entre em funcionamento, este circuito de partida é desconectado através de uma chave.

4.1.1 - Sincronizador de pulsos

O sincronizador de pulsos determina o instante de disparo dos triacs, sendo constituído por:

4.1.1.1 - Sensor de corrente

Como já mencionado, optou-se pela utilização de shunts na detecção da corrente.

Como o shunt é colocado em série com a fase do transformador, o valor dessa resistência deverá ser tal que provoque o mínimo de perdas. Devido a necessidade de um ponto comum

para aterramento, colocou-se os shunts no cruzamento das fases do transformador como mostra a figura 4.4.

4.1.1.2 - Detector do zero de corrente

A detetação do zero de corrente é feita basicamente através de comparadores como mostra a figura 4.5. O sinal alternado do "shunt" leva a utilização de dois comparadores para a detecção do zero, um para o ciclo positivo, e outro para o ciclo negativo. Quando o sinal da corrente está no ciclo positivo, um dos comparadores está saturado, enquanto que no ciclo negativo, a saturação ocorre no outro comparador.

A sensibilidade dos comparadores é ajustada através dos potenciômetros R_1 e R_2 .

Os buffer's na saída dos comparadores diminuem as impedâncias de saída, a fim de diminuir a atenuação nos pulsos derivados pelo circuito RC.

A figura 4.6 mostra as formas de onda nos diferentes pontos do circuito.

Os comparadores utilizados devem possuir uma tensão de excitação tão próxima de zero quanto possível, a fim de evitar grandes deslocamentos em relação ao ponto zero dos pulsos gerados no circuito OU e que servem para o disparo dos triacs. A figura 4.7 mostra esse deslocamento no caso de dois sinais de níveis diferentes obtidos através do sensor.

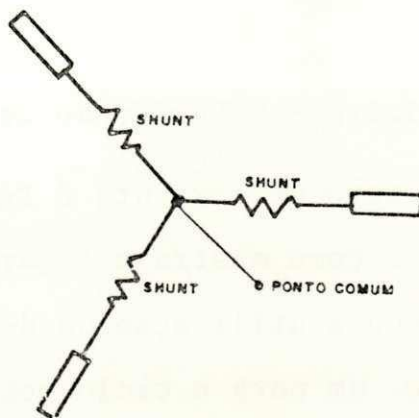


Fig. 4.4 — LIGAÇÃO DOS SHUNTS NO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR

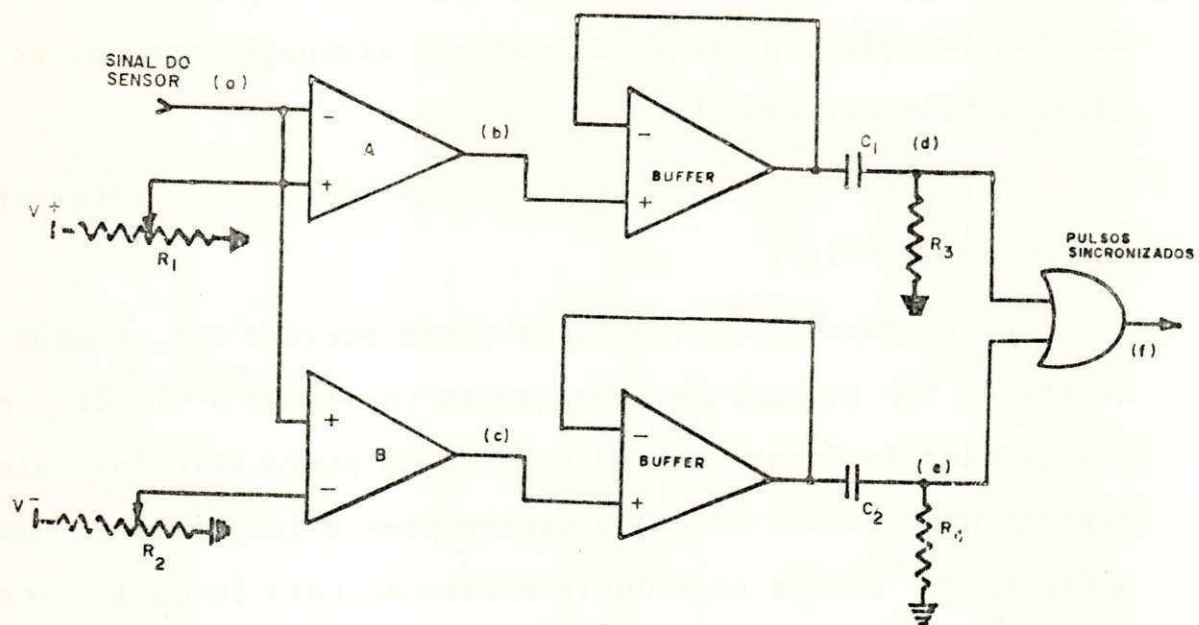


Fig. 4.5 — CIRCUITO DETETOR DE ZERO

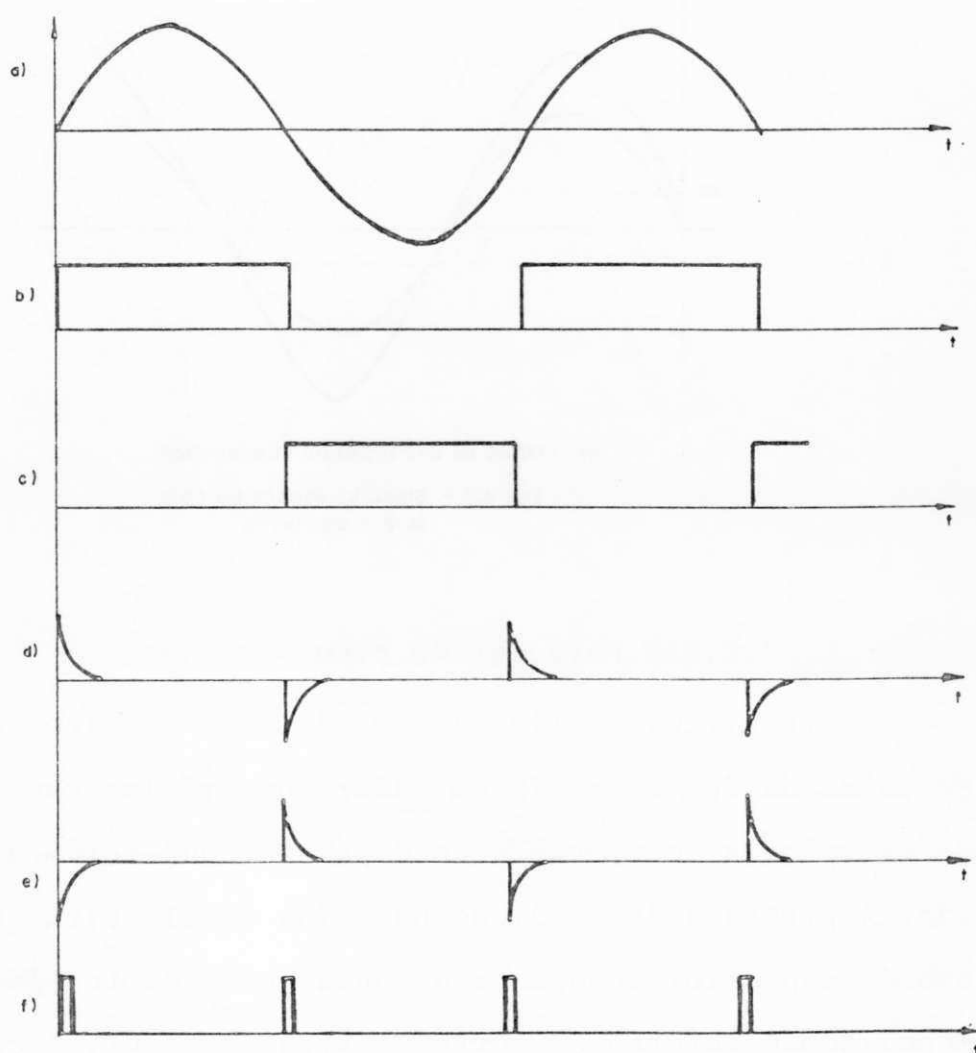
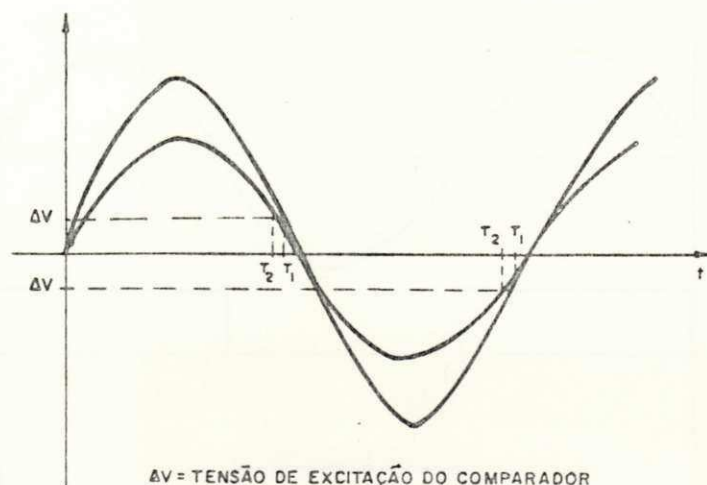


Fig. 4.6 — FORMAS DE ONDA NO CIRCUITO DETECTOR DE ZERO

- a) SINAL DO SENSOR (SHUNT)
- b) SAÍDA DO COMPARADOR A
- c) SAÍDA DO COMPARADOR B
- d) e) PULSOS DIFERENCIADOS
- f) PULSOS SINCRONIZADOS



ΔV - TENSÃO DE EXCITAÇÃO DO COMPARADOR

Fig. 4.7 - SINAL DO SENSOR EM DOIS NÍVEIS DISTINTOS

4.1.2 - Detector de pico

Este circuito, figura 4.8, detecta os picos de tensão de saída da fonte, a fim de poder compará-los com um valor de referência, carregando um capacitor que retém a maior tensão. A presença de um diodo na saída do CI evita que a tensão do capacitor acompanhe as ondulações de tensões da fonte impedindo o retorno de corrente através do CI. A cada período da ondulação de saída o capacitor deve ser descarregado a fim de ser detectado o novo valor. Essa descarga é obtida através de um transistor em paralelo com o capacitor. Como cada novo valor depende do triac disparado, a periodicidade de descarga pode ser a dos pulsos sincronizados com o zero da corrente.

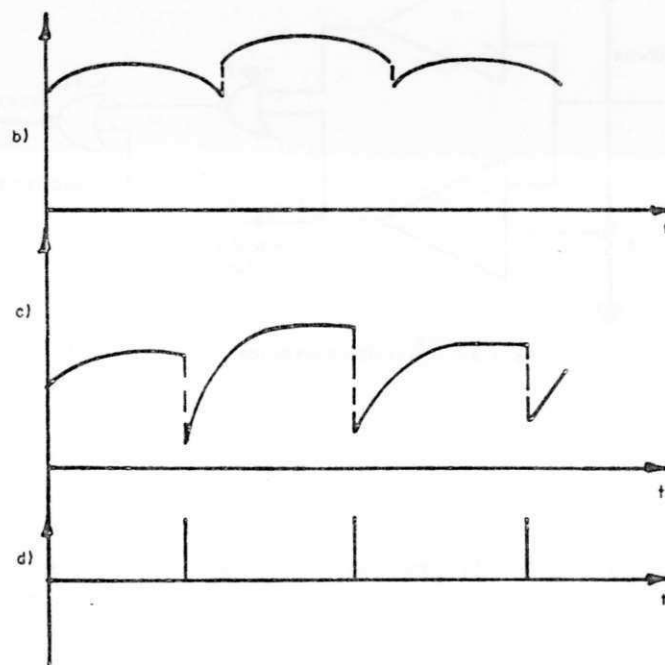
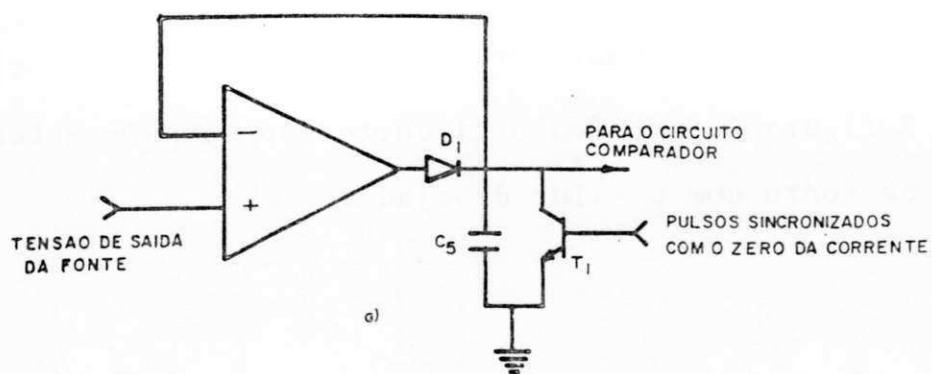


Fig. 4.8 — a) DETECTOR DE PICO
 b) TENSAO DE SAIDA DA FONTE
 c) TENSAO DE SAIDA DO DETECTOR DE PICO
 d) PULSOS SINCRONIZADOS COM O ZERO DA CORRENTE

Estes valores dos picos de tensão são levados a um comparador a fim de serem comparados com os valores de referência desejados.

4.1.3 - Comparador

A figura 4.9 mostra o circuito que compara a tensão de saída da fonte com o valor desejado.

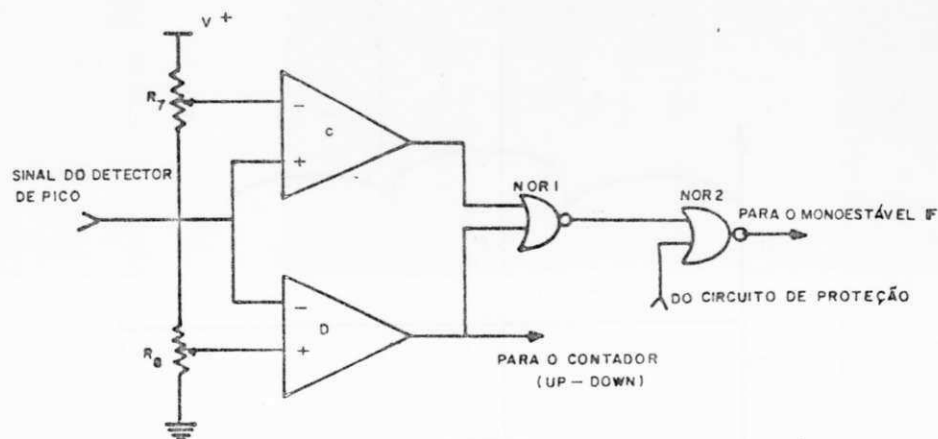


Fig. 4.9 — CIRCUITO COMPARADOR

Quando o pico de tensão de saída da fonte é maior do que 2,1 V, a saída do comparador C vai para um, enquanto que a saída do comparador D continua em zero. A situação será invertida se a tensão for menor do que 2,0. As saídas dos dois comparadores só serão ambas nulas se a tensão de pico de saída da fonte estiver entre 2,0 e 2,1 V. Sendo assim, a saída

do circuito será '0' quando a tensão da fonte for satisfatória, e será '1' quando for necessário fazer a correção (NOR 1). A saída do comparador é ainda modificada em dependência de um sinal do circuito de proteção, ou seja, quando a tensão de alimentação estiver fora dos limites de controle, a saída do circuito de proteção (entrada 2 da porta NOR 2) muda de '0' para '1'.

4.1.4 - Distribuidor de pulsos

Se o nível de tensão de pico estiver dentro dos limites desejados, o distribuidor de pulsos deve manter o disparo do mesmo triac, se não, um novo triac deve ser disparado para efetuar a correção. O distribuidor de pulsos é composto basicamente de um contador de pulsos e de um decodificador que operam em função de sinais externos indicando se a contagem é para cima ou para baixo a fim de selecionar o triac adequado e se deve existir ou não pulsos na saída do distribuidor para o acionamento dos triacs.

4.1.4.1 - Contador de pulsos

A mudança na saída do contador de pulsos depende de haver ou não inibição a partir de um monoestável, como será explicado mais adiante. Já foi visto anteriormente que a saída do comparador D é zero quando a tensão de pico da fonte estiver acima de 2,0 V e 1 quando estiver abaixo. A saída deste comparador é que define o sentido da contagem do contador,

ou seja, se for "0" a contagem é para baixo, se for "1" a contagem é para cima. Os pulsos resultantes dessa contagem, são transmitidos ao decodificador através das saídas A, B, C, e D do contador. Se a tensão da fonte é satisfatória, a saída do comparador D é "1" indicando uma contagem para cima. Esta contagem não é efetuada tendo em vista que no inibidor do contador (pino 15) não existe pulsos mantendo as saídas do contador inalteradas (figura 4.10).

4.1.4.2 - Decodificador

Como mostra a figura 4.11, este dispositivo contém dezesseis endereços de saída, porém, apenas um desses endereços é selecionado de cada vez, ou seja, apenas uma das saídas tem pulsos. A seleção da saída do decodificador é feita através das entradas A, B, C e D como mostra a tabela 4.1. A existência de pulsos na saída do decodificador depende do estado do inibidor. Quando o inibidor é "0" a saída é "1" e vice-versa.

4.1.5 - Monoestáveis de inibição

Os monoestáveis indicado na figura 4.12, têm pulsos de saída complementares, ou seja, quando (E) está em "1", (F) está em "0" e vice-versa.

O monoestável E inibe a saída do decodificador. O monoestável F inibe a contagem do contador, evitando a mudança do triac a ser disparado, em dependência do sinal do compara

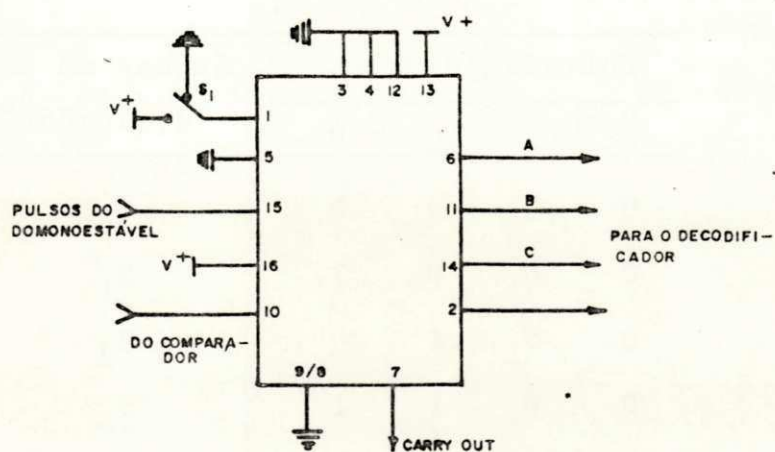


Fig. 4.10 CIRCUITO CONTADOR

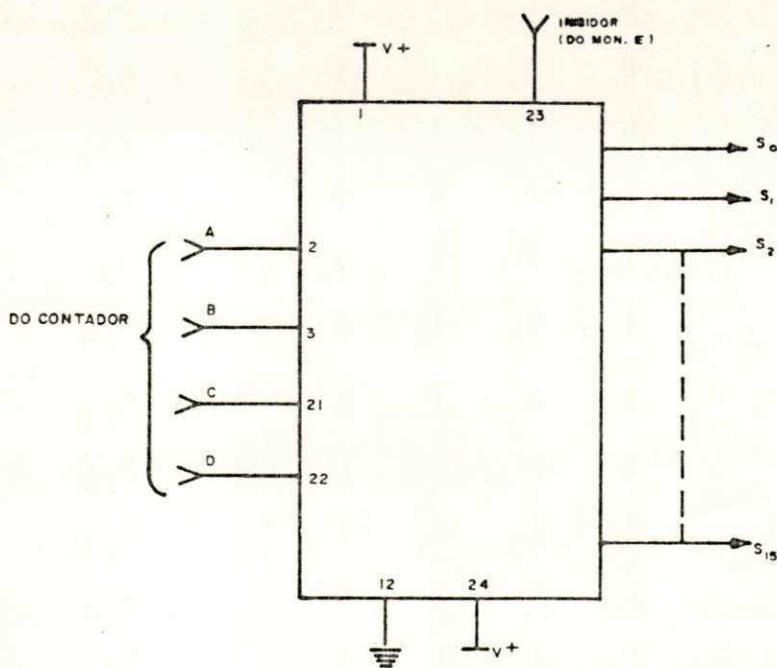


Fig. 4.11 - DECODIFICADOR

dor. Se este for '1', ou seja, se o nível de tensão for insatisfatório, haverá pulsos na saída do monoestável F no sentido de efetuar mudanças na saída do contador.

Tabela 4.1

Entrada de Dados				Saídas do Decodificador
A	B	C	D	
0	0	0	0	S ₀
0	0	0	1	S ₁
0	0	1	0	S ₂
0	0	1	1	S ₃
0	1	0	0	S ₄
0	1	0	1	S ₅
0	1	1	0	S ₆
0	1	1	1	S ₇
1	0	0	0	S ₈
1	0	0	1	S ₉
1	0	1	0	S ₁₀
1	0	1	1	S ₁₁
1	1	0	0	S ₁₂
1	1	0	1	S ₁₃
1	1	1	0	S ₁₄
1	1	1	1	S ₁₅

Se este for '0' (nível de tensão satisfatório), não haverá pulsos na saída do monoestável mantendo a saída do contador inalterada. A figura 4.13 mostra as formas de onda do circuito. Os circuitos R_5C_3 e R_6C_4 servem para ajustar a largura de pulsos dos monoestáveis.

4.1.6 - Gerador de trem de pulsos

Tendo em vista a não existência da corrente no instante de acionamento, utiliza-se um trem de pulsos para disparar os triacs na ausência dessa corrente. Depois da partida, este circuito é omitido do sistema através da chave S_2 a qual é acionada por um relé gatilhado manualmente, como mostra a figura 4.14.

4.1.7 - Estágio de potência

Destina-se a possibilitar um aumento na potência do sinal de disparo dos triacs, figura 4.15.

4.1.8 - Circuito geral e diagrama no tempo do circuito de comando

A figura 4.16 mostra o circuito geral para uma das fases do transformador. Na figura 4.17 é apresentado o diagrama no tempo do circuito de comando. Para os quatro primeiros pulsos de sincronismo houve mudança de triacs em virtude da entrada de dados do monoestável F (saída da porta NOR 2) ter sido considerada '1'. Depois disso, a entrada de dados passa pa

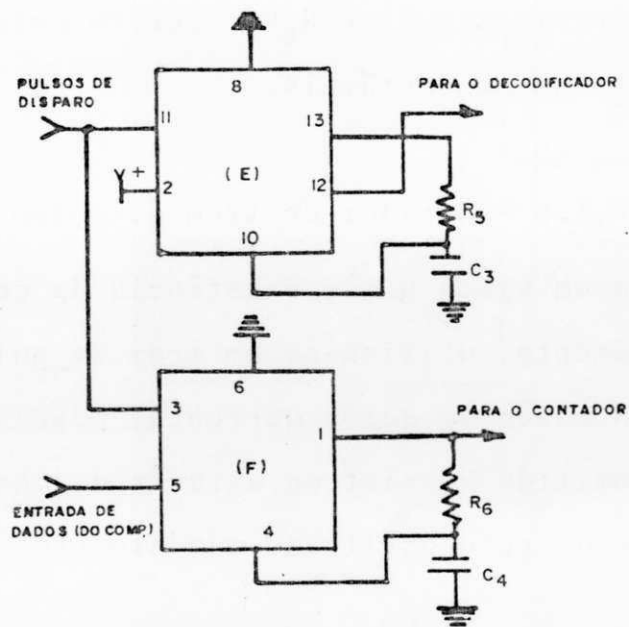


Fig. 4,12 — MONOESTÁVEIS

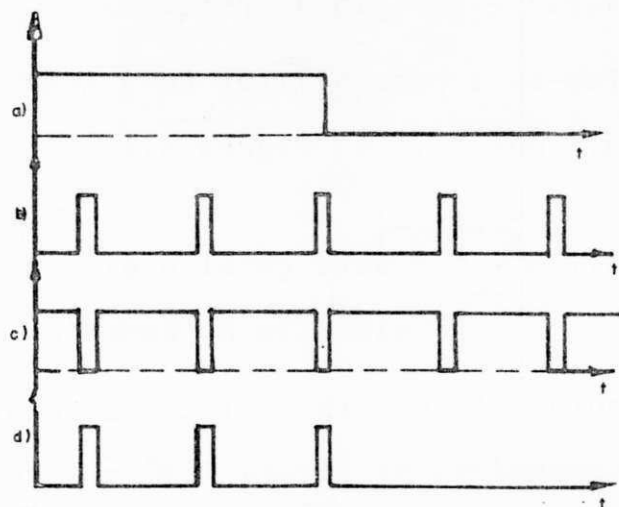


Fig. 4,13 — a) ENTRADA DE DADOS
 b) PULSO DE DISPARO
 c) SAÍDA DO MONOESTAVEL E
 d) SAÍDA DO MONOESTAVEL F

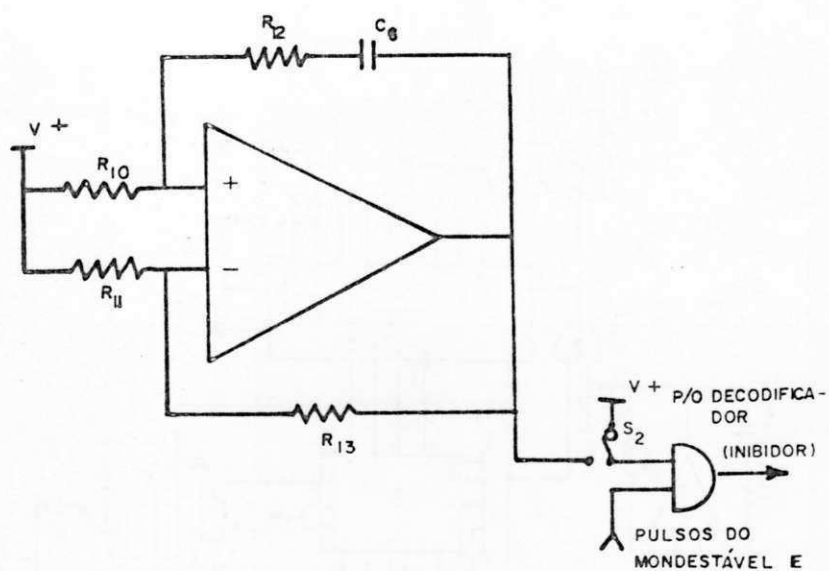


Fig. 4.14 — GERADOR DE TREM DE PULSOS

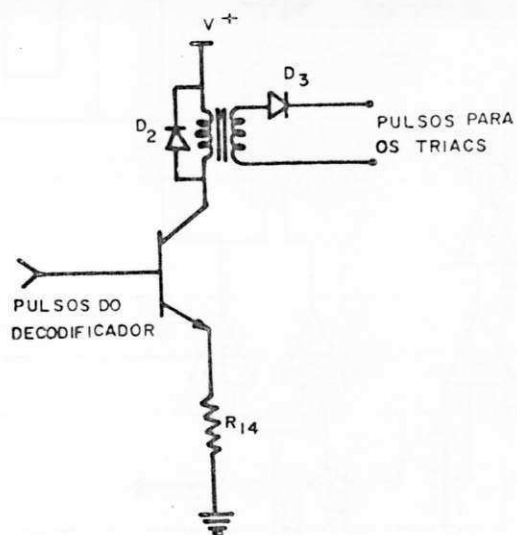


Fig. 4.15 — ESTÁGIO DE POTÊNCIA

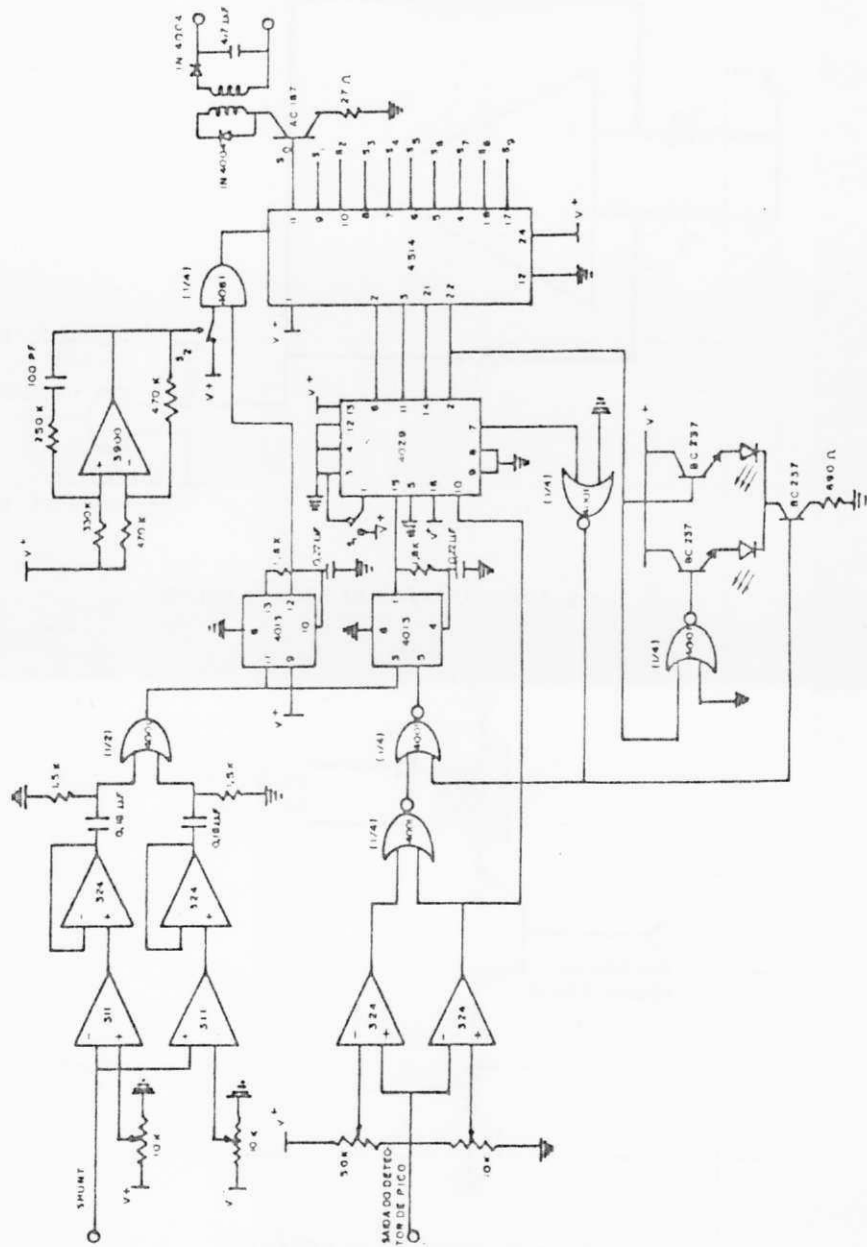


Fig. 4.16 - ESQUEMA COMPLETO DO CIRCUITO DE COMANDO

ra o estado '0' mantendo os pulsos em um mesmo triac, o qual corresponde a uma mesma saída do decodificador.

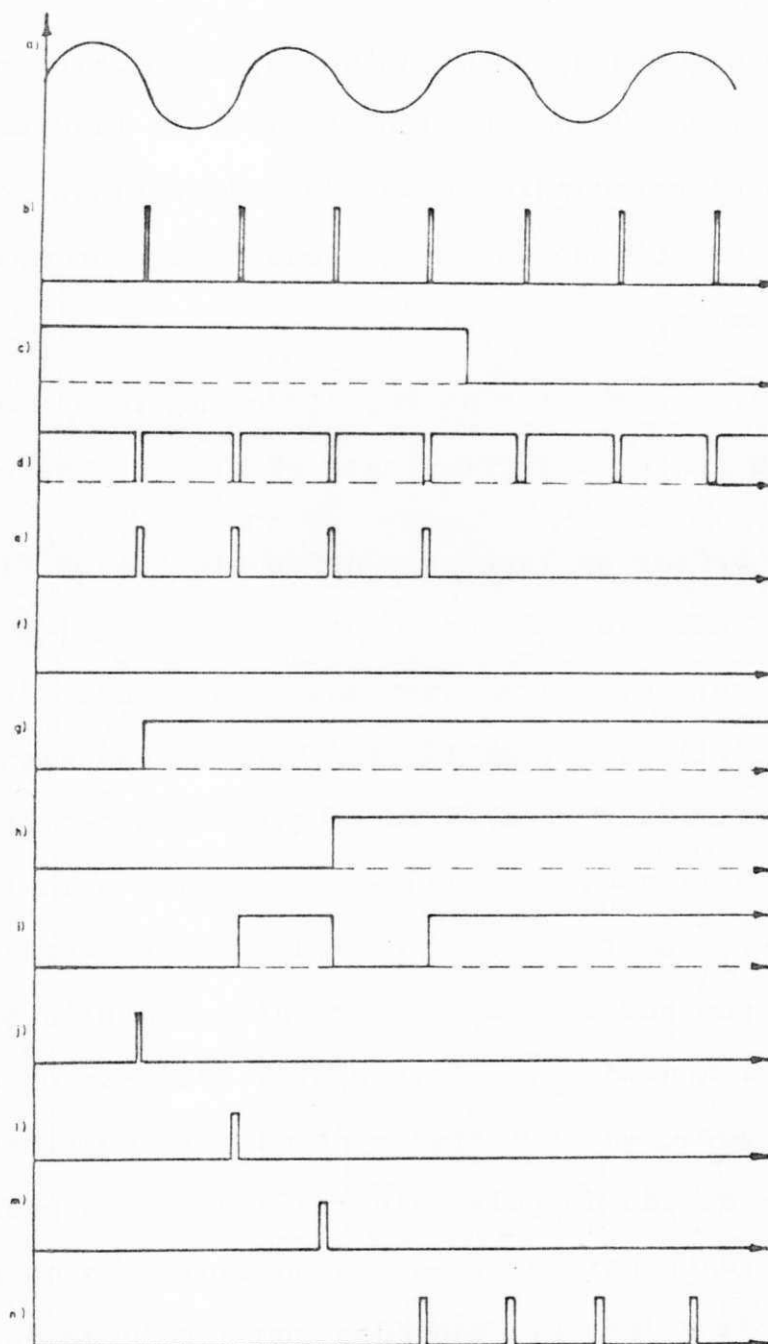


Fig. 417 — DIAGRAMA NO TEMPO DO CIRCUITO DE COMANDO

- | | |
|----------------------------|--|
| a) SINAL DE SENSOR (SHUNT) | g) SAÍDA B DO CONTADOR |
| b) PULSOS SINCRONIZADOS | h) SAÍDA C DO CONTADOR |
| c) ENTRADA DE DADOS | i) SAÍDA D DO CONTADOR |
| d) SAÍDA DO MONOESTÁVEL E | j) SAÍDA S ₄ DO DECODIFICADOR |
| e) SAÍDA DO MONOESTÁVEL F | k) SAÍDA S ₅ DO DECODIFICADOR |
| f) SAÍDA A DO CONTADOR | l) SAÍDA S ₆ DO DECODIFICADOR |
| | m) SAÍDA S ₇ DO DECODIFICADOR |
| | n) SAÍDA S ₈ DO DECODIFICADOR |

CAPITULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CONCLUSÕES

O esquema apresentado no capítulo anterior, foi realizado experimentalmente em laboratório. As figuras de 5.1 a 5.4 mostram as principais formas de onda obtidas, ou seja: tensão retificada, tensão de fase, queda de tensão nos diodos, respectivamente.

Para se obter bons resultados na regulação da tensão de saída da fonte, é interessante observar os seguintes pontos:

- . Devido ao intervalo de comutação dos tiristores (instante de mudança dos tiristores devido a inversão da corrente), descontinuidades na tensão de saída (figura 5.1), são inevitáveis. Este inconveniente pode ser minimizado através de ajustes no detector de zero da corrente, reduzindo-se ao mínimo o instante de disparo dos tiristores em relação aos instantes de passagem por zero dessa corrente, conforme observado experimentalmente (figura 5.2). Pode-se observar nessa figura, que o instante de disparo do tiristor ocorre na descida do pulso sincronizado com a passagem de corrente por zero. As descontinuidades na tensão de saída podem ser reduzidas com a redução da largura do pulso sincronizado. Entretanto, mudanças nos valores da corrente decorrentes das mudanças de derivações, podem acarretar pulsos de disparos em instantes inde

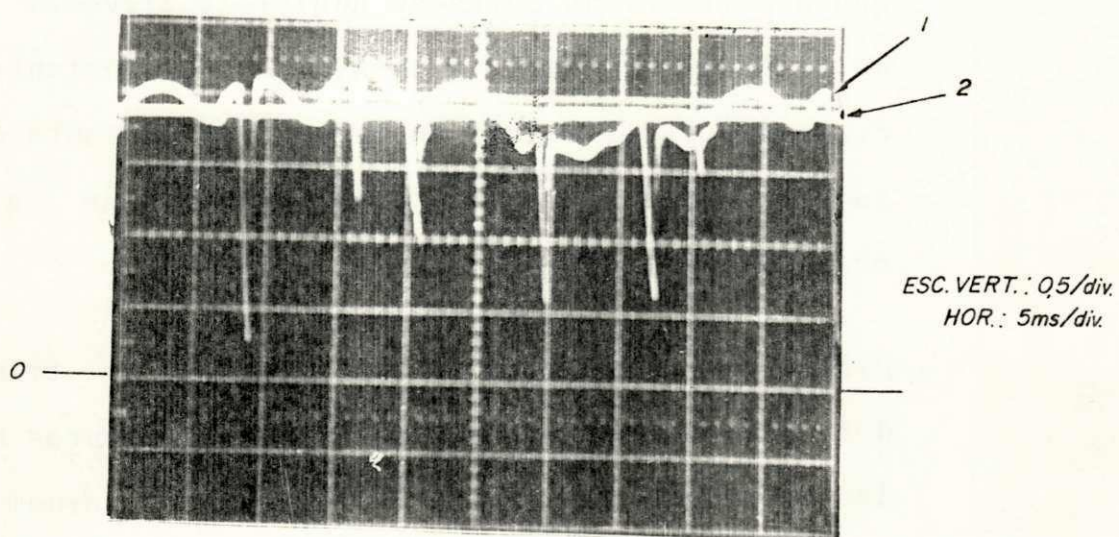


Fig. 5.1 - TENSÃO DE SAÍDA DA FONTE
1 - VALOR INSTANTÂNEO
2 - VALOR MÉDIO

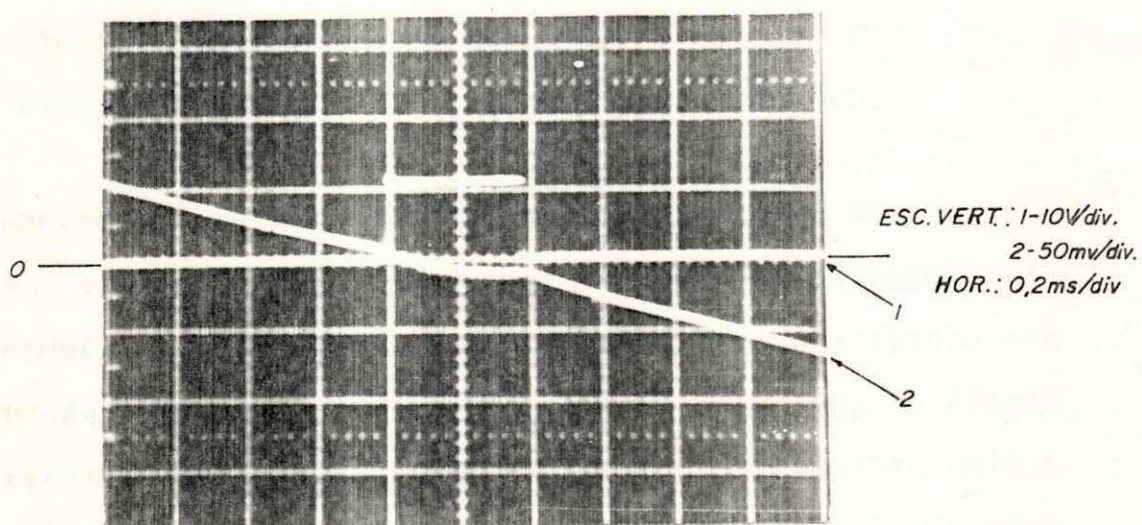


Fig. 5.2 - PASSAGEM POR ZERO
1 - PULSO SINCRONIZADO
2 - CORRENTE NO SHUNT

sejáveis (disparo de tiristor em uma derivação, antes que a corrente na outra se anule), e provocar falhas no sistema. Portanto, a proximidade do instante de disparo dos tiristores em relação ao instante da passagem por zero da corrente deve ser bem ajustada obedecendo um certo limite.

- . Diferenças na relação de transformação do transformador (para uma mesma derivação), ou diferenças nas quedas de tensão dos diodos retificadores, tornam deficiente o controle da tensão de saída, com uma evidente redução na faixa de controle, visto que cada fase do transformador trabalhará em derivações diferentes para uma mesma tensão de saída. Para evitar este inconveniente, pode-se utilizar apenas uma das fases do transformador como referência para o controle desta tensão. Nesse caso, a forma de onda da tensão retificada terá picos com valores diferentes (figura 5.1).

Desde que as diferenças mencionadas acima (relação de transformação do transformador, queda de tensão nos diodos) não ocorram, esses inconvenientes desaparecem. A figura 5.3. mostra as quedas de tensões nos diodos utilizados na montagem. A disponibilidade de apenas 6 (seis) diodos não permitiu uma seleção adequada dos mesmos.

A figura 5.4 mostra as tensões no secundário do transformador antes da retificação.

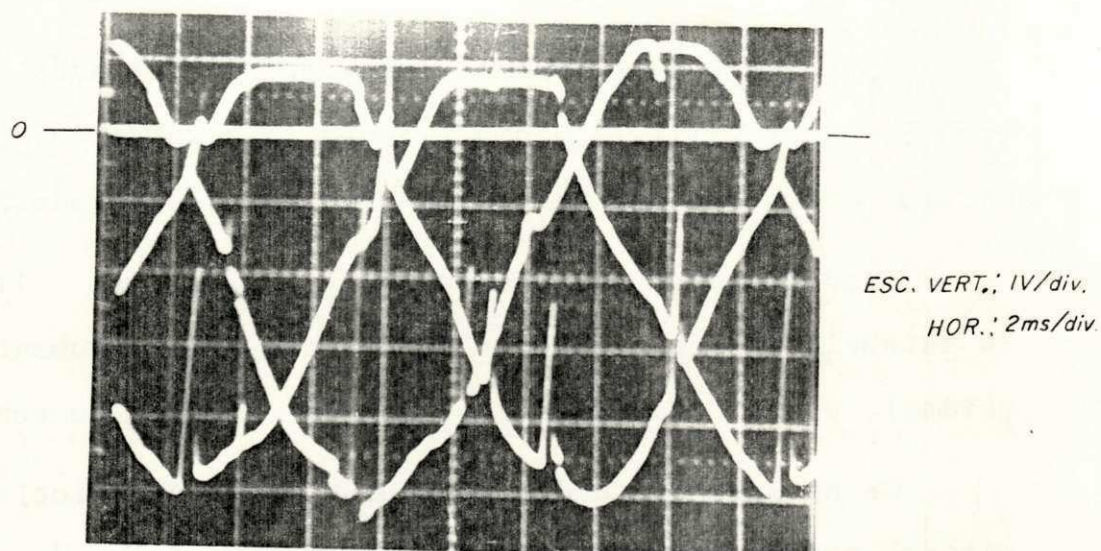


Fig. 5.3 — QUEDA DE TENSÃO NOS DIODOS

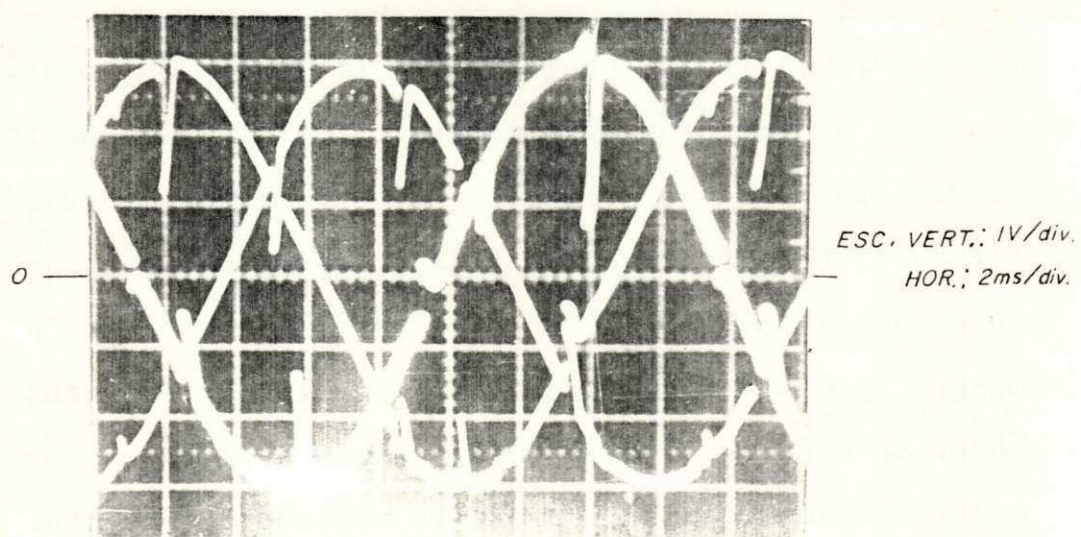


Fig. 5.4 — TENSÃO DE FASE PRIMÁRIA

5.1 - Funcionamento em Transitório

As variações de tensão, foram obtidas através de um transformador variável a uma frequência fixa de 60 Hz. Nesse ensaio, o sistema apresentou os resultados esperados.

Para a operação em frequência variável, as limitações se estabelecem no desempenho do transformador (aumento das perdas), e nas constantes de tempo do circuito do comando.

Os estudos efetuados mostraram (veja apêndice) que o sistema poderá operar satisfatoriamente na faixa de frequência desejada.

CONCLUSÃO

Para sistemas regulados com baixa tensão na saída, como é o caso na produção de hidrogênio, a regulação de tensão deve ser realizada no primário do transformador regulador. O retificador hexafásico com bobina de interfase é o que apresenta melhor desempenho se os tiristores no primário do transformador estiverem conectados em triângulo. Entretanto, o retificador hexafásico de meia onda, quando utilizado com transformador a cinco colunas, apresenta o mesmo desempenho. Para isso, entretanto, o primário deve estar conectado em estrela.

A regulação por controle de fase e controle misto, exige a utilização de um reator de filtragem, o que eleva os custos dos mesmos devido a grande quantidade de ferro utilizada

para a confecção da bobina de filtragem. Não sendo necessário o reator de filtragem, entretanto, uma análise de aspecto econômico mostra que sua utilização é viável em algumas fontes de potência.

A regulação seletiva apresenta boas características em bora use um número um pouco maior de tiristores em relação a outras possibilidades. Este tipo de regulação necessita que as relações de transformação tenham boa precisão nas fases do transformador e que os diodos tenham quedas de tensões aproximadas, para que o desempenho do sistema seja adequado.

A título de sugestão para continuação do trabalho desenvolvido, indicamos a realização do estudo comparativo, de forma generalizada e para diferentes aplicações dos reguladores considerados, inclusive, observando os aspectos econômicos e realizando uma comparação experimental dos mesmos.

REFERÊNCIAS

- 01 - ARAÚJO, T.S., "Potencial de mercado para fontes não convencionais de energia no Brasil - 2.000", FINEP/COPPE 1983.
- 02 - CEBALLOS, J., BASTOS, E.; & LUCENA, G.; "Monogramas de potencial eólico para Campina Grande", XXXI-SBPC, Fortaleza, 1979.
- 03 - BAMBERGER, C.E. & BRAUNSTEIN, J.; "Hidrogênio, um elemento versátil", Division de Quimica del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL), nº 94, mazo/abril 1975.
- 04 - OHLWEILER, O.A.; "Teoria e Prática de Análise Quantitativa Inorgânica", Editora Universidade de Brasília, vol 3, 1968.
- 05 - FINEP - "Amônia eletrolítica - Estudo da viabilidade econômica", dezembro de 1976.
- 06 - CODETEC - Companhia de Desenvolvimento Tecnológico - "Eletrolizador Codeletro", julho de 1980.
- 07 - McCOLL, J.D. and WHITAKER, P.; "Service experience With Thyristors", IEE Conf. Publicacion Power Application of Controllable Semiconductor Devices, pp. 102--110, 1965.
- 08 - FICKLER, R.A., and MURISON, G.E.; "Power supplies for the electrochemical industry - an economic and performance

- comparasion between diodes and thyristors", IEEE Transaction on Industry Applicadions, vol. IA-20, n° 1, pp. 74-79, 1984.
- 09 - SÉGUIER,G.; WIART,A.; ROMBAUT,C.et DUMOULIN,J.L.; "Association gradateur - transformateur abaisseur diodes destinee a l'obtention de basses tensions continues variables", Révien Générale d'Eletricité, tome 89, n° 1, pp. 37-48, janvier 1980.
- 10 - SÉGUIER,G.; "Comparaison générale des montages redresseurs application aux montages alimentés par un réseau triphasé", Révien Générale d'Eletricité, tome 76, n° 12, pp. 1471-1488, decembre 1967.
- 11 - ROMBAUT,C.; "Étude du fonctionnement et des caracteristiques d'un ensembles gradateur - transformateur - diodes", Révien Générale d'Eletricité, tome 89, n° 1, pp. 39-44, 1980.
- 12 - DUMOULIN,J.L.; "Groupes redresseurs régulés JISIL R", Révien Générale d'Eletricité, tome 19, n° 1, pp. 47-48, 1980.
- 13 - McVEY,E.S. and WEBER,R.E.; "Design data for a multiple output DC regulator system", IEEE Transactions on Industry and General Applications, vol. IGA-3, pp. 337-340, 1967.
- 14 - THOMPSON,R.; "A Thyristor alternating - voltage regulator", IEEE Transaction on Industry and General Appli

- cations, vol. IGA-4, pp. 162-166, 1968.
- 15 - LLOYD, S.; "Time-series analysis of thyristor on regulator", proc. IEE, vol. 119, n° 6, pp. 755-757, 1972.
- 16 - SERVETAS, E.C. and VLACHAKIS, A.V.; "A new voltage regulator using thyristor", IEEE Transaction on Industry Electronic and Control Instrumentacion, vol. IECI-28, n° 2, pp. 140-145, 1981.
- 17 - LIRA, H.A.; FERNANDEZ, J.L.S. y FLORES, M.M.; "Regulador de voltage de C.A usando tiristores y principio de auto-transformador", Anais do 1º Congresso Latinoamericano de Automática, Soc. Bras. de Automática, Campina Grande, pp. 333 - 433, 1984.
- 18 - AMOR, C.F.; IEE Conference Publication, n° 53, part. 2 (discussion), Power thyristors and the applications, pp. 59-61, 1969.
- 19 - GALLOWAY, J.H.; "Power factor on load characteristic for thyristor electrochemical rectifiers", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-13, n° 6, pp. 607-611, 1977.
- 20 - KAGANOV, I.L.; "Eletrônica Industrial", Editora MIR, Moscou, 1971.
- 21 - McMURRAY, W.; "A comparative study of symmetrical three-phase circuits for phase-controlled AC motor drives", IEEE Transactions Industry Applications, vol. IA-10, pp. 403-411, may/june 1974.

- 22 - PERRIN, E.M.; "Fundamental operation of rectifiers with thyristor AC power control", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-9, n° 4, pp. 453 - 461 July/August 1973.
- 23 - MASCARIN, R.; "Redresseurs industriels a semi-conducteurs" Editions Eyrolles, 1973.
- 24 - MARTIGNONI, A.; "Transformadores"- Editora Globo, 1979.

APÊNDICE A

TRANSFORMADOR

Os transformadores de potência são projetados para trabalhar a uma determinada frequência (frequência nominal). Quando os mesmos passam a operar em frequências diferentes da frequência nominal, as seguintes grandezas ficam afetadas [24].

- . Perdas no ferro
- . Corrente de excitação
- . Impedância
- . Regulação
- . Rendimento

a) Perdas no ferro

Variam na proporção inversa da frequência, podendo ser aproximadamente avaliadas por:

$$\frac{W_{f1}}{W_{f2}} = \frac{f_2}{f_1}$$

b) Corrente de excitação

A corrente de excitação depende do valor da indução existente no núcleo. Portanto, esta corrente aumenta quando a frequência aumenta e vice-versa.

c) Impedância

A impedância resulta da composição da resistência com a reatância. Portanto, essa impedância diminui ao diminuir a frequência.

d) Regulação

A regulação depende da impedância. Sendo assim, ao diminuir a frequência, a regulação diminui.

e) Rendimento

O rendimento diminui com o aumento das perdas. Neste caso, ao diminuir a frequência, o rendimento diminui.

A fim de ter-se uma idéia de como variam as grandezas características de um transformador, quando alimentado por uma frequência diferente da nominal é apresentado no quadro abaixo.

QUADRO RESUMO (24)

	Perdas no ferro	Perdas totais	Corrente de excitação	Impedância	Regulação
Transformador de 60 Hz operando a 50 Hz	umentam ≈ 18%	umentam ≈ 5%	umenta ≈ 250%	diminui ≈ 14%	diminui ≈ 14%
Transformador de 50 Hz operando a 60 Hz	diminuem ≈ 13%	diminuem ≈ 4%	diminui ≈ 40%	umenta ≈ 10%	umenta ≈ 10%

APÊNDICE B

CIRCUITO DE COMANDO

O efeito da mudança na frequência da corrente, reflete-se na mudança do período dos pulsos sincronizados com o zero da mesma, ou seja, quando a frequência diminui, o período aumenta e vice-versa.

Para um bom desempenho do circuito, é necessário que suas constantes de tempo sejam muito menores do que o período da corrente, sob pena de não haver separação dos pulsos, quando as suas constantes de tempo se tornarem comparáveis com tal período.

Os circuitos integrados, são componentes eletrônicos que operam em grandes faixas de frequência (de zero a centenas de KHz). Portanto, as limitações aparecem apenas nos estágios que possuem constantes de tempo ajustáveis. Esses estágios são os seguintes:

- . Detetor de zero (figura 4.5)
- . Monoestáveis (figura 4.12)
- . Detetor de pico (figura 4.8)

Os valores das constantes de tempo utilizados, são da ordem de μ s. Portanto, esses valores são bem menores do que o período da maior frequência de operação da fonte (16,7 ms).

1. Fontes de Energia
2. Correntes Elétricas
3. Baixa Tensão - Fonte Reguladora.