

PAULO RIBEIRO DE ARRUDA

SÔBRE A CORREÇÃO DO EFEITO
ESTROBOSCÓPICO E DO FATOR DE
POTÊNCIA DAS LAMPADAS FLUORESCENTES

Tese de concurso à Cadeira
nº 36 - Eletrotécnica Geral
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.



1949

11352

FT-352

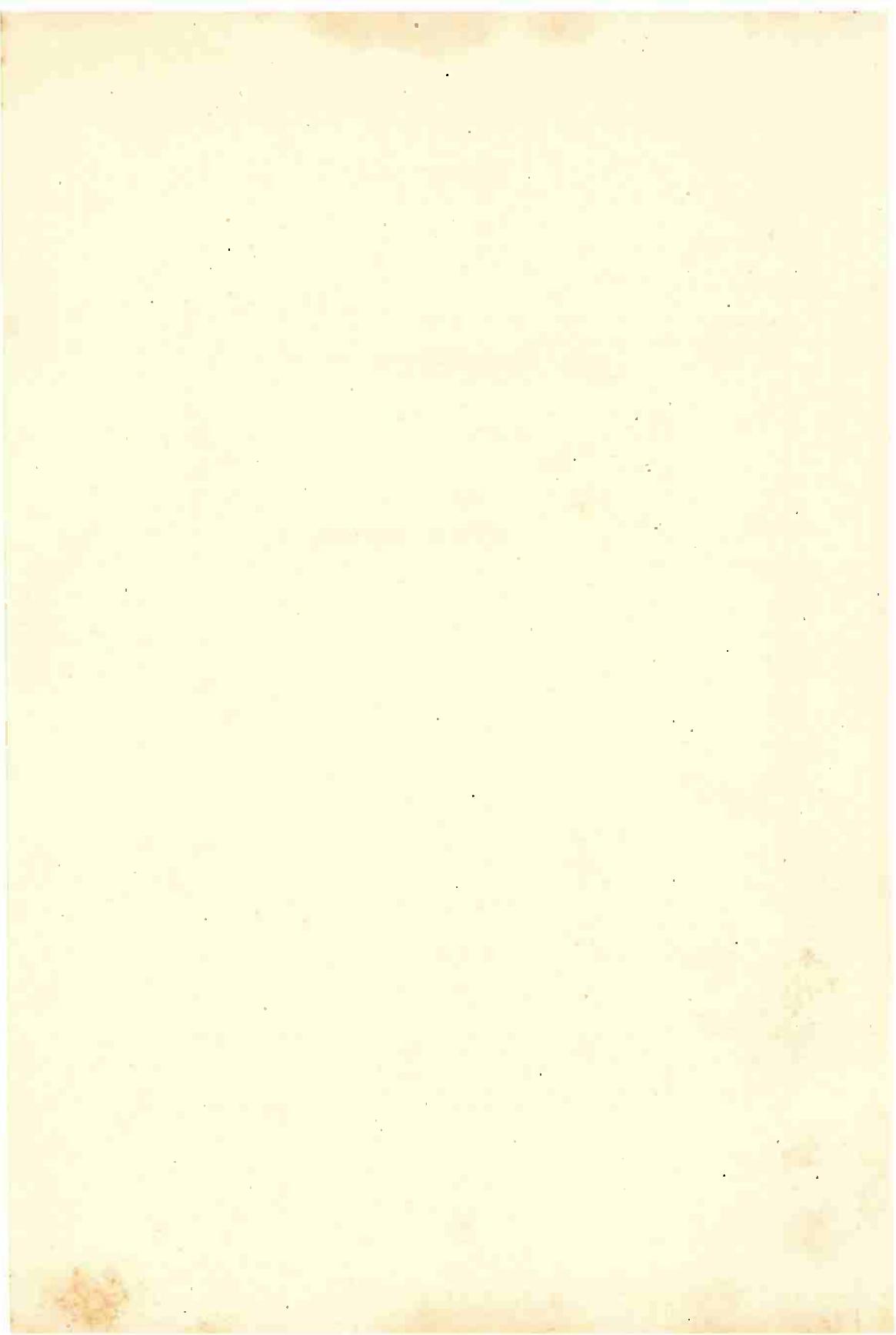
DEDALUS - Acervo - EPBC



31200030904

621.327.3
Or 69s
ft e.d.

A memória de meus
pais e de minha irmã



ÍNDICE

Citação	I
Introdução	III
Capítulo I - Registro do fluxo luminoso com o oscilógrafo catódico e polianalizador	
1.1 - O problema em relação ao polianalizador	1
1.2 - Escolha da célula fotoelétrica	2
1.3 - Circuito "cathode follower"	4
1.4 - Neutralização da corrente inicial	5
1.5 - Efeito da neutralização da corrente inicial sobre o fator de amplificação	7
1.6 - Característica obtida com a válvula fotoelétrica a gás	8
1.7 - Circuito empregado	9
1.8 - Calibração do aparelhamento	10
Bibliografia	17
Capítulo II - Lâmpada à vapor de sódio	
2.1 - Generalidades	19
2.2 - Característica da lâmpada de sódio empregada	20
2.3 - Circuito empregado nas experiências	20
2.4 - Construção dos diagramas espaciais	23
2.5 - Significado do diagrama espacial	24
2.6 - Estudo das condições iniciais e finais	30
2.7 - Conclusões do gráfico da potência e do fluxo	31
2.8 - Interferência produzida pela lâmpada de sódio nas rádiocomunicações	32
2.9 - Gráfico do fluxo luminoso e sua flutuação	32
Bibliografia	37
Capítulo III - Lâmpadas fluorescentes	
3.1 - Generalidades	39
3.2 - Característica da descarga	40
3.3 - Determinação gráfica da característica da descarga deduzida dos ciclogramas	42
3.4 - Conclusões tiradas das características dinâmicas	46
3.5 - Aplicação do gráfico das características dinâmicas	47
3.6 - Estudo da descarga em corrente contínua	48
3.7 - Flutuações espontâneas da tensão nas lâmpadas operadas em C.A.	51
Bibliografia	51
Capítulo IV - Efeito estroboscópico das lâmpadas de descarga em gases e das lâmpadas fluorescentes	
4.1 - Sobre o efeito estroboscópico	53
4.2 - Correção do efeito estroboscópico	59
4.3 - Efeito estroboscópico das lâmpadas incandescentes	63

ÍNDICE (continuação)

Capítulo V - Correção do fator de potência nas lâmpadas fluorescentes	
5.1 - Fator de potência da lâmpada	67
5.2 - Correção do fator de potência por meio de capacitors ligados em paralelo na linha	68
5.3 - Correção do fator de potência pelo sistema "Tulamp"	69
5.4 - Oscilogramas para vários tipos de lâmpadas	71
Bibliografia	77
Capítulo VI - Sobre a possibilidade de se obter um sistema trifásico a partir de um circuito monofásico	
6.1 - Transformação de sistema difásico em trifásico	79
6.2 - Tensão numa impedância Z_L de um circuito $RLLC$ à ressonância	80
6.3 - Diagrama do círculo para ressonância série	83
6.4 - Transformação de um sistema monofásico em difásico	85
6.5 - Fator de potência de um sistema paralelo, formado por uma impedância indutiva e uma impedância induitivo-capacitativa	91
6.6 - Aplicação do diagrama do círculo aos casos de fator de mérito menor do que a unidade	95
6.7 - Aplicação do sistema de impedâncias proposto à conexão Scott	96
Bibliografia	98
Capítulo VII - Lâmpadas fluorescentes ligadas em sistema trifásico obtido a partir de uma linha monofásica	
7.1 - A transformação monofásico-trifásico aplicada às lâmpadas fluorescentes	99
7.2 - Exemplo de aplicação	101
7.3 - Discussão dos resultados	104
7.4 - Crítica dos resultados	111
7.5 - Sobre a utilidade do polianalizador	115
Conclusões relativas ao emprêgo da iluminação com lâmpadas fluorescentes	117

" It is a common experience that there is a peculiar difficulty in grasping the ideas of electricity and magnetism. Nature has not prepared us to study electricity. The instincts and commonsense which we acquire by handling objects make it comparatively easy for us to understand heat and light and sound, and the way in which machines work, but we seem to have no corresponding natural electrical sense although electrical devices of all kinds play so important a part in our lives. This electrical sense has to be acquired by studying that behaviour of things which is called "Electricity", and by trying to arrange our ideas clearly. When we succeed in acquiring it, we win the freedom of the electrical world."

W. L. BRAGG.

INTRODUÇÃO

O assunto desta Tese "Sobre a correção do efeito estroboscópico e do fator de potência das lâmpadas fluorescentes" teve sua escolha determinada pelas pesquisas que fizemos sobre os meios de obter registros oscilográficos múltiplos dos fenômenos elétricos, com o emprêgo do polianalizador.

Este aparelho eletrô-mecânico, imaginado por nós em 1943, foi desde essa época utilizado sistematicamente, tendo sido desenvolvidos os circuitos típicos para a sua utilização no estudo dos mais variados fenômenos.

As primeiras publicações a respeito foram apresentadas à fundação Wanderley, tendo merecido o respectivo prêmio no ano de 1943, e posteriormente outras publicações foram feitas nos Anais da Academia Brasileira de Ciências, impedindo assim que esse trabalho pudesse ser utilizado para uma tese, uma vez que deixou de ser inédito.

Outro assunto sobre o qual estávamos pesquisando e que poderia satisfazer aos requisitos de uma tese era o "Registro da potência instantânea com o oscilógrafo catódico e polianalizador", em substituição do oscilógrafo tipo OSISO, eletromagnético, que é empregado para esse fim.

As vantagens de se poder apresentar num mesmo oscilograma, com o oscilógrafo catódico, por meio do emprêgo do polianalizador, as curvas da tensão, da corrente e da potência instantânea facilitariam os estudos dos circuitos com elementos de características não lineares, para os quais a determinação da potência média depende da determinação das áreas no respectivo oscilograma de potência instantânea; na falta deste, é necessário que se calcule a curva respectiva dos produtos dos valores instantâneos de v e i, ou se faça a análise harmônica para as ondas da tensão e da corrente.

Iniciado o estudo, foi o mesmo desenvolvido até terem sido obtidos os primeiros resultados, mas o sistema resultante era complicado, empregando muitas válvulas termoeletrônicas, que tinham que ser compensadas, e desse modo fugia à finalidade que tínhamos em vista, que era obter um sistema simples, pouco sujeito a erros de interpretação, tal como o é o elemento oscilográfico OSISO.

Sem deixar de lado a pesquisa de um sistema registrador de potência instantânea com o oscilógrafo catódico, achamos mais conveniente deixar para melhor oportunidade esse assunto, mesmo porque outros fatos levaram-nos a orientar as pesquisas para o tema desta tese.

Isto se deu quando obtivemos registros da queda de tensão, da corrente e do fluxo luminoso de determinada lâmpada fluorescente, e observamos que a curva desse se aproximava da curva calculada de potência instantânea.

Coincidiu que nessa mesma ocasião a Diretoria da Escola Politécnica estava interessada em conhecer a conveniência da aplicação da iluminação fluorescente no novo prédio S.Thiago, e o estudo preliminar do problema decidiu-nos a escolhe-lo para apresentação em concurso, pois que o mesmo satisfazia às condições de ser uma tese inédita, versando sobre assunto pertencente à Cadeira nº 36 - "Eletrotécnica Geral".

Nos primeiros registros oscilográficos obtidos foi empregado um amplificador do tipo "Loftin White" com válvula fotoelétrica, que apresentou vários inconvenientes quando em conexão com o polianalizador.

Tornou-se, portanto, necessário desenvolver um circuito especial para tal fim, com a possibilidade de neutralizar a corrente residual de placa quando a célula fotoelétrica não estivesse iluminada, de modo a se ter a linha de referência do fluxo luminoso coincidindo com o eixo da abscissa, para as

sim ser possível medir convenientemente a variação do mesmo e o seu efeito estroboscópico.

Somente depois de conseguirmos um circuito conveniente é que pudemos iniciar os estudos sistemáticos dos vários tipos de lâmpadas, por meio dos registros oscilográficos simultâneos obtidos com o polianalizador, que nos permitiram analisar o efeito estroboscópico.

A constatação deste pode ser feita desde que se observe um objeto em movimento, iluminado pela fonte luminosa a estudar.

A sensação desagradável produzida pela visão de vários objetos, onde se sabe que existe apenas um em movimento, é observada na iluminação do tipo fluorescente, não corrigida, e principalmente quando se empregam frequências baixas e lâmpadas com fósforos de menor persistência.

O sentido das palavras de W.L. Bragg citadas na introdução desse trabalho pode ser aqui relembrado:

Para o exame das causas do fenômeno, não são suficientes apenas os nossos sentidos, sendo preciso também que disponhamos de elementos de observação especiais para tornar mais claras as idéias a respeito, afim de que possamos fazer as correções devidas. Este é um caso, pois, em que a constatação do fenômeno é subjetiva, enquanto que a interpretação das suas causas exige que adquiramos aquele "electrical sense", de que fala W.L. Bragg, o que somente poderemos conseguir pela observação e análise das causas elétricas que o produzem.

Tratando-se de correntes alternadas, com elementos de características não lineares, o método oscilográfico permite a verificação inicial das causas e posteriormente a comprovação dos circuitos que forem aplicáveis à modificação dos efeitos.

Este trabalho pôde ser realizado pelo fato de dispormos de apara-

relhos como o oscilógrafo catódico e o polianalizador, com os quais foi possível verificar novos circuitos, registrando ao mesmo tempo a causa e o efeito como o demonstram as fotografias dos oscilogramas e ciclogramas apresentados.

No intuito de orientar a leitura deste trabalho, achamos conveniente apresentar, nesta introdução, uma símula dos assuntos tratados em cada capítulo.

No primeiro capítulo discutimos o modo de registrar o fluxo luminoso com o polianalizador e oscilógrafo catódico, pois que desse registro dependeu toda a orientação dada a este trabalho.

Procuramos mostrar as dificuldades encontradas e a solução que julgamos satisfatória para se obter um registro suficientemente fiel do fluxo luminoso.

O autor teve que investigar os meios mais convenientes para seguir realizar as seguintes condições: a) a ligação de uma célula fotoelétrica de alta impedância à entrada do polianalizador, que é de baixa impedância; b) o registro do fluxo luminoso sempre com ordenadas contadas a partir de zero; c) a utilização de um circuito que permitisse a ligação a terra do terminal do polianalizador e oscilógrafo catódico; d) a obtenção de uma característica de resposta razoavelmente linear; e) o exame dos fluxos luminosos provenientes das fontes de várias intensidades estudadas.

No segundo capítulo achamos conveniente estudar as condições de funcionamento da lâmpada de sódio, pelo interesse que apresenta a sua característica. De fato, a descarga se inicia através do gás néon, e depois, com a introdução dos átomos de sódio, a característica se modifica completamente, tanto sob o aspecto elétrico como espetroradiométrico e estroboscópico.

A atenção dada à lâmpada de sódio tem sua razão de ser, como termo de comparação com lâmpadas de outros tipos, pois que aquela apresenta

um efeito estroboscópico característico.

No terceiro capítulo tratamos especialmente das lâmpadas fluorescentes, finalidade de nosso estudo, procurando considerar o problema sob os seguintes aspectos: a) estudo da característica não linear da descarga; b) flutuações espontâneas de tensão na lâmpada funcionando em corrente alternada; c) flutuações espontâneas de tensão em corrente contínua.

Nessa parte do trabalho, é com satisfação que apresentamos um método, que se nos afigura original, para obter a característica dinâmica de um elemento não linear (no caso a descarga em gases), empregando dois círculos obtidos por meio do polianalizador-oscilógrafo catódico. Este método é de especial interesse pelo fato de permitir obter características dinâmicas para valores de corrente muito acima daquelas com as quais a lâmpada trabalha normalmente. Pode-se, assim, fazer a descarga atingir às regiões próximas do arco elétrico entre os eletrodos, durante um tempo suficientemente curto para não danificar a lâmpada.

No capítulo quarto relatamos os estudos experimentais feitos sóbre o efeito estroboscópico dos vários tipos de lâmpadas.

Tivemos de imaginar um meio de poder apresentar uma documentação objetiva do efeito estroboscópico, equivalente ao que vê o observador. Encontramos bastante dificuldade inicialmente para obter fotografias de objetos que se movem sob o efeito da luz das lâmpadas estudadas, em virtude do pequeno aclaramento dos mesmos na maior parte dos casos, e das intensidades e curvas espetroradiométricas diferentes das várias fontes.

A solução que adotamos foi a de fotografar um setor branco sob um disco negro servindo de fundo, girando à 600 r.p.m.. Empregamos máquina Contax, f : 2, film Pancromático XX e Plus X, conforme o caso e tempos de exposição determinados experimentalmente de acordo com o tipo de lâmpada.

da estudado.

Nas fotografias, que foram todas obtidas pelo autor, pode-se servar diferenças de aclaramento provenientes da localização assimétrica das lâmpadas estudadas em relação ao eixo do disco, disposição considerada como a mais conveniente nas experiências feitas.

No capítulo quinto foram considerados os métodos comumente utilizados para a correção do fator de potência das lâmpadas fluorescentes. Neste capítulo o autor achou oportuno apresentar, para fins de comparação, uma série completa dos oscilogramas colhidos no estudo das várias lâmpadas e nos quais estão registrados: a tensão da linha, a corrente no circuito da lâmpada e o fluxo luminoso desta.

No capítulo sexto o autor apresenta a discussão teórica, de caráter geral, do sistema que imaginou e que considera original, para transformar um circuito monofásico em trifásico, passando primeiramente para um circuito difásico, e em seguida, deste para um trifásico, por meio da conexão Scott. Nesse mesmo capítulo apresenta o autor um diagrama do círculo para o cálculo dos elementos do circuito.

Finalmente, no sétimo capítulo, apresentamos os resultados práticos conseguidos, bem como a documentação dos oscilogramas que atestam a viabilidade do método proposto e a fotografia que mostra a quasi completa ausência do efeito estroboscópico, e concluimos com uma apreciação geral do problema da correção simultânea dos efeitos estroboscópicos e do fator de potência.

Bibliografia

BRAG, W.L. - "Electricity" -
New York, The Macmillan Company, pp.5-7, 1936.

LEGG, Joseph W. - "A series of Articles on Oscillography, Reprinted from the Electrical Journal" - Outubro, Novembro e Dezembro, 1927.

CAPÍTULO I

REGISTRO DO FLUXO LUMINOSO COM O OSCILÓGRAFO CATÓDICO E POLIANALIZADOR

1. 1 - O problema em relação ao polianalizador

O polianalizador é um dispositivo eletro-mecânico que permite, em conexão com o oscilógrafo catódico, a visão simultânea de vários fenômenos, em condições equivalentes àquelas de um oscilógrafo eletromagnético dotado de vários elementos, como consta das publicações feitas pelo autor.

Para a realização desse aparelho foi empregado um conjunto de lâminas móveis e contatos fixos, acionadas aos pares por meio de camas solídárias ao eixo de um motor síncrono que gira à 900 r.p.m. quando ligado à frequência de 60 ciclos/segundo

Os pares de lâminas e respectivos contatos são acionados em sequência, ficando ligados durante um tempo de 1/50 seg e com intervalo de 1/450 seg entre duas conexões sucessivas.

A fim de que os fenômenos elétricos a serem registrados possam ser ligados aos terminais de entrada dos oscilógrafos catódicos de tipo técnico sem que ao mesmo tempo sejam introduzidas perturbações parasitas devidas à alta impedância de entrada, os terminais do oscilógrafo foram conectados permanentemente a uma resistência de $2\ 000\ \Omega$, que se encontra ligada entre os terminais de saída do polianalizador.

Os circuitos elétricos deste foram de tal modo constituidos que, para a medição de tensões, emprega-se uma resistência de 1 000 ohms/volt, o que corresponde, portanto, a um voltômetro de alta resistência. Como amperô

metro, os "shunts" têm resistências que permitem a queda de potencial de 1 volt para os valores das correntes indicados nas escalas.

Os valores das escalas das tensões e correntes são, respectivamente: 1 - 5 - 25 - 100 - 250 e 500 volts e 0,01 - 0,05 - 0,25 - 1,0 - 2,5 e 5,0 ampéres. A escala mais baixa de tensão - 1 volt - corresponde à resistência equivalente de $1\ 000\ \Omega$, sendo constituída pela resistência de 2 000 ohms da saída do polianalizador ligada em paralelo com aquela de 2 000 ohms do circuito das resistências multiplicadoras do voltômetro. Dêsse modo vê-se que a resistência de 1 000 ohm/volt é conseguida sómente durante o tempo de ligação das lâminas e contatos respectivos, correspondentes ao fenômeno a registrar, isto é, com a duração de 1/50 seg.

O registro do fluxo luminoso por meio do polianalizador exige, portanto, que a saída do sistema conversor de energia radiante em elétrica forneça uma tensão de pelo menos 1 volt, com a impedância correspondente de ... 1 000 ohms/volt.

1. 2 - Escolha da célula fotoelétrica

Dos vários sistemas para conversão de energia radiante em energia elétrica, os dois que mais interessam ao caso são as células fotovoltaicas eletrônicas e as válvulas fotoelétricas.

As primeiras geram diretamente f.e.m. de algumas dezenas de milivolts, o que exigiria amplificação prévia antes de serem ligadas ao polianalizador.

As válvulas fotoelétricas, a vácuo ou a gás, têm alta impedância, o que torna necessário reduzi-la antes de ligar à impedância de 1 000 ohms/volt do aparelho.

No circuito estudado foi empregada uma válvula fotoelétrica à

gás, do tipo (868), que tem as características seguintes:

Sensibilidade luminosa a: 0 ciclos/seg - 90 μ A/lumen

5 000 " - 77 "

10 000 " - 67 "

Amplificação máxima do gás - 8

Resposta máxima - 7 500 Å

Sensibilidade para a resposta máxima - 0,0105 μ A/ μ W

Tensão máxima - 90 volts.

Pelas características indicadas, a máxima sensibilidade lumínica da válvula está do lado dos comprimentos de onda mais elevados do espectro visível, quase no limite máximo deste, o que mostra a necessidade de filtro adequado para utilização da válvula para fins fotométricos.

Não empregamos, entretanto, filtro para essa correção, uma vez que a finalidade deste estudo é apenas obter os oscilogramas da variação do fluxo luminoso, e não a sua expressão em termos da visibilidade relativa, isto é, em lumens.

O emprêgo de uma célula fotoelétrica a vácuo, principalmente do tipo com multiplicação eletrônica, permitiria obter uma resposta mais próxima da linear, e consequentemente o registro do fluxo luminoso seria mais correto mesmo no caso de ter componentes harmônicos de ordem elevada.

As válvulas à gás não têm resposta linear, e para frequências elevadas os fenômenos estudados não têm sua reprodução correta nos respectivos oscilogramas.

O que pretendemos, neste trabalho, é comparar a variação do fluxo das lâmpadas fluorescentes, e para tais casos é suficiente a reprodução com esse tipo de válvulas fotoelétricas; exceptua-se, evidentemente, a reprodução dos fenômenos transitórios tais como aquele do oscilograma do "Strobotac",

que evidentemente não poderá ser tal como é indicado no oscilograma, devido às modificações introduzidas pelos fenômenos de ionização e desionização da válvula fotoelétrica, que modificam a forma do impulso original.

Escolhida a válvula do tipo (868), foi necessário estudar um circuito que permitisse reduzir a impedância para 1 000 ohms, e ao mesmo tempo permitisse ligar à terra o polianalizador, a fim de evitar que a tensão de algumas centenas de volts da válvula amplificadora ficasse ligada ao oscilógrafo.

O circuito que permite realizar tais condições é o "cathode follower", no qual a resistência de carga fica do lado de mais baixo potencial, ligada entre cátodo e terra. Com esse circuito foi possível realizar as condições necessárias para o fim que tínhamos em vista, isto é, obter baixa impedância de saída, ligação à terra do polianalizador, e neutralização da corrente residual correspondente à operação com a válvula fotoelétrica não iluminada.

1. 3 - Circuito "cathode follower"

O circuito "cathode follower" típico é mostrado na fig. 1.1, e o circuito equivalente é mostrado na fig. 1.2. Nos diagramas foi empregada a convenção seguinte:

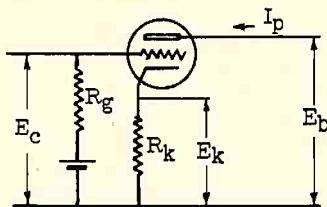


Fig. 1.1

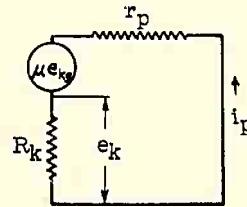


Fig. 1.2

E_b - tensão da bateria de placa

E_C - tensão da bateria de polarização de grade

I_p - corrente de placa (C.C.)

i_p - corrente alternada de placa

μ = fator de amplificação da válvula

e_k = tensão alternada na resistência de carga R_k

e_g = tensão alternada aplicada entre grade e terra

e_{kg} = tensão alternada entre grade e cátodo

r_p = resistência de placa (C.A.).

Do circuito equivalente pode-se escrever:

$$1) \quad e_{kg} = e_g - i_p R_k$$

$$2) \quad i_p = \mu e_{kg} / (r_p + R_k)$$

Substituindo (1) em (2), tem-se:

$$3) \quad i_p = (\mu e_g - \mu i_p R_k) / (r_p + R_k)$$

que se pode exprimir na forma:

$$4) \quad i_p = \mu e_g / |r_p + (1 + \mu) R_k|$$

dividindo-se por $(1 + \mu)$, tem-se:

$$5) \quad i_p = e_g |\mu / (1 + \mu)| / |r_p / (1 + \mu) + R_k|$$

Considerando-se μ grande em relação à unidade, tem-se a expressão aproximada da corrente no circuito "cathode follower".

$$6) \quad i_p = e_g / (r_p / \mu + R_k)$$

A tensão da saída, obtida na resistência R_k é

$$7) \quad e_k = i_p R_k$$

De (6) e (7), tem-se:

$$8) \quad e_k = e_g R_k / (r_p / \mu + R_k)$$

O fator de amplificação do sistema, definido por $K = \frac{e_k}{e_g}$ será:

$$9) \quad K = R_k / (r_p / \mu + R_k)$$

1. 4 - Neutralização da corrente inicial

Uma propriedade característica do "cathode follower", que é evidente pelo próprio nome dado ao circuito, é que a tensão de saída, (e_k), obti-

da nos terminais da resistência (R_k), "acompanha" em fase a tensão aplicada entre grade e a terra (e_g).

Se a tensão (e_g) fôr obtida do circuito de uma célula fotoelétrica, a queda de tensão em R_g será tal que a polarização negativa da grade diminuirá com o crescimento do fluxo luminoso incidindo sobre a válvula fotoelétrica, e consequentemente a queda de tensão (e_k) terá valores sempre acima do mínimo determinado pela condição inicial correspondente ao fluxo luminoso nulo.

Sendo essencial para a comparação das variações do fluxo luminoso que, quando este tiver valor nulo, a tensão aplicada ao polianalizador seja zero, para que o desvio no oscilógrafo seja nulo (ordenada zero para fluxo zero), é necessário neutralizar a queda de tensão inicial.

Não é conveniente fazer-se a válvula trifodo operar no ponto de corte, pois que este não é bem definido e traria como consequência aumentar a curvatura da característica resultante.

O princípio do circuito empregado é indicado na fig. 1.3. Na dedução que se segue, desprezamos o efeito da variação de I_p , pois por construção R_k é muito pequena em relação à resistência da válvula (à corrente contínua), nas condições iniciais de operação com negativação próxima do ponto de corte; desprezamos também a resistência interna da fonte de f.e.m. de neutralização.

A lei de Kirchhoff aplicada ao nó b nos dá:

$$10) \quad -I_p + I_k + I = 0$$

Donde:

$$I_k = I_p - I$$

$$11) \quad I = I_p - I_k$$

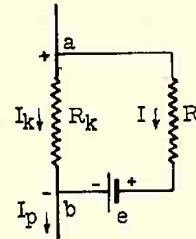


Fig. 1.3

A equação das quedas de tensão e f.e.m. na malha é:

12) $I_k R_k - I_R - e = 0$

Da substituição das equações (11) em (12), obteve-se, respectivamente:

13) $I_k = (e + I_p R) / (R_k + R)$

14) $I = (I_p R_k - e) / (R_k + R)$

A queda de tensão (E) na resistência (R) será $E = IR$ donde, substituindo-a na expressão (14), tem-se:

15) $E = |I_p R_k R / (R_k + R)| - |e R / (R_k + R)|$

desde que R_k , R , e , são constantes, pode-se fazer:

$$a = R_k R / (R_k + R) \quad e \quad b = e R / (R_k + R) \quad , \quad e$$

escrever a expressão (15) sob a forma:

16) $E = a I_p - b$

que é a expressão de uma reta, que corta a abcissa num ponto $I_p = b/a$, como

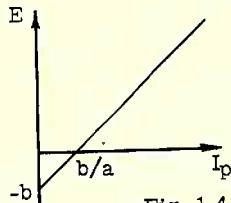


Fig. 1.4

mostra a fig. 1.4. Pode-se assim obter uma tensão de entrada no polianalizador proporcional à corrente de placa I_p , com a possibilidade de neutralizar o efeito da corrente inicial.

1.5 - Efeito da neutralização da corrente inicial sobre o fator de amplificação

A resistência equivalente entre os pontos a e b pode ser obtida pela expressão $R_{ab} = V_k / I_p$ onde $V_k = I_k R_k$.

Da expressão (13), substituindo-se I_k em V_k , tem-se:

17) $V_k = e R_k / (R_k + R) + I_p (R_k R / (R_k + R))$

A resistência que podemos imaginar entre os pontos a e b compõe-se de dois termos, um dos quais é a resistência equivalente a um sistema de duas resistências em paralelo e o outro é função de I_p , como se pode obter

na expressão seguinte, dividindo-se a expressão (17) por I_p

$$18) \quad R_{ab} = R_k R / (R_k + R) + (e/I_p) | R_k / (R_k + R) |$$

Como o fator de amplificação, conforme foi definido, tem a expressão aproximada dada em (9), onde, substituindo R_k por R_{ab} podemos escrever:

$$19) \quad K = R_{ab} / (r_p/\mu + R_{ab})$$

Para reduzir o efeito de variação de R_{ab} , foi utilizada uma relação (e/I_p) bastante pequena, tendo sido escolhidos os seguintes valores para as resistências componentes do circuito:

$$R_k = 100 \text{ ohms}, \quad R = 1\,000 \text{ ohms}, \quad e = 0,1 \text{ volt.}$$

A válvula empregada foi a 6C5, que tem $\mu = 20$, $r_p = 10\,000$ ohms e nessas condições $r_p/\mu = 500$; a corrente anódica varia entre 1 m A (válvula fotoelétrica no escuro) até 10 mA (válvula fotoelétrica iluminada). Para êsses são os seguintes os valores das resistências e fatores de amplificação:

$$R_{ab} = 99,1 \text{ ohms} \quad K' = 0,165$$

$$R_{ab} = 90,1 \text{ ohms} \quad K'' = 0,153$$

O fator de amplificação fica, pois, afetado em 7,3%, em relação ao valor mais elevado, obtido com a lâmpada fotoelétrica não iluminada - (valor inicial).

1.6 - Característica obtida com a válvula fotoelétrica a gás

A válvula fotoelétrica a gás, por sua vez, introduz curvatura na característica, pois a sensibilidade varia com a queda de potencial cátodo-ângulo, da mesma.

Chamando-se, na fig. 1.5, Z_0 impedância de carga, E_{b1} - tensão excitadora, F - fluxo luminoso em lumens, G - termo equivalente à condutância, expressa em μ mhos/lumen, podemos escrever para a tensão e_0 na impe-

dância Z_0 (que pode se confundir com R_g para frequências baixas):

$$20) \quad \frac{e_o}{E_{b1}} = \frac{Z_0}{Z_0 + Z'} = \frac{R_g}{R_g + Z'}$$

$$21) \quad \text{onde } Z' = \frac{1}{GF}$$

$$22) \quad e_o = \frac{E_{b1} R_g GF}{R_g GF + 1} = e_g$$

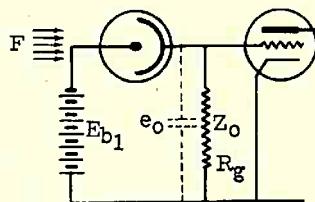


Fig. 1.5

O desvio no oscilógrafo, contando com a amplificação K_2 do amplificador do mesmo e a amplificação K_1 do "cathode follower", será:

$$23) \quad y = K_1 K_2 e_g = K_1 K_2 \frac{E_{b1} R_g GF}{R_g GF + 1}$$

O gráfico de $y = f(F)$ é representado por uma curva, e a deformação da onda resultante pode ser reduzida com a diminuição da resistência de carga da válvula fotoelétrica (R_g) no caso do circuito da fig. 1.5.

Para a válvula do tipo 868, o valor $R_g = 500\,000$ ohms.

1.7 - Circuito empregado

Para o emprêgo sistemático da válvula fotoelétrica e "cathode follower" em conexão com o polianalizador e oscilógrafo catódico, há conveniência de que o sistema seja operado sem baterias.

O esquema do circuito final que foi por nós utilizado é mostrado na fig. 1.10, no qual estão indicados todos os valores das resistências e tensões.

Como se verifica do esquema, o polianalizador está ligado à terra, dolado do potenciômetro que permite ajustar a tensão de neutralização (cerca de 0,1 volt), para as condições de operação da válvula tríodo 6C5, polarizada a uma tensão de cerca de -14 volts, (queda de tensão na resistência ajustável de 300 ohms). O polianalizador é indicado no esquema pela letra P.

A tensão de 90 volts para a válvula fotoelétrica é obtida em um

ponto conveniente da resistência de 50 000 ohms.

As resistências de carga, em paralelo com R_k correspondem às resistências de 2 000 ohms do polianalizador, que ficam em paralelo durante o tempo em que o fluxo está sendo registrado, isto é, 1/50 seg. O miliamperô - metro mostrado no esquema, que é do tipo de bobina móvel, permite verificar o valor médio da corrente aplicada ao polianalizador e, nessas condições, deve indicar aproximadamente 0,666 mA para 1 volt de queda de potencial na resistência equivalente de 1 000 ohms.

A saída do polianalizador foi ligada ao oscilógrafo catódico (oscilógrafo Du Mont - 208 B, no qual fizemos a modificação aconselhada pelo fabricante, para utilizar a válvula amplificadora 6SN7GT como amplificadora de corrente contínua.

Nas condições indicadas, a amplificação total é obtida por meio de amplificadores do tipo de corrente contínua, desde a válvula fotoelétrica até as placas defletoras do oscilógrafo, o que é essencial para este tipo de registro, pois, sendo sempre positivo o fluxo luminoso, é necessário representar as ordenadas instantâneas do mesmo acima da abscissa, para se poder medir convenientemente o grau de irregularidade de flutuação.

Com o circuito que empregamos o zero do aparelho é muito estável e uma vez ajustado, normalmente não é necessário reajustá-lo no decorso das experiências, por esse motivo não tomamos precauções especiais para estabilizar as tensões utilizadas.

1.8 - Calibração do aparelhamento

Como se pode verificar pelas características da válvula fotoelétrica empregada, a curva de sensibilidade espectral da mesma difere muito da curva de visibilidade relativa do olho humano.

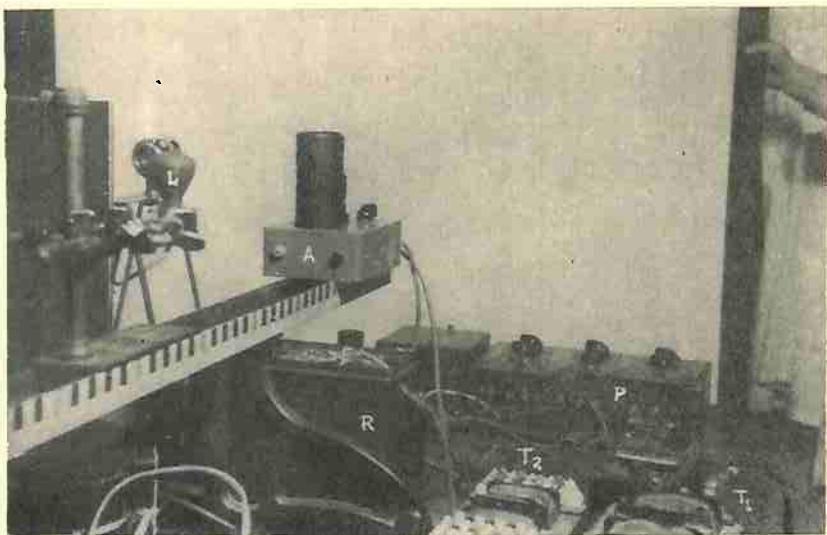


Fig. 1.6

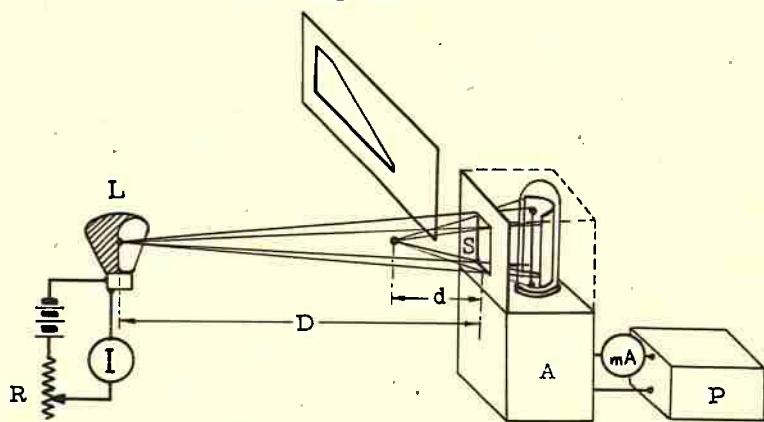
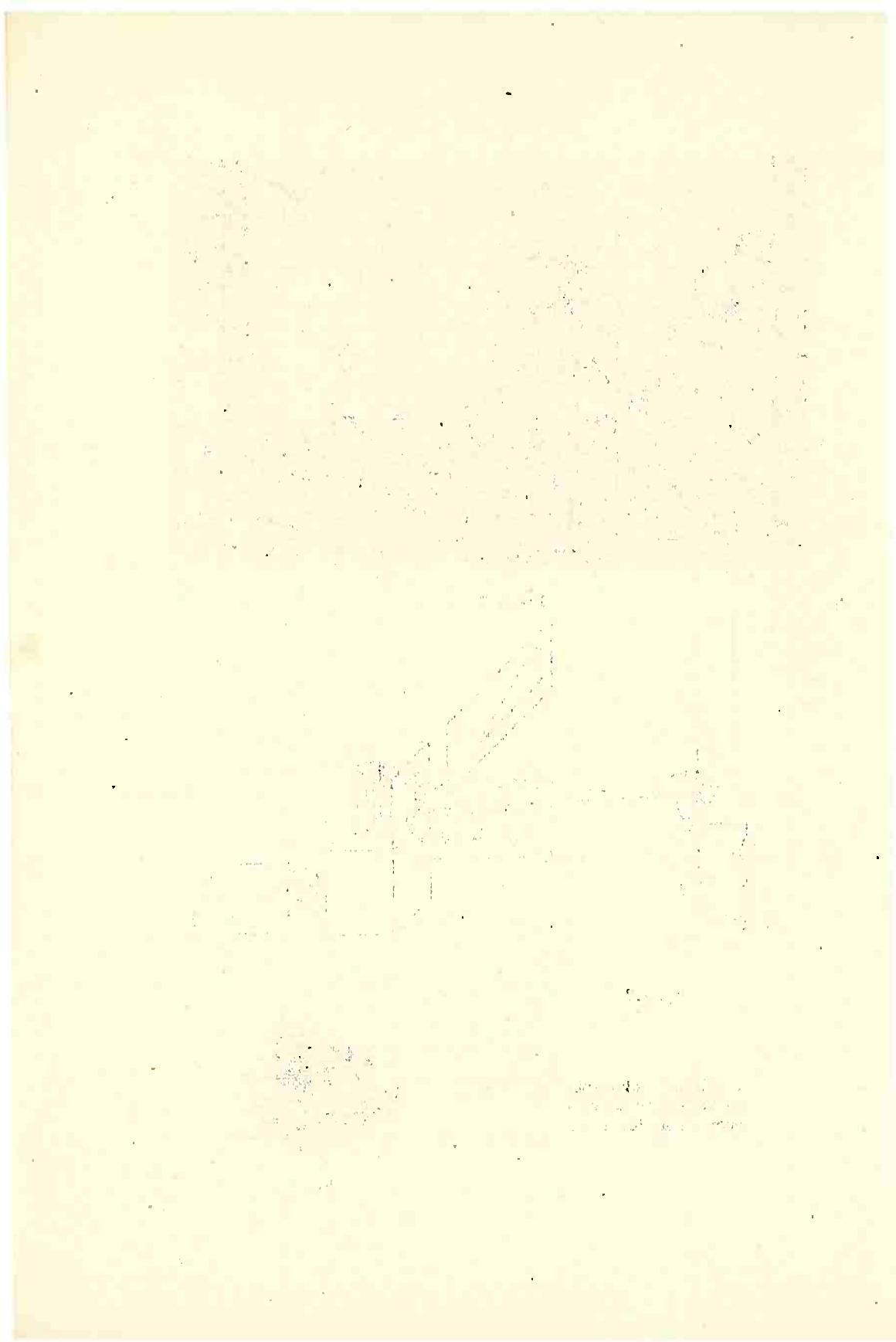


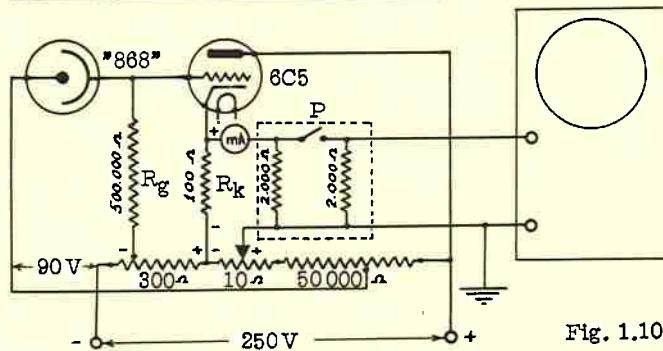
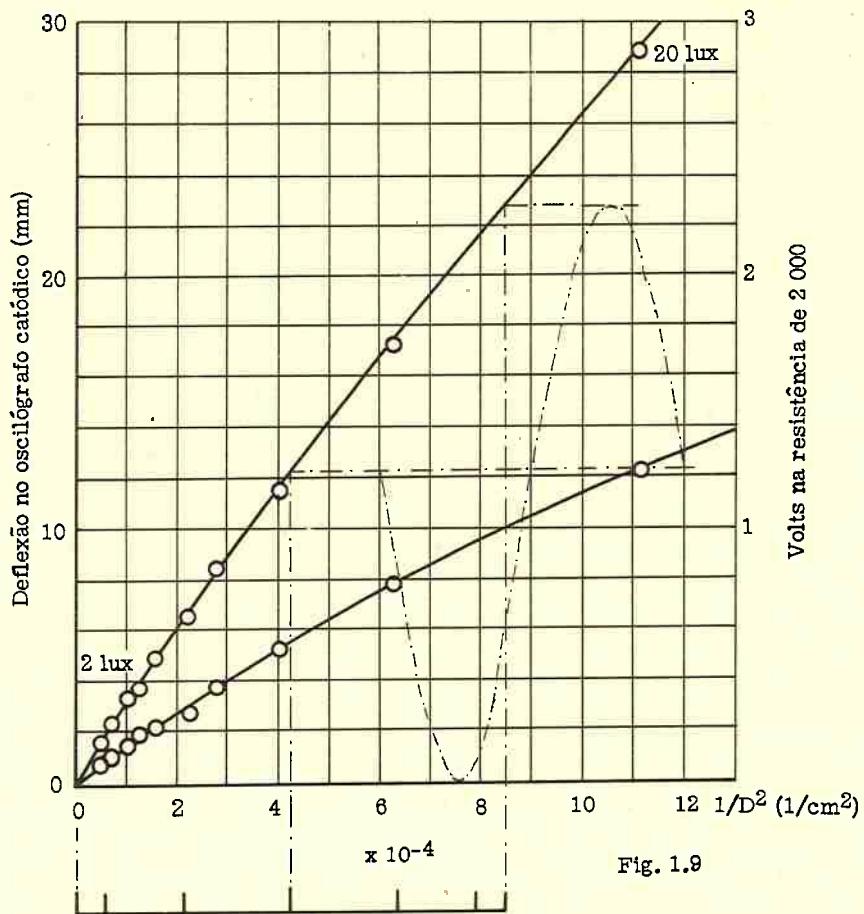
Fig. 1.7

O polianalizador está representado no esquema pela letra P.



Fig. 1.8





Como no decurso das experiências foram estudadas lâmpadas das mais variadas características, não empregamos filtro especial para a correção, pois tínhamos em vista apenas verificar os valores relativos do fluxo luminoso.

Apenas para fins de comparação, nas condições da luz das lâmpadas incandescentes, foram anotados dois valores do aclaramento da célula fotoelétrica, em termos das medidas feitas com um fotômetro Weston, do tipo de célula fotovoltaica eletrônica, com filtro.

O processo de calibração que empregamos constou da verificação da resposta do sistema ao fluxo luminoso, medindo-se este em termos do ângulo sólido subentendido pela área da janela do anteparo em frente ao cátodo da válvula fotoelétrica, e empregando como fonte luminosa uma lâmpada incandescente com filamento de pequenas dimensões, para assim poder considerá-la como puntiforme.

Uma lâmpada do tipo de automóvel - (32 velas, 6-8 volt), pintada de preto pela metade, foi colocada num suporte do banco ótico em frente e ao nível do centro da janela retangular do anteparo e sendo o plano desta, normal à linha que liga o filamento ao centro do retângulo. As distâncias foram medidas entre o centro do filamento e o anteparo, e as medidas foram feitas a partir de uma distância (d) tal que todo o fluxo luminoso que passasse pela janela do anteparo atingisse a área útil do cátodo. A fig. 1.6 mostra a disposição do parelhamento, enquanto a fig. 1.8 mostra em detalhe o conjunto da válvula fotoelétrica, o anteparo e o amplificador "cathode follower".

Como mostra o esquema da fig. 1.7, empregamos um anteparo adicional para variar a área útil da janela, o que permite reduzir o fluxo que incide sobre o cátodo fotoelétrico, facilitando ao experimentador ajustar a amplitude do sinal aplicado ao osciloscópio catódico.

Os resultados obtidos e mostrados na fig. 1.9 - desvio do feixe eletrônico no oscilógrafo e indicação do miliamperômetro em função do fluxo - foram transportados em gráfico fazendo-se a anamorfose tendo variável na abscissa $1/D^2$, para evidenciar o desvio em relação à lei de Lambert.

Durante as experiências, o filamento da lâmpada foi mantido sob a corrente de 3 ampéres, obtida de um acumulador de grande capacidade, através do amperômetro indicador e da resistência de ajuste R, afim de manter constante a intensidade luminosa (I) na direção considerada.

Nas condições da experiência, pode-se escrever a expressão do fluxo luminoso subentendido pelo ângulo sólido (Ω) determinado pela área da janela (S) e pela distância do plano desta (D) até o filamento:

$$F = I\Omega = I \frac{S}{D^2} = IS(1/D^2)$$

Os resultados obtidos são mostrados no gráfico da fig. 1.9, no qual também está desenhada a onda que seria registrada no oscilógrafo para um fluxo luminoso de valor instantâneo $f = F/2 + F/2 \sin \omega t$, onde F tem tal valor que a tensão aplicada máxima ao polianalizador é de 1 volt.

Observa-se que, devido à curvatura da característica, o sistema introduz harmônicas na onda resultante.

Os resultados, entretanto, foram considerados satisfatórios para o fim que se tinha em vista, e assim não foi tentada a correção ou melhoria da linearidade.

Bibliografia

- ARRUDA, P. Ribeiro de - "Sobre um accessório eletro-mecânico para o oscilógrafo de raios catódicos"
An.Acad.Bras.Ci., T XV, nº 1, pg.31-38, Março 1943.
- ARRUDA, P. Ribeiro de - "Circuitos típicos para utilização do polianalizador"
An.Acad.Bras.Ci., T XVIII, nº 1, pg.85-91, Março 1946.
- ARRUDA, P. Ribeiro de - "Registro de famílias de curvas dinâmicas relativas a válvulas eletrônicas por meio do polianalizador"
An.Acad.Bras.Ci., T XVIII, nº 2, pg.134-139, Junho 1946.
- ARRUDA, P. Ribeiro de - "Seletor-Combinador para utilização do sistema polianalizador oscilógrafo catódico como um aparelho calibrado"
An.Acad.Bras.Ci., T XVIII, nº 2, pg.104-144, Junho 1946.
- ARRUDA, P. Ribeiro de - "Patente de Invenção nº 34-793 do Departamento Nacional de Produção Industrial"
28 de Maio de 1949.
- HUBER, Williams A. - "Graphical Analysis of Cathod Biased Degenerative Amplifiers"
Proceedings of the IRE, Vol.35 nº 3, pp.265-269, Março 1947.
- LONSDALE, E.M. e MAIN, W.F. - "A Method of Graphically Analysing Cathod Degenerated Amplifier Stages"
Proceedings of the IRE, Vol.35 nº 9, pp.981-984, Setembro 1947.
- MARKUS, John e ZELUFF, Vin - Handbook of Industrial Electronic Circuits -
"Two Tube DC - Vacuum Tube Voltmeter With Cathode - Follower
Input -
Mac Graw Hill, 1a Ed., pp.96.
- PULLEN, Keats A. Jr. - "The Cathode - Coupled Amplifier"
Proceedings of the IRE, Vol.34 nº 6, pp.402-405, Junho 1946.
- SCHULZ E.H. e ANDERSON L.T. - "Experiments in Electronics and Communication Engineering"
Harper & Brothers, New York, 1943.
- SHAPIRO, David L. - "The Graphical Design of Cathod Output Amplifier"
Proceedings of the IRE, Vol.32 nº 5, pp.265-269, Maio 1944.
- STRONG, Everett M. - "Electrical Engineering" - Basic Analysis -
John Wiley & Son, Inc., New York, pp.118-133, 1943.
- ZWORYKIN, V.K. e WILSON, E.D. - "Photocells and their Application"
John Wiley & Son, Inc., New York, 2a Ed., 1932.

CAPÍTULO II

LÂMPADA A VAPOR DE SÓDIO

2. 1 - Generalidades

A lâmpada à vapor de sódio que estudamos é do tipo de tensão constante, com cátodo aquecido e coluna de descarga positiva.

A descarga se inicia através do gás néon que está sob pequena pressão dentro do tubo da lâmpada, e o sódio, no estado sólido, somente se evapora depois de aquecido.

A introdução gradativa dos átomos de sódio na descarga, durante o período inicial de operação, provoca uma mudança completa da característica da lâmpada, tanto sob o aspecto puramente elétrico (característica não linear $i_t = f(v_t)$) como em relação à curva espetroradiométrica.

O tempo necessário para que a lâmpada de sódio atinja à condição normal varia com a potência da lâmpada entre 15 minutos e 20 minutos, ao fim do qual praticamente toda a radiação se encontra nas raias espetrais correspondentes ao "doublet" do sódio, respectivamente nos comprimentos de onda de 5 890 e 5 896 Å.

Para esta emissão monocromática, na faixa de cor amarela do espetro visível, o rendimento luminoso pode atingir a cerca de 75 lumens/watt.

O interesse do estudo da lâmpada de sódio reside no fato de ser este, quando no estado de vapor, o único vapor monoatômico que, para as temperaturas que podem ser praticamente obtidas, tem frequência de ressonância dentro do espetro visível, como é ilustrado pela tabela de Milner, para a radia-

ção de ressonância das lâmpadas de descarga.

A mesma tabela mostra um outro caso que é de interesse especial - a lâmpada a vapor de mercúrio - cujo comprimento de onda de ressonância é 2 537 Å, portanto, na região ultra-violeta do espetro, o que é conveniente para a excitação dos fósforos que permitem converter a energia desse comprimento de onda em radiação dentro do espetro visível, como no caso das lâmpadas fluorescentes.

2. 2 - Característica da lâmpada de sódio empregada

Utilizamos nas experiências a lâmpada Phillora S0-140 de 11 000 lumens, do tipo de tensão constante, que funciona com um autotransformador de dispersão de fluxo.

A lâmpada consiste de um tubo de 1,4 cm de diâmetro externo e 64 cm de comprimento, recurvado em forma de U, e tendo nos dois extremos os eletrodos metálicos, enrolados em espiral, e recobertos de material emissor de eletrons.

O funcionamento normal desse tipo de lâmpadas é na posição horizontal, afim de evitar a acumulação de sódio, e o tubo em U é protegido das variações de temperatura por meio de um vaso Dewar.

A tensão de entrada do transformador é 110 volts, e a tensão aplicada à lâmpada é 230 V, não sendo empregada nenhuma chave de partida para facilitar o funcionamento, pois que, em vazio, a tensão do transformador atinge a 375 volts, suficiente para produzir a descarga inicial no gás néon.

2. 3 - Circuito empregado nas experiências

A lâmpada foi ligada ao polianalizador em conexão com o oscilógrafo catódico, de forma a poder-se considerá-la como uma impedância elétrica (Z). Por meio da válvula fotoelétrica e circuito descrito no Cap. I, re-

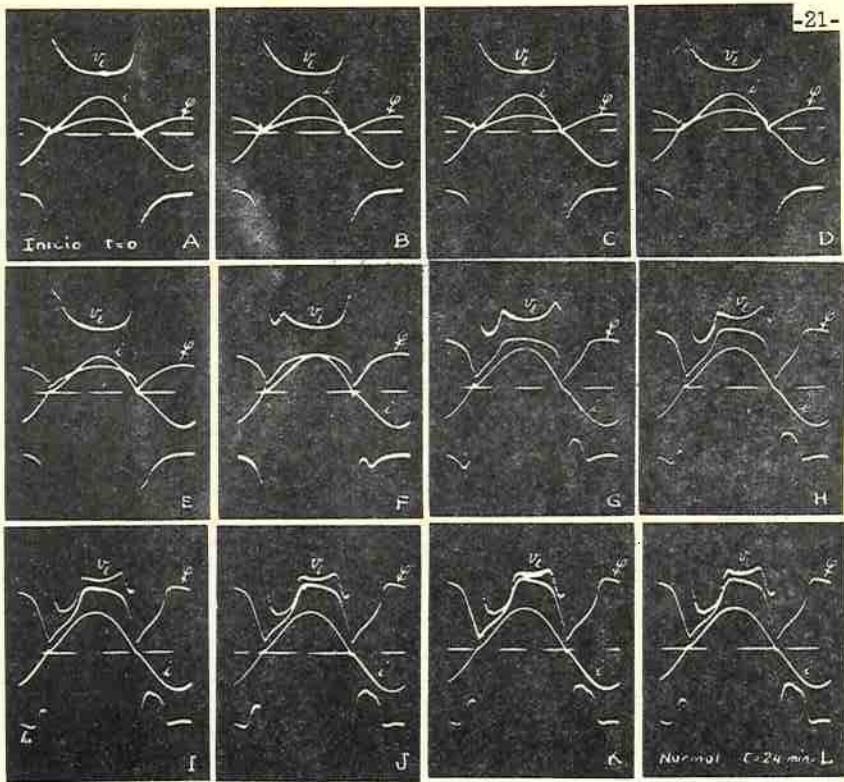


Fig. 2.1

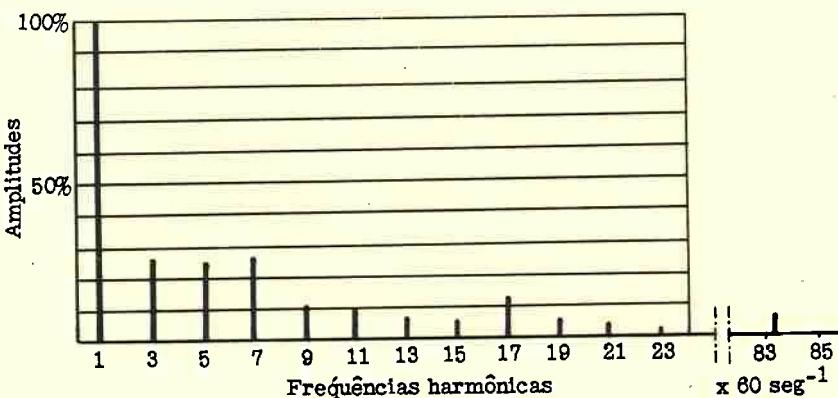
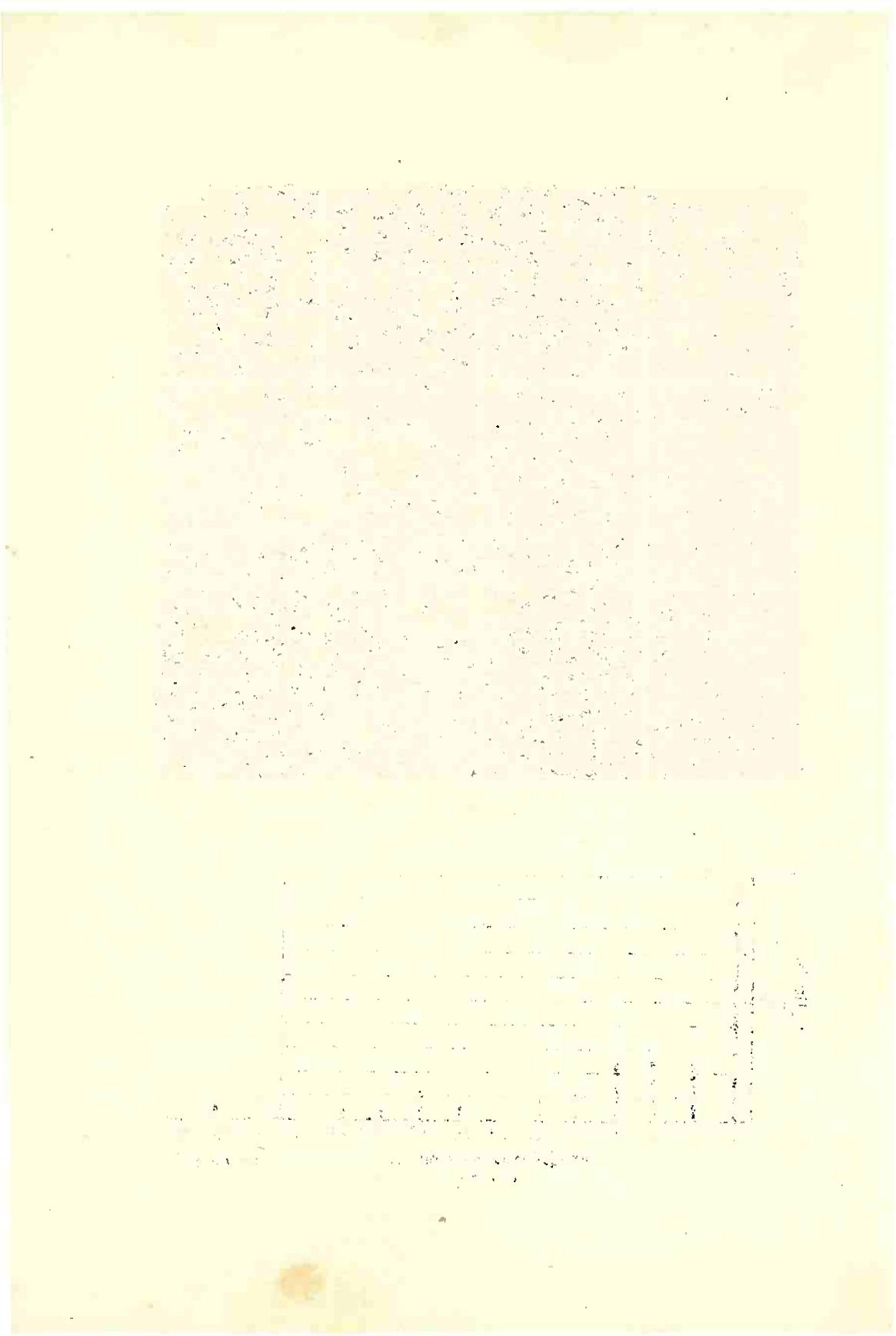


Fig. 2.2



gistrou-se o fluxo luminoso (F).

Nessas condições, o oscilógrafo catódico registrou simultaneamente os fenômenos seguintes: a) tensão instantânea aplicada à lâmpada (v_t) ; b) corrente instantânea através da lâmpada (i_t) ; c) fluxo instantâneo emitido pela lâmpada - $\frac{F}{t}$; d) eixo de tempo interrompido, registrado durante os intervalos de descanso entre fenômenos sucessivos. Com as mesmas ligações, pode-se obter, por meio do polianalizador, o ciclograma, que é a figura resultante da composição ortogonal das oscilações (v_t e i_t), desde que se empregue o amplificador do eixo vertical do oscilógrafo para um dos fenômenos e aquele do eixo horizontal para o outro. Em casos desta natureza, preferimos empregar no eixo horizontal uma onda senoidal, em lugar da onda de queda de tensão da lâmpada. Foi desta forma que foram obtidos os oscilogramas da fig. 2.8 .

Todos os oscilogramas apresentados foram obtidos com film Panchromatico Plus X, com máquina fotográfica Contax, com suporte de aproximação, abertura da objetiva $f : 2$ e tempo de exposição $1/10$ seg.

2.4 - Construção dos diagramas espaciais

Preparada a lâmpada de sódio para as experiências, obtivemos fotografias de 2 em 2 minutos para os tempos (t) desde zero até 24 minutos , conforme mostra a série de oscilogramas da fig. 2.1 .

O exame dessa série fotográfica mostra que a corrente pouco se modificou durante esse tempo, enquanto que a queda de tensão na lâmpada e o fluxo luminoso sofreram profundas modificações.

Escrevendo-se, para essa fase inicial da operação da lâmpada,

$$v_t = f(\theta, t) \quad \text{onde } \theta \text{ é o ângulo de fase.}$$
$$\frac{F}{t} = f(\theta, t)$$

Pode-se construir, dos próprios dados fornecidos pelos oscilo-

gramas, um diagrama espacial que mostre de forma mais conveniente a variação dos fenômenos que ocorrem durante a operação da lâmpada. Para isso, foram ampliados os oscilogramas até uma dimensão adequada, e copiadas independentemente as curvas do fluxo e da queda de tensão, que depois foram transportadas para lâminas de madeira mole de 0,5 cm de espessura e recortadas com serra fina para madeira.

As lâminas depois de justapostas, foram aparelhadas por meio de limas para dar o contorno correspondente, e finalmente foram retocadas com massa e pintura branca para se poder indicar nas mesmas as curvas mais significativas.

As fotografias dos dois diagramas são mostrados nas figs. 2.3, 2.5 e 2.6 .

2.5 - Significado do diagrama espacial

Examinando-se o diagrama espacial de $\Phi_t = f(\theta, t)$, fig. 2.3, verifica-se que o fluxo luminoso aumenta à medida que entram na lâmpada os átomos de sódio, e apresenta um deslocamento para o centro, na região próxima de $\theta = \pi/2$.

No início do funcionamento da lâmpada, enquanto existem apenas os átomos de néon na descarga, o fluxo luminoso é aproximadamente simétrico, em relação à ordenada que passa por $\pi/2$, mas pouco a pouco vai apresentando uma sensível assimetria, até atingir à estabilidade ao fim de cerca de 20 minutos, como se pode ver pelos diagramas espaciais mostrados nas figuras 2.3 e 2.6 .

Observa-se, especialmente na fig. 2.6, que o fluxo não cai a zero para os ângulos $\theta = 0$ e $\theta = \pi$, como seria de esperar, uma vez que para esses valores de θ , a tensão v_t e a corrente i_t têm valor nulo e, consequente -

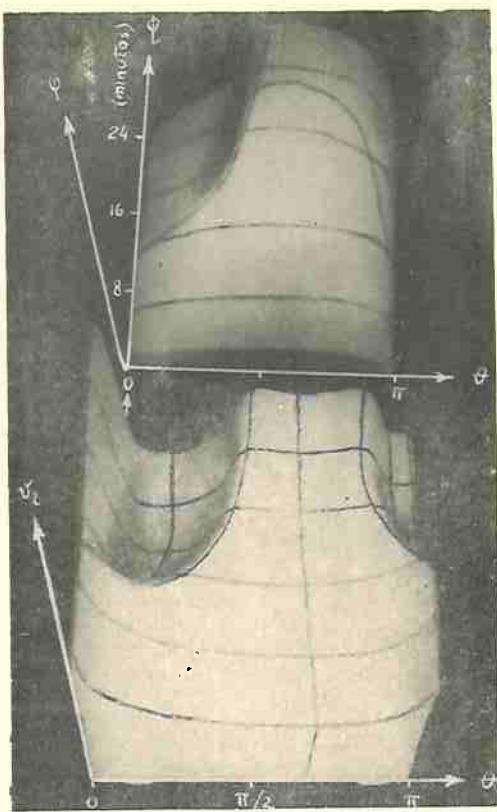


Fig. 2.3

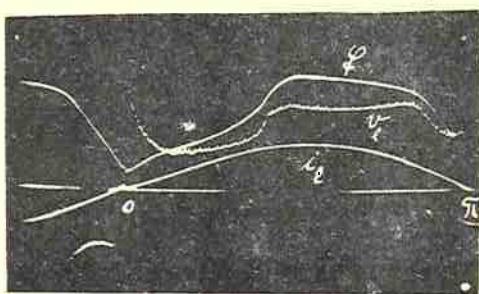
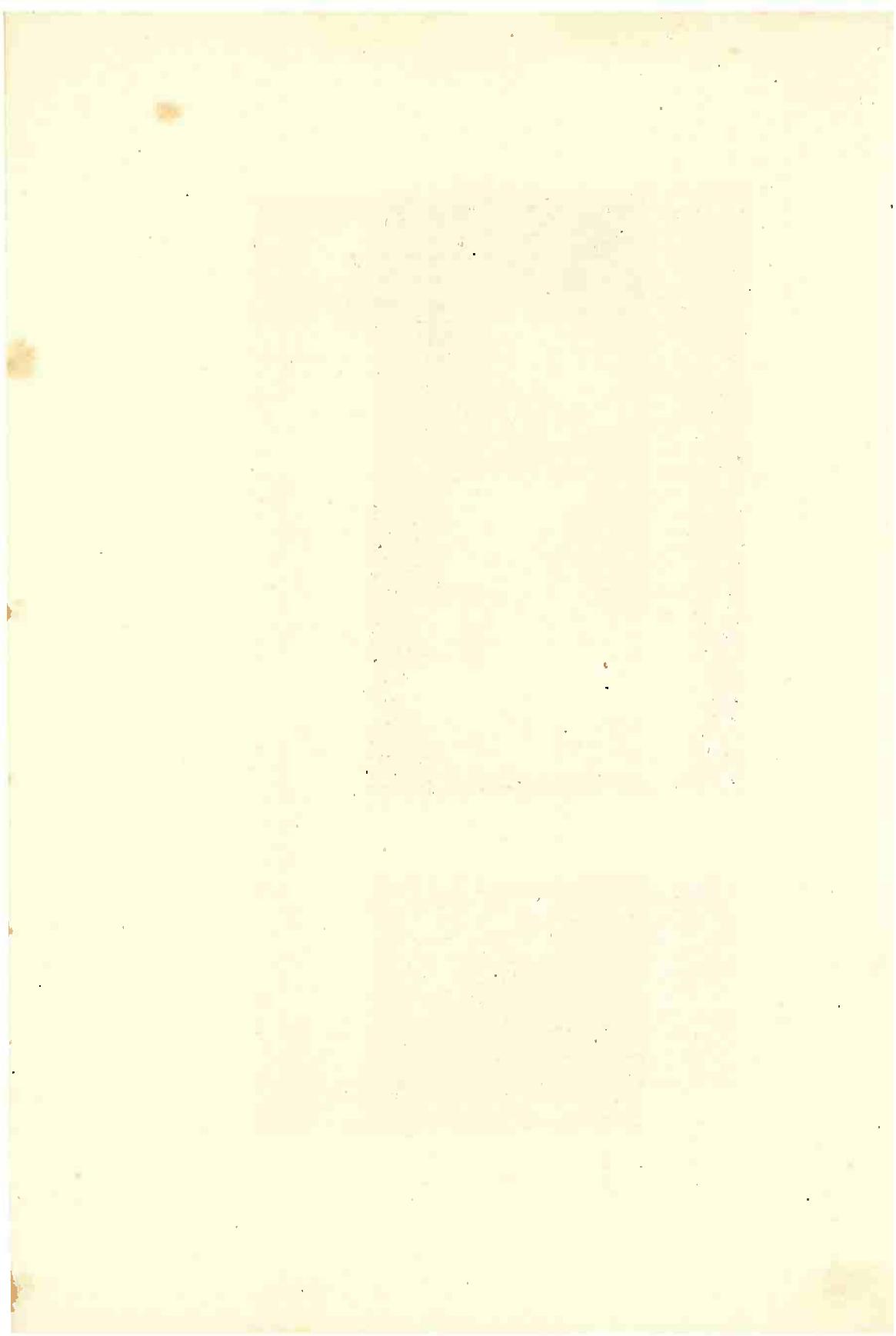


Fig. 2.4



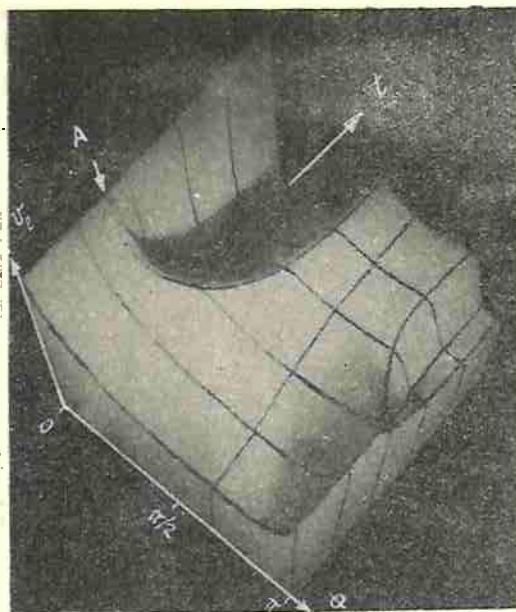


Fig. 2.5

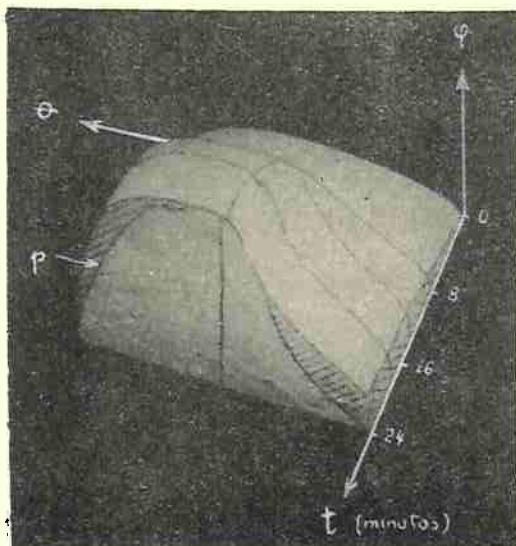


Fig. 2.6

mente, a potência instantânea fornecida à lâmpada também é nula.

O exame do diagrama espacial $v_t = f(\theta, t)$ mostra a grande modificação que sofre a curva de queda de tensão na lâmpada, à medida que, além do gás néon, entram na descarga os átomos de sódio. As figs. 2.3 e 2.5 mostram sob ângulos diferentes, o mesmo diagrama.

Na fig. 2.5 está assinalado por uma seta A no eixo dos tempos, o ponto que corresponde ao início da introdução dos átomos de sódio. Observa-se que nesse diagrama tem lugar uma depressão da curva de queda de potencial, depressão essa que aumenta em profundidade e se expande cada vez mais para valores de θ próximos de 30° ; para os ângulos compreendidos entre 75° e 150° , aproximadamente, nota-se uma grande elevação de v_t , com uma depressão de menor amplitude em cerca de 105° . Entre 105° e 180° a curva cai novamente, como mostra o diagrama.

A região entre 75° e 150° , ficando com um pico de queda de tensão próximo de $\theta = 90^\circ$, produz uma grande elevação da curva de potência, pois para esta região central também a corrente i_L atinge o seu máximo.

O significado disso é que, da tensão total aplicada ao sistema lâmpada-reactor, a queda de tensão na lâmpada aumentou, o que indica que a resistência da lâmpada nesta região aumentou, devido ao efeito dos átomos de sódio. Verifica-se que a curva correspondente ao início da operação, quando há apenas o gás néon, não apresenta essa anomalia.

Os átomos de sódio iniciam o seu percurso dentro da lâmpada a partir das paredes do tubo, onde está condensado o sódio em forma metálica, e são excitados à ressonância, emitindo a radiação característica, mas não conseguem entrar na parte central da descarga, onde predomina o gás néon. Muitos dos íons de sódio recombina e se neutralizam quando voltam à parede do tubo. É possível que o aumento da resistência da lâmpada na região central de

cada meio ciclo seja devida à redução da secção útil para a descarga, pois como já foi constatado, verifica-se que a descarga na lâmpada de sódio corresponde a uma descarga suporte de átomos de néon, que mantém a descarga, circundada por um tubo de átomos de sódio emitindo a radiação de ressonância , nas raias D₁ e D₂.

2.6 - Estudo das condições iniciais e finais

Para tornar mais fácil examinar as condições iniciais e finais do funcionamento da lâmpada de sódio, foram ampliados convenientemente os oscilogramas da fig. 2.1 correspondentes aos tempos t = 0 (início da operação) e t = 24 minutos (operação normal).

Os oscilogramas correspondentes à tensão v_l , corrente i_l e fluxo φ_l foram transportados diretamente em papel de desenho por meio de ampliação fotográfica do negativo, omitindo-se a oscilação de frequência alta que se observa nos mesmos, tendo-se pois, tomado a curva média.

Os dois oscilogramas estão colocados lado a lado na fig. 2.7a.b. Foram calculados os valores da potência instantânea (p) multiplicando-se as ordenadas da corrente e da tensão instantâneas.

Na fig. 2.7b a curva da potência instantânea foi reduzida na escala das ordenadas de tal modo que a ordenada da potência (P_{2m}) ficasse igual à ordenada máxima do fluxo (F_{2m}).

Na fig. 2.7a as ordenadas da curva de potência (p₁) foram reduzidas de modo que seu máximo valor fosse expresso por uma ordenada igual à do máximo de (p₁) na fig. 2.7b. Por outro lado, as ordenadas do fluxo φ₁ foram ampliadas de modo que seu valor máximo tivesse amplitude igual a P_{1m}.

A finalidade que tivemos em vista foi comparar as formas das curvas da potência e do fluxo no início e no fim do período inicial de transição.

2.7 - Conclusões do gráfico da potência e do fluxo

O exame da figura mostra que, ao iniciar-se a operação (fig. 2.7a), quando a descarga é feita por meio dos íons de néon, a curva do fluxo luminoso (Φ_1) praticamente coincide com a curva de potência (p_1), podendo-se concluir que existe proporcionalidade direta entre Φ_1 e p_1 . Esta figura, retirada de oscilogramas múltiplos, não permitiu verificar que a curva de Φ_1 não cai a zero quando (p_1) é nulo, mas veremos no parágrafo seguinte como esse fenômeno pode ser melhor evidenciado.

Na fig. 2.7b, entretanto, é flagrante a diferença entre as duas curvas, como é mostrado pelas zonas hachuradas, e também verifica-se que o fluxo para $p_2 = 0$ atinge valores que são, respectivamente, 18% e 10% do fluxo máximo, para os ângulos $\theta = 0$ e $\theta = \pi$.

A parte hachurada nas figuras mostra a ressonância dos átomos de sódio mesmo quando v_t e i_t são nulos, e consequentemente $p_t = 0$, excitação essa que é produzida pelos átomos metastáveis do gás néon.

A vida média de um átomo excitado é, em geral, curta, da ordem de 10^{-8} seg. Existem, entretanto, gases e vapores que podem ficar excitados durante tempos muito mais longos, da ordem de 10^{-4} a 10^{-1} seg, ou mesmo mais, como o hélio, néon, argônio, crípton e xênio.

Nessas condições, os átomos excitados com vida média longa, podem ter energia suficiente para excitar outros gases ou vapores, principalmente se estes tiverem menores potenciais de ressonância. Esse caso se verifica na lâmpada de sódio, pois o néon é um dos gases que permitem a existência de estados metastáveis e, além disso, tem potencial de ionização de 26,6 volts, superior ao do sódio, que é de 2,11 volts.

O néon pode, assim, não sómente levar o sódio ao estado excitado, mas chega a produzir a ionização do mesmo. Cabe, pois, ao gás néon man-

ter as condições de ionização que permitem a descarga dentro da lâmpada. A área hachurada na figura mostra o efeito da ressonância do sódio, provocada pelos átomos metastáveis do néon; como resultado prático, é reduzida a variação do fluxo luminoso da lâmpada, o qual, sem esse fenômeno, cairia a zero para valores nulos da potência.

2. 8 - Interferência produzida pela lâmpada de sódio nas rádiocomunicações

A curva da queda de tensão em operação normal, é mostrada de forma ampliada na fig. 2.4 na qual pode verificar-se que existe uma modulação de frequência elevada, de cerca de 5 000 ciclos/seg.

O exame dessa modulação mostra que a mesma não é produzida por onda senoidal e que a curva é de tipo tal que pode produzir harmônicas de ordem elevada.

Ao mesmo tempo, a subida abrupta da onda de queda de tensão para $\theta = 0$, a sua redução brusca para $\theta = \pi$ e as características apresentadas na parte central da curva, mostram outro tipo de onda com harmônicas de ordem elevada. A fig. 2.2 mostra um espetro das frequências harmônicas, determinadas até a ordem 23 a, indicando em percentagem as amplitudes das componentes em relação à fundamental, e também a localização da referida alta frequência de modulação.

As harmônicas da onda da queda de tensão e as harmônicas devidas à modulação, provocam interferências em circuitos rádioelétricos, que podem ser suprimidas por meio de blindagem ou de circuitos adequados, com os dispositivos técnicos habituais.

2. 9 - Gráfico do fluxo luminoso e sua flutuação

Para melhor examinar os efeitos da variação do fluxo luminoso no decurso do período de transição, foram registrados os ciclogramas que têm

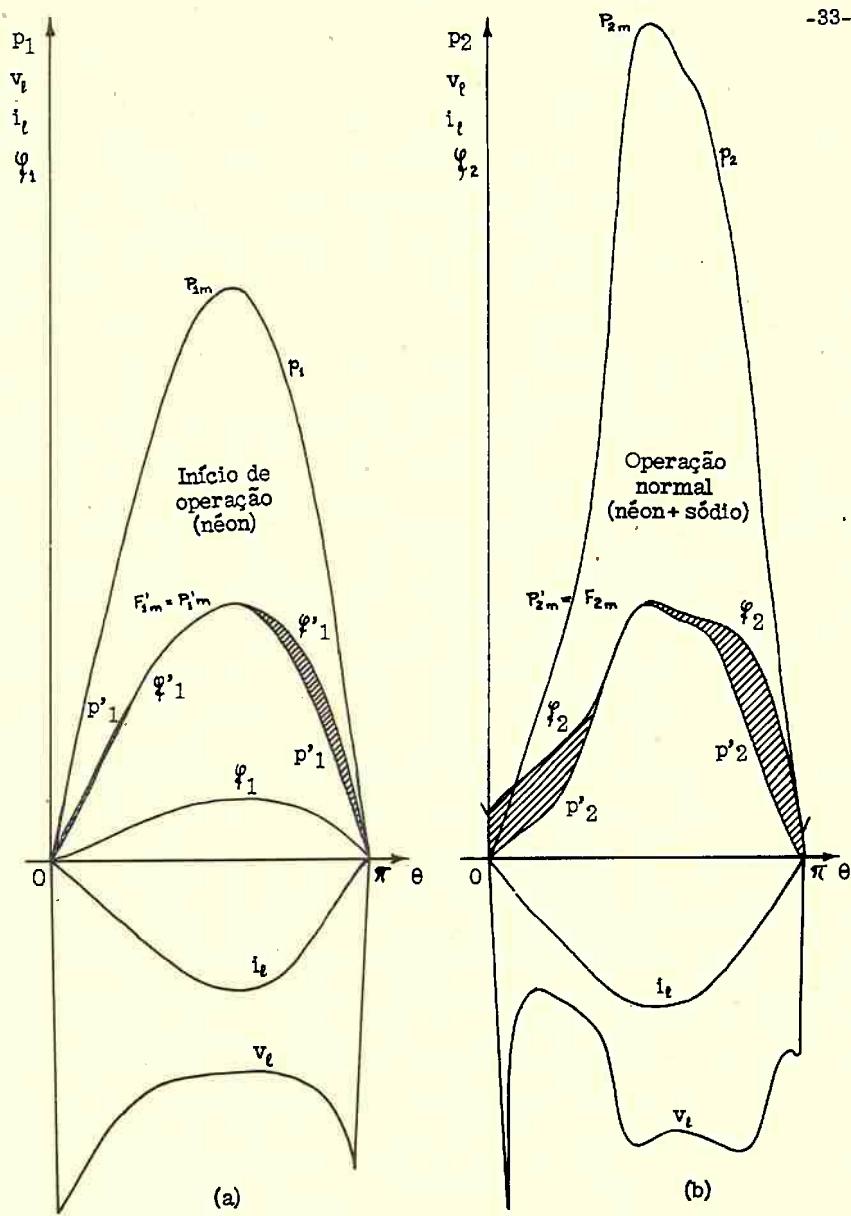


Fig. 2.7

$$\% \text{ Flutuação} = \frac{b - a}{b + a} \times 100\%$$

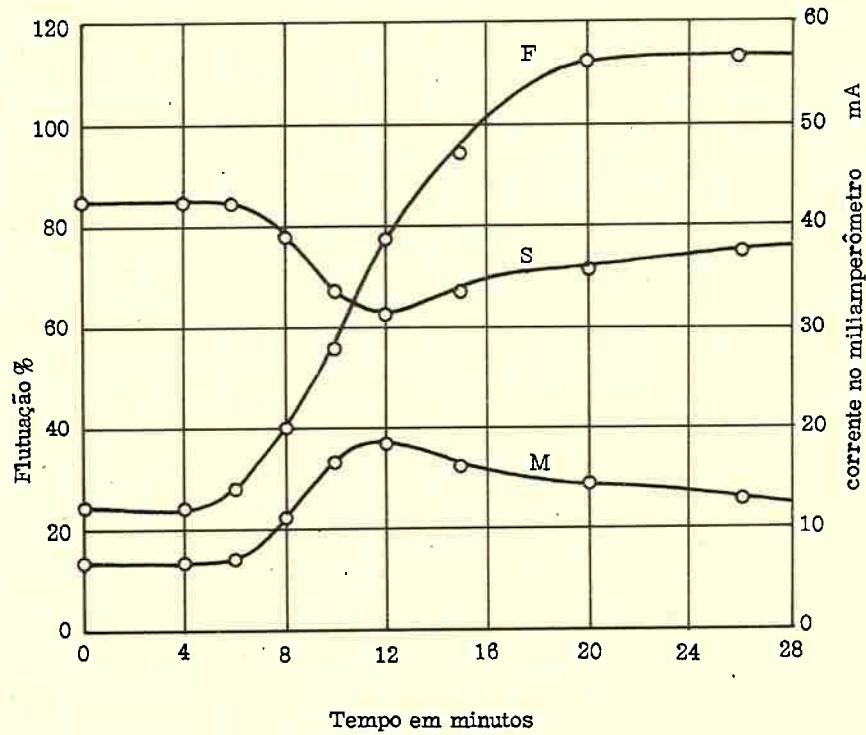
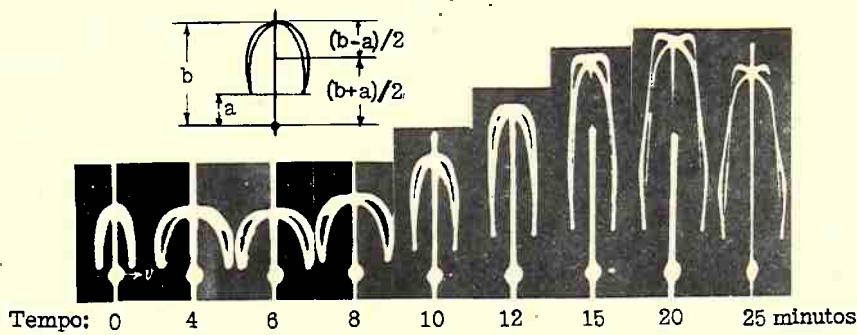


Fig. 2.8

como abcissa, a tensão senoidal de referência e, como ordenada, o fluxo luminoso (fig. 2.8). As figuras resultantes, obtidas para os tempos indicados nas mesmas, mostram que o fluxo tem frequência dupla daquela da linha, como evidentemente deveria ser, uma vez que a curva da potência é de frequência dupla daquela da tensão e da corrente.

Foram obtidos diretamente dos ciclogramas os valores para a determinação da flutuação do fluxo (S), a qual é responsável pelo efeito estroboscópico. No mesmo gráfico foi indicado o crescimento do fluxo luminoso até seu valor normal (curva F), em termos do valor médio medido pela indicação do miliamperômetro ligado em série com o polianalizador.

Pelo gráfico se verifica que sómente depois de 4 minutos é que o sódio começa evaporar e as raias espetrais D_1 e D_2 começam a ser visíveis com intensidade crescente até atingir, ao fim de 20 minutos, seu máximo. A curva (M), mostra a modificação introduzida pelo efeito dos átomos metastáveis, do gás néon, que reduzem a flutuação do fluxo, determinada pelo desvio em relação à linha média.

Bibliografia

BOURNE, H.K. - "Discharge Lamps for photography and projection"
Londres, Chapman & Hall Ltd., 1948.

COTTON, H - "Electric Discharge Lamps"
Londres, Chapman & Hall Ltd., Vol.XII, 1948.

FORSYTHE, William E. e ADAMS, Elliot Q. - "Fluorescent and other gaseous discharge Lamps"
New York, Murray Hill Books, Inc., 1948.

CAPÍTULO III

LÂMPADAS FLUORESCENTES

3. 1 - Generalidades

As lâmpadas fluorescentes são geralmente constituídas de um tubo de vidro contendo vapor de mercúrio sob baixa pressão, tendo em cada extremo um filamento metálico recoberto de material emissor de elétrons e tendo as paredes internas recobertas de material fluorescente, designado sob o nome genérico de "fósforo".

A descarga nesse tipo de lâmpadas é produzida através do vapor de mercúrio ionizado, e as condições de operação são tais que a maior eficiência é conseguida na radiação ultra-violeta de comprimento de onda de 2 537 Å.

É dessa radiação que depende a excitação do fósforo que recobre a parte interna da lâmpada, o qual converte a energia da raia de 2 537 Å em energia no espetro visível.

A escolha do fósforo determina a curva espetro-radiométrica da lâmpada, enquanto que da fosforescência do mesmo depende a característica da curva do fluxo luminoso emitido.

Sob o ponto de vista elétrico, a lâmpada comporta-se como uma impedância não linear tal que, uma vez iniciada a descarga, a corrente pode atingir valores capazes de provocar a destruição da lâmpada, a menos que o circuito seja provido de meios para limitá-las.

A limitação da corrente é feita geralmente por meio de resistor

ou reator em série com a lâmpada, apesar de se poder também utilizar um capacitor adequado.

Empregando-se o reator, que é o caso mais comum, o fator de potência do sistema é baixo, da ordem de 0,5 e, portanto, a onda de corrente está atrasada da onda de tensão por um ângulo da ordem de 60°.

Esta característica do funcionamento da lâmpada exige a aplicação de sistemas corretores do fator de potência, a fim de serem respeitadas as normas técnicas para a utilização de aparelhamento elétrico em corrente alternada.

O funcionamento normal da lâmpada sómente é atingido quando os cátodos estão à temperatura de regime e torna-se assim necessário prévia mente aquecer os, antes de se ligar a alta tensão que mantém a descarga. Daí por diante o próprio bombardeio dos cátodos mantém a temperatura adequada. Para realizar essa sequência de operações, é empregado um dispositivo, em geral formado por um par bimetálico ("Starter"), que atua sobre contatos, ligando primeiramente os filamentos em série com o reator e a seguir interrompendo bruscamente a ligação, criando assim o impulso de tensão de self-indução que inicia a descarga no vapor de mercúrio.

Há sistemas que não necessitam do "starter", pois que o circuito tem meios de prover a alta tensão inicial, que depois é reduzida quando aumenta a corrente através da lâmpada.

3. 2 - Característica da descarga

Para o estudo da característica da descarga utilizamos o polarizador e o oscilógrafo catódico, ligados de modo a obtermos o ciclograma da impedância característica $i = f(v)$, tendo como abcissa a tensão aplicada e como ordenada a corrente.

O circuito empregado é aquele indicado na fig. 3.1 . A lâmpada fluorescente, com o respectivo "starter", foi ligada em série com um reostato (R), reator (X) e amperômetro (A). As chaves monopolares S_1 e S_2 permitem retirar do circuito o reator (X) ou a lâmpada (L), respectivamente.

E a seguinte a marcha das operações que seguimos para obter a característica de uma lâmpada fluorescente:

- a) A resistência do reostato foi reduzida a zero, com as chaves S_1 e S_2 desligadas.
- b) A tensão da linha foi aplicada ao circuito, e esperamos até que, tendo operado o "starter", a lâmpada funcionasse normalmente. Lemos a corrente I.
- c) Aumentamos a resistência do reostato, mantendo a lâmpada em funcionamento, nestas condições com menor intensidade, e ligamos a chave S_1 , pondo fora do circuito o reator (X). A lâmpada ficou funcionando apenas com o reostato em série.
- d) Ajustamos o valor da resistência deste até que a corrente fosse a mesma que em (b). Designamos por R o valor da resistência em série.
- e) Obtivemos fotografia do oscilograma resultante da lâmpada e resistência em série.
- f) Fechamos a chave S_2 , pondo fora de circuito a lâmpada.
- g) Obtivemos uma fotografia do ciclograma da resistência.

Repetimos a mesma operação para valores de resistências mais baixas que a normal, o que correspondia a correntes superiores aos valores normais da lâmpada. Nessas condições foi necessário operar com rapidez nas etapas (d) e (e), pois a corrente excessiva poderia danificar a lâmpada.

As fotografias da fig. 3.2 mostram os ciclogramas combinados

da lâmpada e resistência série (A, B, C) e aquelas da resistência apenas (A', B', C') correspondentes, respectivamente, à operação normal com resistência R, e operação anormal com resistências série mais baixas e, portanto, correntes elevadas.

3.3 - Determinação gráfica da característica da descarga deduzida dos ciclogramas

Propomos o método seguinte para se obter a característica da descarga, baseado nos ciclogramas da resistência mais a lâmpada e da resistência respectivamente, e no método gráfico da linha de carga.

Pela observação das etapas para obter a característica da descarga descrita, verifica-se que a tensão eficaz aplicada é a mesma em todas elas e, portanto, todos os ciclogramas têm a mesma amplitude máxima na abscissa.

As ordenadas serão diferentes, pois, no momento em que se retira do circuito a lâmpada, a resistência do mesmo diminue e, consequentemente, a corrente aumenta.

A fig. 3.3 é uma cópia das fotografias 3.2B e 3.2B' que foram ampliadas e superpostas, a fim de mostrar mais claramente o método por nós empregado.

Deve-se anotar que o ciclograma de uma resistência pura é uma reta, condição evidenciada pela figura de Lissajous para o caso das componentes senoidais em fase.

Na fig. 3.3 a curva OBCO representa o ciclograma do circuito lâmpada-resistência, enquanto a reta OA representa o ciclograma da resistência. OD representa a tensão máxima aplicada ao sistema onde $V_m = \sqrt{2} V$. OF e OE são as ordenadas correspondentes às correntes máximas para os casos

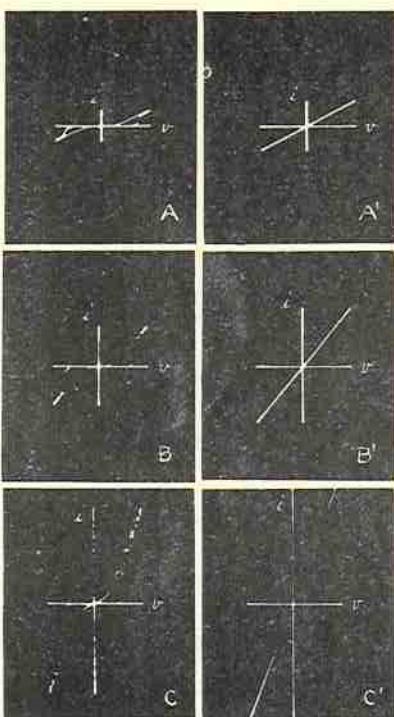


Fig. 3.2

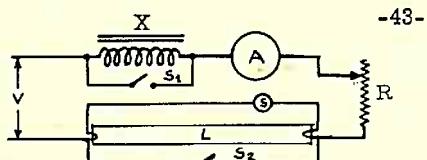


Fig. 3.1

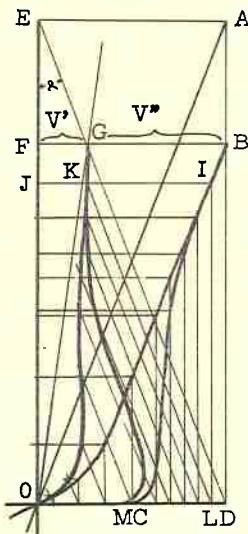


Fig. 3.3

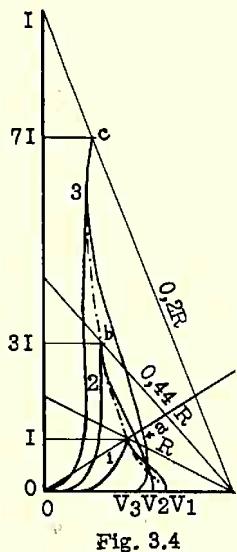


Fig. 3.4

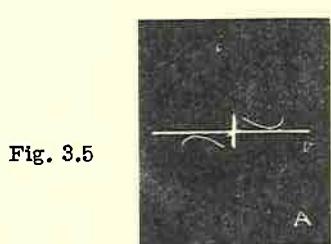
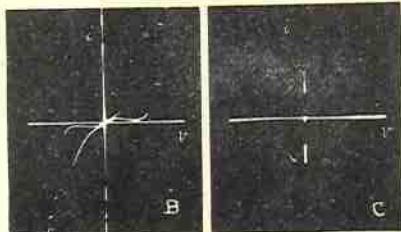


Fig. 3.5



considerados.

O método gráfico que propomos é o seguinte:

- a) Tracem-se as perpendiculares AE e AD e BD, sendo que AD e BD devem coincidir, pois V_m é o mesmo para os dois ciclogramas.
- b) Trace-se a diagonal ED.
- c) Pelo ponto B, trace-se a perpendicular BF ao eixo das ordenadas.
- d) O ponto de intersecção (G) de ED e BF, corresponde à ordenada máxima de corrente da lâmpada.
- e) Escolha-se um ponto I qualquer na característica OBC, e tracem-se as perpendiculares IJ ao eixo das ordenadas IL ao eixo das abscissas.
- f) Pelo ponto L trace-se uma paralela a ED, até interceptar a linha IJ no ponto K. Este é o outro ponto da característica.

Repita-se o processo para outros pontos no ciclograma da lâmpada-resistência e seguindo-se a construção ter-se-ão os pontos da característica da descarga no gás da lâmpada; estes, uma vez ligados, dão a curva característica de descarga OKGMO.

Prova do método

Consideremos o primeiro ponto determinado (G), que corresponde ao ponto máximo da característica. Desde que, pela construção gráfica:

$$OD = FB = FG + GB$$

e que

$$K'OD = V_m = \sqrt{2}V \quad , \text{ temos}$$

$$K'(FG + GB) = V_m = V' + V''$$

$$K''OF = I_m$$

Pela semelhança dos triângulos DEA e DGB, tem-se:

$$K \frac{GB}{OF} = \frac{V''}{I_m} = \frac{V_m}{I_m} = R$$

$$K \frac{FG}{OF} = \frac{V'}{I_m} = r'$$

onde k é a relação dos módulos das escalas e r' é o valor instantâneo da resistência.

Pelo ponto G da característica passa a linha que representa a resistência r' para esse ponto

$$r_t = r' + R = k \left| \frac{FG}{OF} + \frac{GB}{OF} \right| = k \frac{FG + GB}{OF} + k \frac{FB}{OF} = \frac{Vm}{Im}$$

Nota: O método pode ser utilizado para qualquer impedância Z , podendo-se, por esse meio, obter diretamente de um só ciclograma, no caso de circuitos lineares, o valor da resistência R . Um caso em que pode ser aplicado é na determinação da resistência de um reator linear, partindo do ciclograma representado pela elipse de Lissajous e considerado como sendo característica $i = f(v)$ da impedância.

3.4 - Conclusões tiradas das características dinâmicas

Seguindo-se o método indicado, foram obtidas as características da descarga no vapor de mercúrio para corrente normal e para corrente 3 e 7 vezes maior que a normal, por meio de análise gráfica dos ciclogramas da fig. 3.2 .

O resultado está mostrado na fig. 3.4, para as seguintes resistências em série com a lâmpada: R (valor normal), $0,44R$ e $0,2R$.

Um exame da característica da descarga mostra que a tensão inicial da descarga tem valores cada vez menores, pois $v_1 > v_2 > v_3$, e a diferença de potencial na lâmpada cai cada vez mais, conforme indica a linha média (característica estática), traçada unindo os valores máximos das várias características.

As curvas apresentam aspecto análogo ao de histeresis, devido aos efeitos de ionização.

A fim de verificar o fenômeno de ionização para quedas de tensão pequenas, foram tirados os ciclogramas representados nas figs. 3.5A, 3.5B

e 3.5C, nos quais a ordenada foi ampliada consideravelmente (50 vezes) utilizando-se um "shunt" do polianalizador que correspondia à correntes bem menores do que aquelas da experiência.

Observa-se nessas figuras que não há extinção da descarga, pois mesmo para pequenos valores da queda de tensão na lâmpada, há corrente, o que não se pode concluir do exame das figs. 3.2 .

Esse trecho da curva mostra a existência da ionização provocada pelo ciclo anterior, a qual permite mais facilmente obter o reinício da descarga.

Como efeito das correntes muito elevadas no ciclo anterior, mostra a fig. 3.5 C que a corrente no ciclo seguinte já é apreciável, mesmo para diferenças de potencial relativamente pequenas. Isso explica o fato de as curvas dinâmicas (fig. 3.4) no início da descarga terem tensões mais baixas do que aquelas correspondentes ao caso de correntes menores no ciclo anterior.

3.5 - Aplicação do gráfico das características dinâmicas

É possível fazer-se a lâmpada operar transitóriamente com grandes correntes para assim se obter fluxo intenso, como se emprega em fotografia.

Para isso basta operar a lâmpada no valor máximo normal, representado pelo ponto a (resistência R), e, por meio de uma chave magnética, reduzir a resistência para um valor R' (digamos $R' = 0,2R$, como no diagrama), a fim de se obter um transitório de fluxo luminoso correspondente ao pico da corrente mostrada em c.

Deve-se fazer muito pequeno o tempo de duração dessa corrente, pois de outro modo a energia dissipada na lâmpada seria suficiente para danificá-la.

3.6 - Estudo da descarga em corrente contínua

Em corrente contínua, o ponto de operação é determinado pela intersecção da reta representativa da resistência, com a característica estática. Esse ponto poderia ser, por exemplo, o ponto a da fig. 3.4, correspondendo à resistência R e à característica estática abc .

Sendo contínua e constante a tensão aplicada, a corrente também deveria sê-lo, admitindo-se que, para o ponto a, a resistência da lâmpada fosse caracterizada pela linha oa .

Para examinar o funcionamento nessas condições, foi empregado o circuito mostrado na fig. 3.7.

Ligamos o polianalizador de modo a registrar a corrente (i_t) na lâmpada, a tensão na lâmpada (v_t) e uma onda quadrada de 60 ciclos/seg para referência de tempo, como mostra a fig. 3.6.

As conclusões que se podem tirar do estudo da fig. 3.6 são as seguintes:

- a) Os oscilogramas mostram que, apesar de a tensão aplicada ser contínua, a queda de tensão na lâmpada sofre flutuações (flutuações espontâneas de tensão), que variam de 1 800 a 3 000 ciclos/seg e que se manifestam também no fluxo luminoso.
- b) Examinando em que região da lâmpada tais flutuações se apresentavam com maior intensidade, concluiu-se que é na região do ânodo que isso se verifica (note-se que a lâmpada tem dois cátodos emissores, um deles estando operando como ânodo).
- c) A frequência da oscilação é função da queda de potencial na lâmpada, a qual foi aproximadamente triplicada das figs. de A a C, enquanto que a corrente pouco varia.

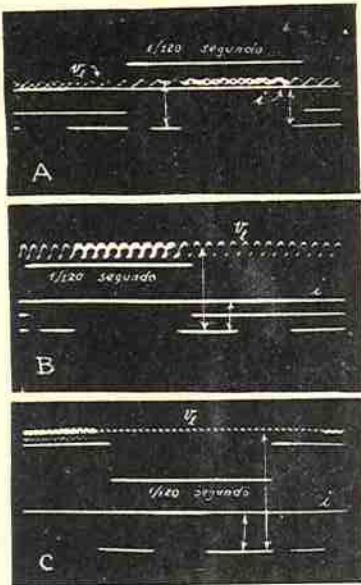
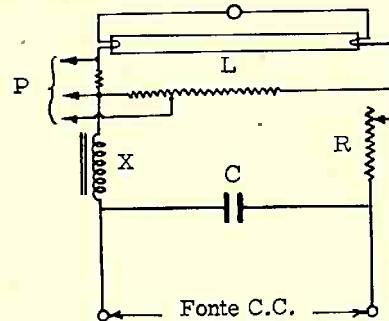


Fig. 3.6



Esquema das ligações, mostrando as precauções para filtrar a fonte C.C. e a ligação ao polianalizador.

Fig. 3.7

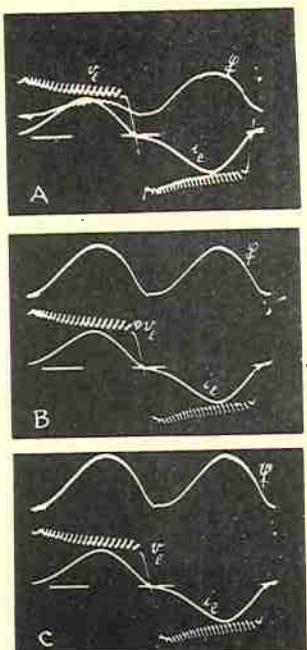
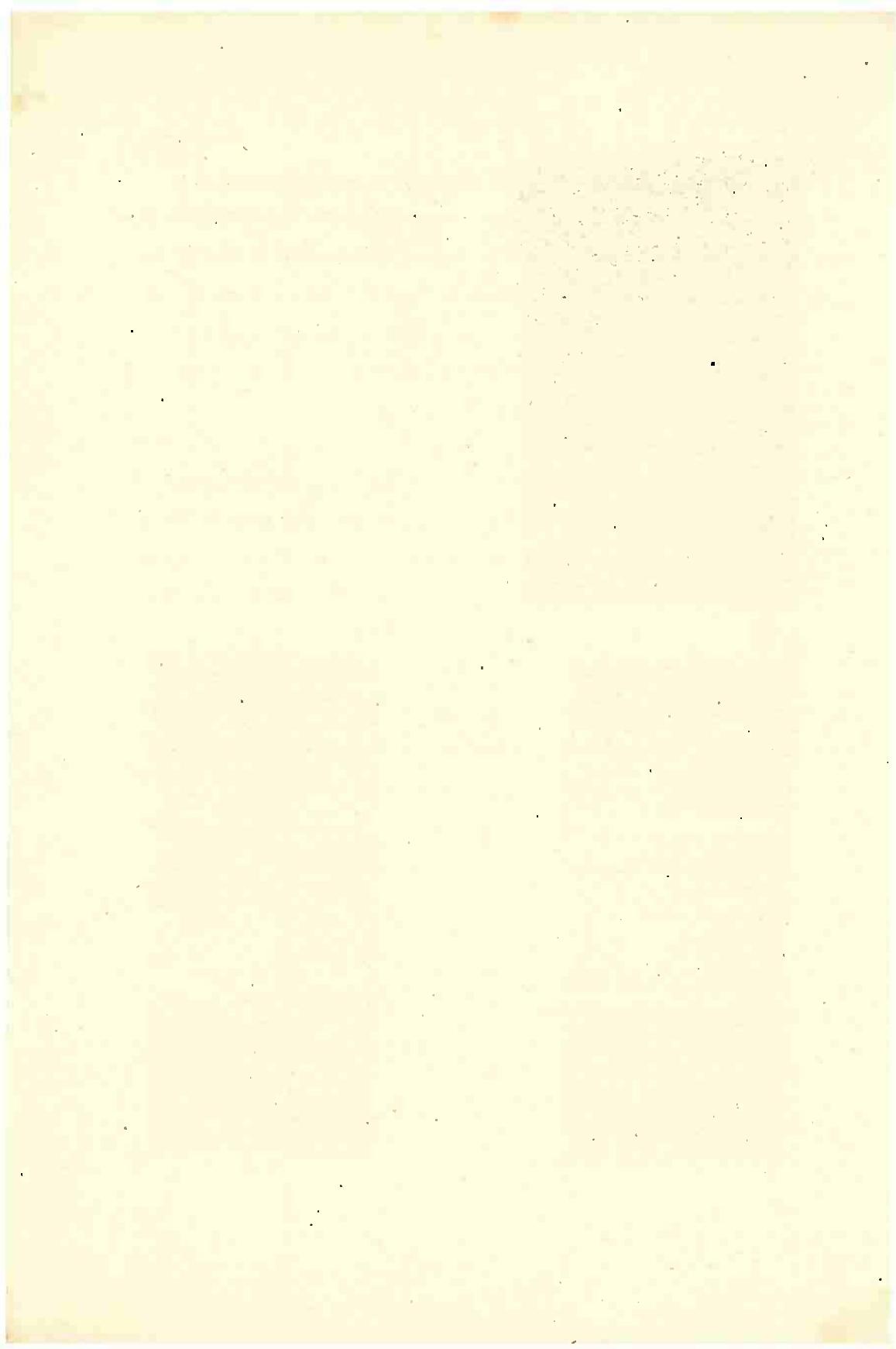


Fig. 3.8



3. 7 - Flutuações espontâneas da tensão nas lâmpadas operadas em C.A.

Tomamos a seguir uma série de fotografias de oscilogramas de v_t , i_t , $\frac{v}{i}$ (fig. 3.8) para várias posições do ponto de observação ao longo do tubo de uma lâmpada de 15 watts. Verificamos que a oscilação é provocada na proximidade daquele cátodo que, em cada meio ciclo, está polarizado positivamente e as fotografias mostram a oscilação que modula a onda de queda de tensão, como se verifica do oscilograma do fluxo luminoso.

Forsythe e Adams dão, como causa provável do fenômeno, as pequenas dimensões do ânodo. Nessas condições, a queda de potencial, necessária para "compelir" os elétrons no ânodo, pode exceder ao potencial de ionização do gás, produzindo uma descarga luminosa localizada. Esta vai formando fons e elétrons até que a tensão caiábaixo do potencial de ionização; aí desaparece a descarga luminosa, a tensão aumenta e o ciclo se repete.

Observa-se que a parte ascendente da onda é do tipo de saturação, como se dá em um processo acumulativo, e depois, repentinamente, cai a um valor baixo, sendo de curta duração esta queda, tipo de onda dente de serra, conforme se pode ver claramente nos oscilogramas da fig. 3.8 .

As frequências harmônicas desta oscilação podem ser captadas em um receptor, na faixa de rádiodifusão (550 - 1 500 Kc/seg).

Bibliografia

BOURNE, H.K. - "Discharge Lamp for Photography and Projection"
Londres, Chapman & Hall, pp.262-278,310, 1948.

COTTON, H. - "Electric Discharge Lamps"
Londres, Chapman & Hall, pp.226-250, 1946.

FORSYTHE, William, E. - "Fluorescent and other discharge lamps"
New York, Murray Hill Books Inc., pp.74-79, 1948.

KEMP, Philip - "Theory of Alternating Currents Wave-Forms"
Londres, Chapman & Hall, Vol. I, pp.97-102, 1934.

MAXFIELD, Frederick A. e BENEDICT, Ralph R. - "Theory of gaseous conduction and electronics"
New York, Mc Graw Hill Book Company, pp.345-348 e 393-403, 1941.

PREISMAN, Albert - "Graphical Constructions for Vacuum Tube Circuits"
New York, Mc Graw Hill Book Company, pp.44-49, 1943.

SPREADBURY, F.G. - "Electronics"
Londres, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd., pp.627-646, 1947.

CAPÍTULO IV

EFEITO ESTROBOSCÓPICO DAS LÂMPADAS DE DESCARGA EM GASES E DAS LÂMPADAS FLUORESCENTES

4. 1 - Sobre o efeito estroboscópico

Nas lâmpadas de descarga em gases, utilizadas em corrente alternada, o fluxo luminoso tem frequência dupla da frequência da tensão aplicada: para a frequência de 50 ciclos/seg e 60 ciclos/seg de uma rede, as frequências do fluxo luminoso são, respectivamente, 100 e 120 ciclos/seg.

Suponhamos um objeto, tal como uma régua, por exemplo, que se desloque segundo uma linha qualquer com velocidade v , e imaginemos que o fluxo luminoso seja tal que perdure por um tempo τ muito curto, repetindo-se porém com frequência de ν ciclos/seg, como mostra a fig. 4.1. O objeto será visto pelo observador apenas durante o tempo τ , em que a lâmpada emitir o fluxo luminoso e terá seus contornos bem definidos se o deslocamento sofrido pelo objeto fôr des- presível nesse tempo.

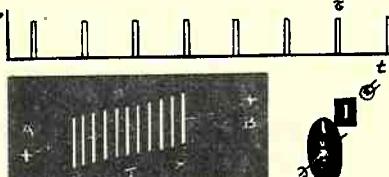


Fig. 4.1

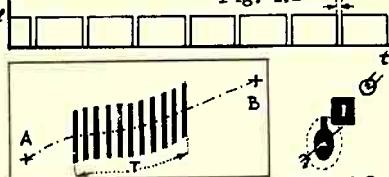


Fig. 4.2

Se o tempo necessário para o objeto se deslocar do ponto A ao ponto B fôr superior àquele que corresponde ao tempo de persistência da imagem na retina (T), o observador terá a sensação de ver o objeto em várias posições intermediárias. Assim, poderão ser vistos T/ν imagens, tal como nas fotografias obtidas com lâmpadas do tipo "multi-flash". No exemplo acima o observador terá a sensação de ver T/ν imagens que se deslocam de A para B

com velocidade v .

Imaginemos agora um tipo diferente de impulso para o fluxo luminoso. Em lugar de ser como aquele mostrado na fig. 4.1, façamos com que o fluxo deixe de existir justamente nos intervalos de duração ζ , repetindo -se ainda com frequência ν ; neste caso, o objeto deixará de ser visto durante o tempo ζ e, se este for pequeno, o deslocamento sofrido pelo objeto será desprezível e as linhas dos contornos serão bem definidas, limitando uma área em preto, como mostra a fig. 4.2.

A realização prática da experiência pode ser feita com discos perfurados ou denteados, como é indicado ao lado de cada figura.

É evidente que entre estes dois casos extremos podemos enquadrar todas as formas de curvas, exprimindo a variação do fluxo luminoso, e assim obter os efeitos estroboscópicos mais diversos possíveis, para os objetos assim iluminados.

Nos tipos de lâmpadas estudados, o efeito estroboscópico é muito variado e sómente ele pode ser atenuado reduzindo-se a flutuação do fluxo luminoso.

O efeito estroboscópico constitue um fator de insegurança no trabalho com peças mecânicas que giram com frequência determinada, e que podem parecer estar girando com velocidades muito diversas daquelas em que realmente se encontram.

Acreditamos que o desenvolvimento desta técnica experimental ofereça um método muito seguro e simples para a determinação do tempo efectivo de persistência das imagens na retina. Esta aplicação está sendo estudada pelo autor, num trabalho a ser publicado ulteriormente.

4. 2 - Correção do efeito estroboscópico

A redução da variação do fluxo luminoso, nas lâmpadas fluorescentes, depende do tipo de "fósforo" empregado, pois que a fosforescência prolongada contribue para atenuar as flutuações.

Como ainda assim, com os fósforos comumente utilizados, não se consegue um resultado satisfatório, as lâmpadas são operadas em circuitos difásicos e trifásicos, pois no caso de haver diferença de fase entre as curvas da corrente e da tensão das várias lâmpadas, os respectivos fluxos luminosos ficam também defasados e a soma dos mesmos tem assim uma flutuação menor, bem como uma frequência maior (dupla ou tripla da que ocorre no circuito monofásico, com uma só lâmpada).

A fim de podermos comparar a curva do fluxo luminoso com o seu efeito estroboscópico, imaginamos a técnica de fotografar um disco recoberto de veludo negro, sobre o qual foi adatado um raio pintado de branco, girando a cerca de 600 r.p.m. e recebendo luz da lâmpada a ser estudada.

Resolvemos estudar um conjunto de lâmpadas de descarga em gases e de lâmpadas fluorescentes, de vários tipos e diversos fabricantes, a fim de podermos apresentar um quadro de resultados comparativos, referentes à flutuação do fluxo luminoso, ao mesmo tempo que fazer o registro do efeito estroboscópico, tal como ele se apresenta, na prática, aos olhos de qualquer observador.

Temos a satisfação de poder declarar, ao fim do mesmo trabalho experimental que, as fotografias, colhidas de acordo com essa técnica, correspondem muito satisfatoriamente à impressão visual direta que se pode ter do efeito estroboscópico, observando um objeto em movimento sob a iluminação daquelas lâmpadas, de fluxo luminoso variável.

As fotografias correspondentes são mostradas nas figs. 4.3, 4.4

e 4.5 e abaixo de cada uma delas foi apresentado o oscilograma do fluxo luminoso correspondente. Para fins de comparação, a amplitude da onda do fluxo luminoso foi mantida próxima da amplitude de referência - linha representando a tensão de 1 volt aplicada ao oscilógrafo catódico.

Os resultados relativos ao efeito estroboscópico estão resumidos na tabela V.1 e confirmam as observações feitas por outros experimentadores.

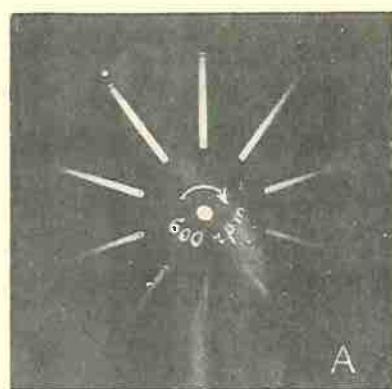
Tabela V.1

Lâmpadas	% desvio em relação ao valor médio
Fig. 4.3	
A - Strobotac	(Pulso)
B - de Sódio	66,5%
C - Lâmpada Philora	78,5%
D - Lâmpada Philora	13%
Fig. 4.4	
A - 1 Fluorescente 15w-white-3 600° (monofásico)	30,0%
B - 2 Fluorescentes 15w-white-3 600° (difásico)	12,0%
C - 3 Fluorescentes 15w-white-3 600° (trifásico)	6,5%
D - Incandescente - 300 watts	3%
Fig. 4.5	
A - Lâmpada em arco	50%
B - Lâmpada fluorescente retificadora de onda completa *	14%

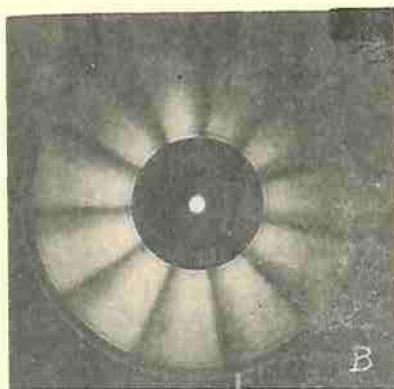
A propósito desses resultados colhidos em nossos trabalhos, achamos oportuno fazer ainda os seguintes comentários:

As fotografias da fig. 4.4 são apresentadas de modo a mostrar a redução progressiva do efeito estroboscópico, para os vários circuitos empregados para iluminação fluorescente.

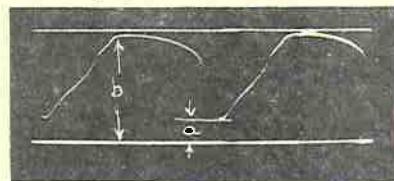
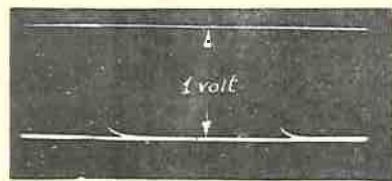
* Foi obtido de umalâmpada fluorescente comum, queimando-se o filamento de um dos lados e utilizando-se os suportes do mesmo como placas, para retificação de onda completa. O outro filamento ficou agindo como cátodo emissor.



A



B



C



D

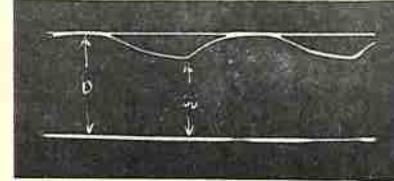
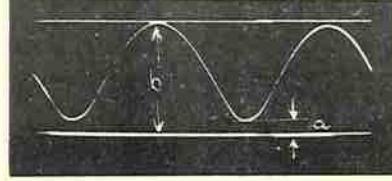


Fig. 4.3

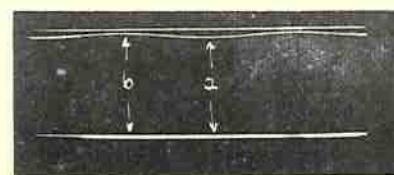
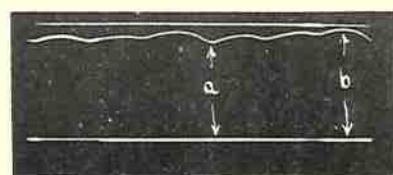
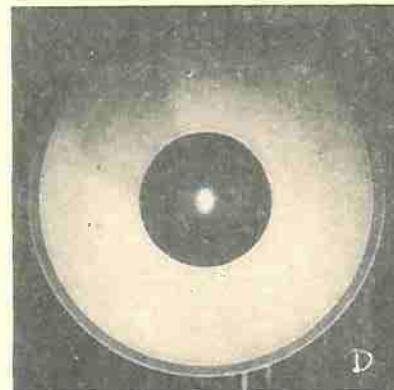
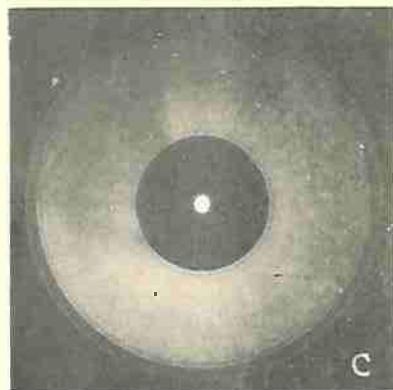
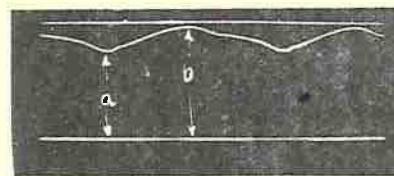
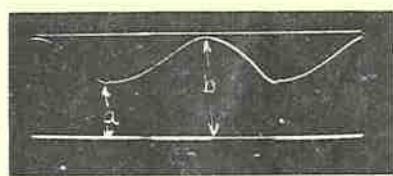
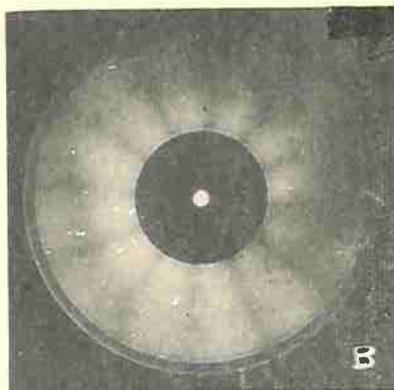
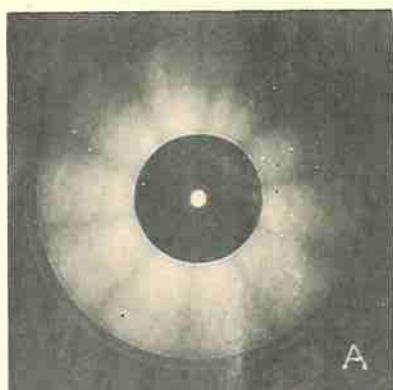
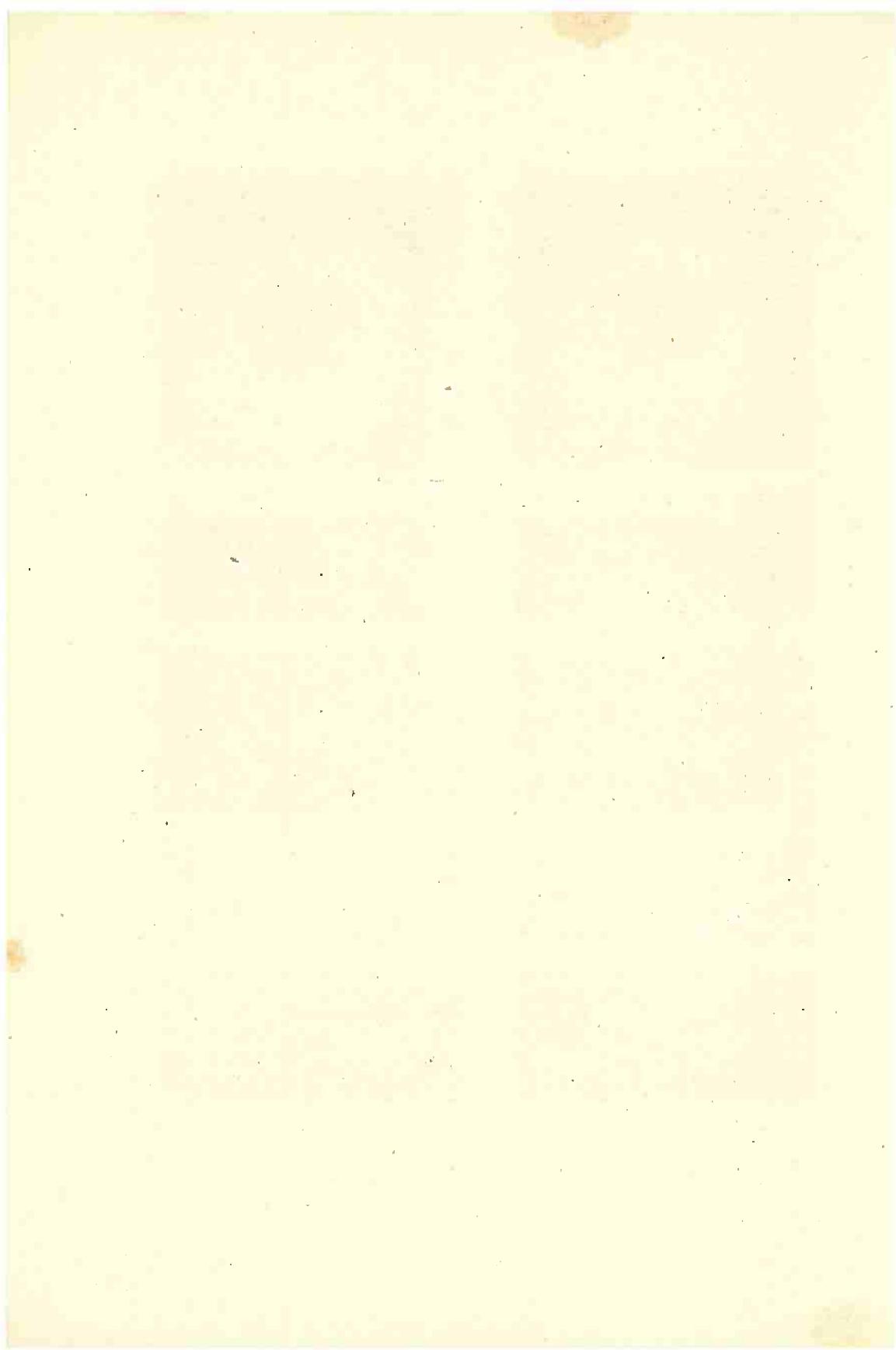
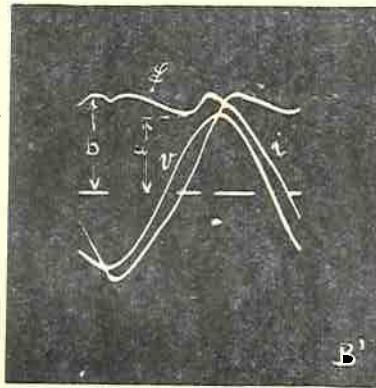
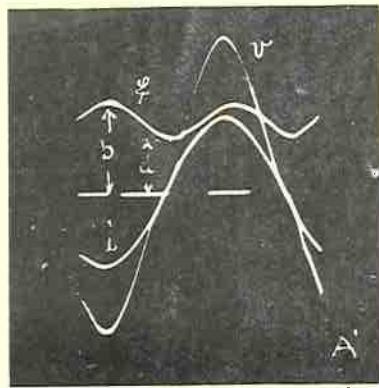
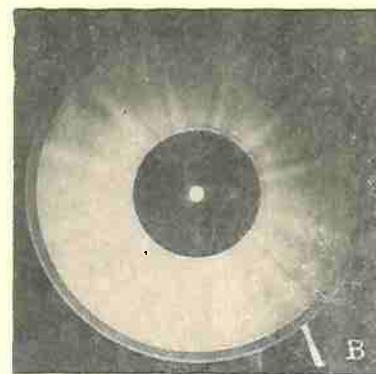


Fig. 4.4





A - Arco elétrico com carvões comuns.

A' - Oscilogramas de v , i e ϕ no arco.

B - Lâmpada fluorescente comum, com um dos filamentos queimados, operando como retificadora de onda completa.

B' - Oscilogramas de v , i e ϕ , correspondentes à lâmpada empregada como retificadora.

Fig. 4.5

A lâmpada Strobotac define bem o objeto, como se vê na fig. 4.3 A, enquanto que sob a luz da lâmpada de sódio aparece a zona escura limitada pelos contornos do mesmo (fig. 4.3B).

De todas as lâmpadas e circuitos estudados sob o aspecto estroboscópico, a lâmpada incandescente é que apresenta o menor efeito, seguindo-se o sistema de 3 lâmpadas White 3 600°, ligadas em linhas trifásicas.

4. 3 - Efeito estroboscópico das lâmpadas incandescentes

Para podermos verificar, mais completamente, o efeito da variação do fluxo das lâmpadas incandescentes, foram empregados o polianalizador e o oscilógrafo catódico para registrar o ciclograma do fluxo luminoso. Dispondo desses recursos, ocorreu-nos um método original para a determinação da flutuação do fluxo luminoso, especialmente adequado para os casos de baixo valor da mesma flutuação. Por esse método, de que não encontramos referência alguma na literatura técnica, torna-se possível medir o valor da flutuação diretamente da figura, por simples comparação de valores das ordenadas.

O método por nós imaginado consiste em adotar, como sinal aplicado ao oscilógrafo na direção das abcissas, em vez da tensão senoidal de 60 seg^{-1} (que corresponde a alimentação da lâmpada), uma oscilação de frequência muito mais alta, da ordem de 15 Kc/seg, de modo que o poder resolutivo do olho não permitisse identificar as curvas da resultante figura de Lissajous, em virtude de se acumularem em pequena área um número muito grande de linhas. Nessas condições a figura se apresenta como um retângulo iluminado, que tem os lados horizontais iguais ao dobro da amplitude da onda de 15 Kc/seg, e os outros lados iguais ao dobro da amplitude de variação do fluxo, correspondendo a ordenada do centro do retângulo ao valor médio do fluxo luminoso.

Esses elementos fotográficos, obtidos com lâmpadas de 5 - 15 - 25 - 60 - 100 - 150 - 200 - 300 e 500 watts, permitiram traçar a curva de variação do fluxo em relação ao valor médio (fig. 4.6). Da mesma curva pode-se concluir que, para as lâmpadas de potência acima de 150 watts, que são as mais empregadas em iluminação, a flutuação é inferior a 4%, correspondendo, portanto, a um efeito estroboscópico muito pouco sensível.

Como se vê na documentação fotográfica, êsses resultados, particularmente importantes na prática, foram verificados por um método novo e simples, com grande segurança para os valores numéricos.

Acreditamos que tal método poderia ser adotado com vantagem nos laboratórios técnicos de iluminação, mais do que isso, parece que poderia ser extendido a todos os casos de medidas relativas ao gráu de flutuação de qualquer grandeza que possa ser convenientemente registrado por meio do oscilógrafo.

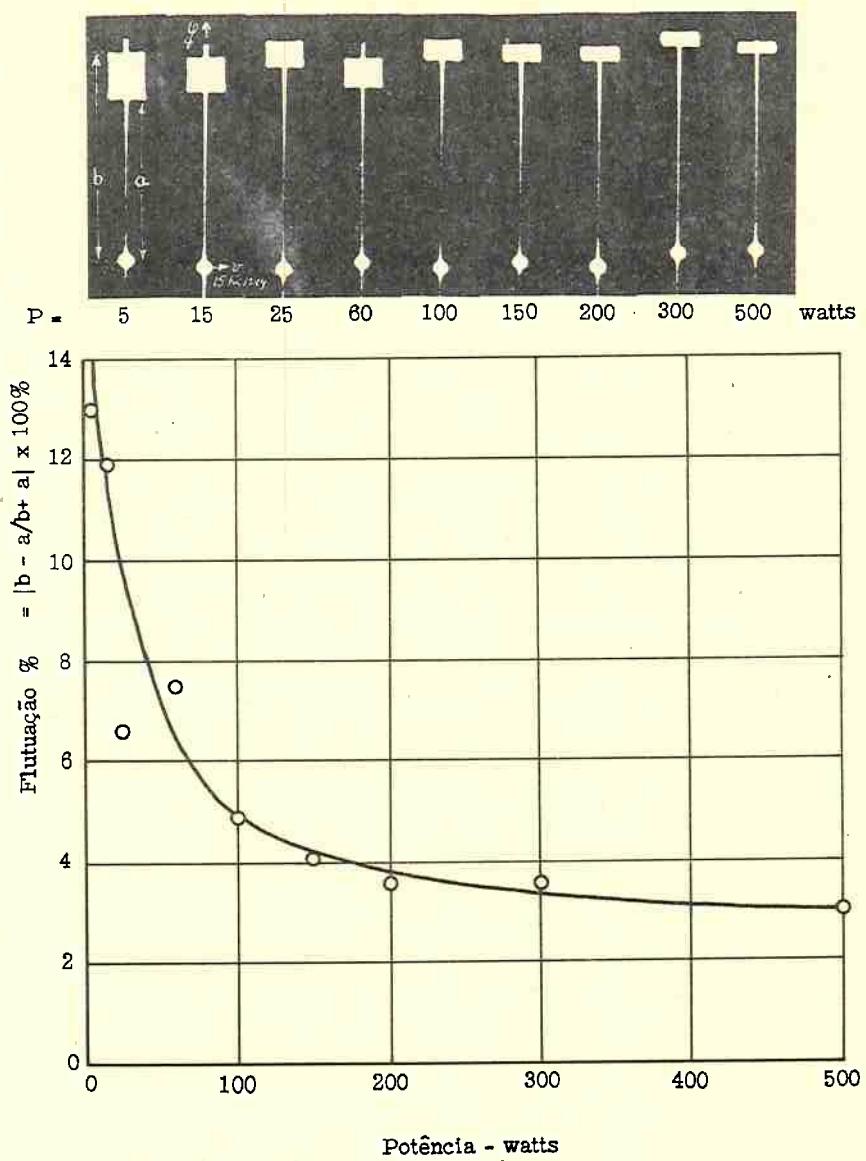
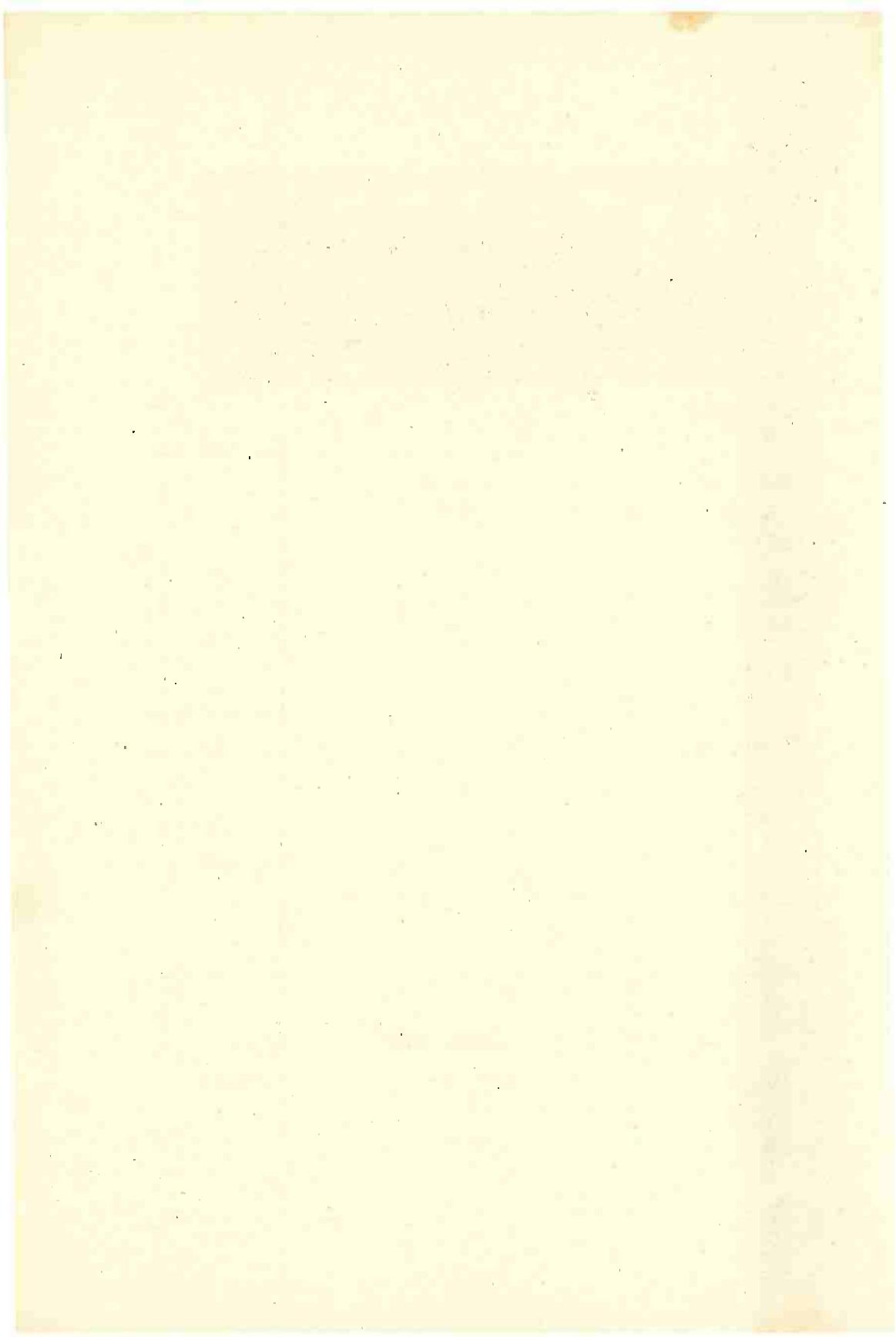


Fig. 4.6



CAPÍTULO V

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NAS LÂMPADAS FLUORESCENTES

5.1 - Fator de potência da lâmpada

Como se verifica dos oscilogramas mostrados nos capítulos anteriores, a tensão aplicada e a corrente na lâmpada anulam-se para os ângulos $\theta = 0, \pi, 2\pi, \dots n\pi$, radianos.

Como nem a corrente nem a tensão correspondem a ondas senoidais, o fator de potência da lâmpada, que é definido como a relação entre a potência efetiva e a potência aparente (watts/volt-ampéres), não pode atingir o valor 1,00.

Nessas condições, mesmo nos casos em que se emprega resistências em série com a lâmpada, para limitar a corrente no arco, pode-se apenas considerar que o $\cos\Phi$ é próximo da unidade.

Supondo-se que a tensão aplicada seja senoidal e que a corrente através da lâmpada e resistência tenha apenas harmônicas ímpares, pode-se escrever, para o fator de potência:

$$\cos\theta = E_1 I_1 \cos(\alpha_1 - \alpha'_1) / E_1 \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots I_n^2}$$

onde:

E_1 = Valor eficaz da tensão senoidal aplicada de frequência ν .

I_1 = Valor eficaz da componente fundamental da corrente de frequência ν .

I_3, I_5, I_7, \dots = Valores eficazes das outras harmônicas da corrente.

α_1 = Ângulo de fase inicial da onda de tensão E_1 .

α'_1 = Ângulo de fase inicial da corrente I_1 .

Da expressão acima consegue-se que sómente com a análise harmônica da onda da corrente é que se pode determinar o fator de potência do circuito. Entretanto, para um primeiro cálculo aproximado, que julgamos satisfatório para os fins das aplicações práticas, admitiremos que a onda da corrente possa ser considerada como senoidal.

Da mesma forma, limitaremos o nosso estudo à hipótese razoavelmente aceitável na prática, de que a tensão da linha corresponda a uma onda senoidal.

Essas simplificações são justificáveis pela circunstância de que no valor final do fator da potência, o que interessa é a ordem de grandeza da mesma, e a condição de que ele seja superior a 0,8.

5. 2 - Correção do fator de potência por meio de capacitores ligados em paralelo na linha

Normalmente as lâmpadas são empregadas com reatores em série e o fator de potência equivalente é baixo, da ordem de 0,5, ficando a corrente atrasada em relação à tensão.

A corrente tem uma componente reativa $I \sin \Phi$ que poderá ser neutralizado por outra corrente defasada em avanço e obtida por meio de capacitores ligados em paralelo na linha.

O valor aproximado da necessária capacidade, admitindo-se sempre senoidais as ondas da corrente e da tensão, pode ser determinado pelas equações abaixo, tendo em vista dar ao fator de potência um valor próximo à unidade.

$$C = 10^6 / 2\pi V X_C \text{ microfarads}$$

$$X_C = V / I \sin \Phi$$

$$C/I = 10^6 \sin \Phi / 2\pi V \text{ microfarads/ampére}$$

Para $V = 120$ volts, $\omega = 60 \text{ seg}^{-1}$, $\cos \phi = 0,5$ e $\operatorname{sen} \phi = \sqrt{3}/2$ tem-se:

$$C/I = 10^6 \cdot \sqrt{3}/4\pi \cdot 60 \cdot 120 = 19 \mu\text{F/A}$$

A saber, para cada ampére eficaz empregado nas lâmpadas fluorescentes, é necessária uma capacidade de 19 microfarads.

5.3 - Correção do fator de potência pelo sistema "Tulamp"

O sistema conhecido pelo nome de "Tulamp" consiste de duas lâmpadas ligadas de forma que a diferença de fase entre as correntes das mesmas seja de 120° . Este sistema não sómente reduz o efeito estroboscópico, como foi mostrado na fig. 4.4B, como também melhora o fator de potência.

Uma das lâmpadas é ligada à linha através de um reator, enquanto a outra tem um capacitor adequado em série com o respectivo reator, o que provoca um avanço da corrente em relação à tensão, de ângulo tal que corrige o fator de potência.

O capacitor em série deve ter, para realizar essas condições, uma reatância capacitiva dupla da reatância indutiva do reator. Para o fator de potência 0,5, pode-se escrever, com suficiente aproximação:

$$X_L = V \operatorname{sen} \phi / I = \sqrt{3} V / 2I$$

$$X_C = 2X_L = 2 \cdot \sqrt{3} V / 2I = 1,732 V / I$$

$$C = 10^6 / 2\pi \omega X_C = 10^6 I / 2\pi \cdot 60 \cdot 1,732 \cdot V$$

Para $\omega = 60 \text{ seg}^{-1}$ e $V = 120$ volts, tem-se:

$$C/I = 10^6 / 2 \cdot 60 \cdot 1,732 \cdot 120 = 12.8 \mu\text{F/A}$$

A saber, para cada ampére eficaz em uma das lâmpadas, é necessário uma capacidade de 12.8 microfarads, melhorando o fator de potência do sistema formado pelas duas lâmpadas. Nestas condições, cada ampére eficaz utilizado na iluminação, requer, em última análise, a metade de 12.8, ou seja, 6.4 microfarads.

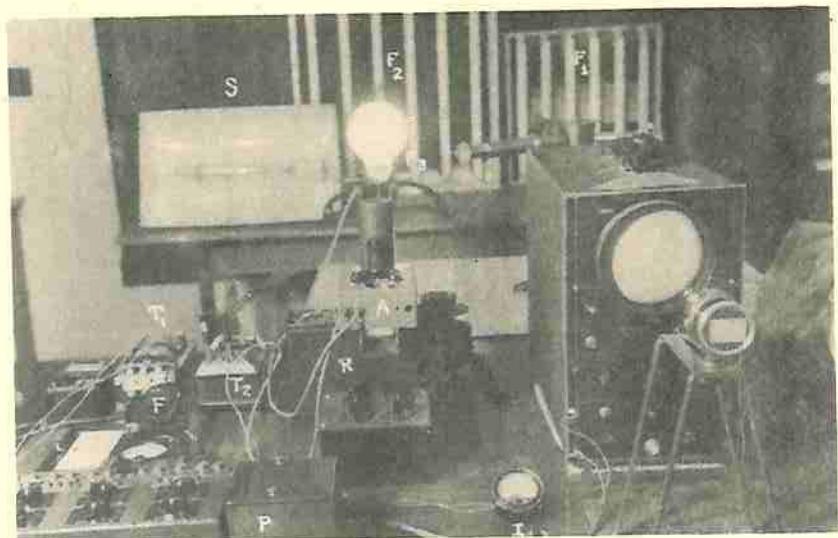


Fig. 5.1

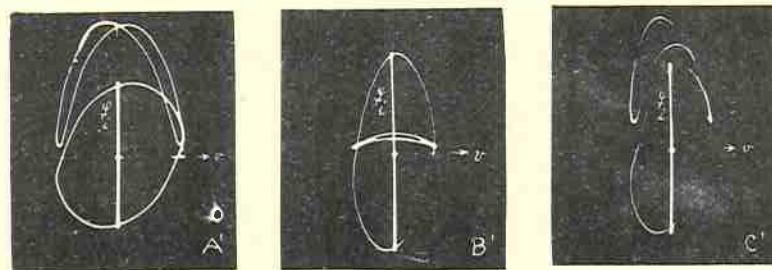
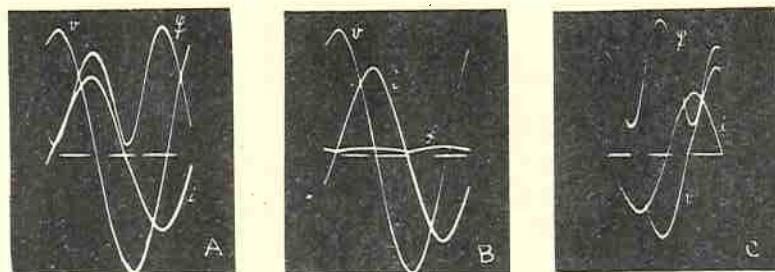
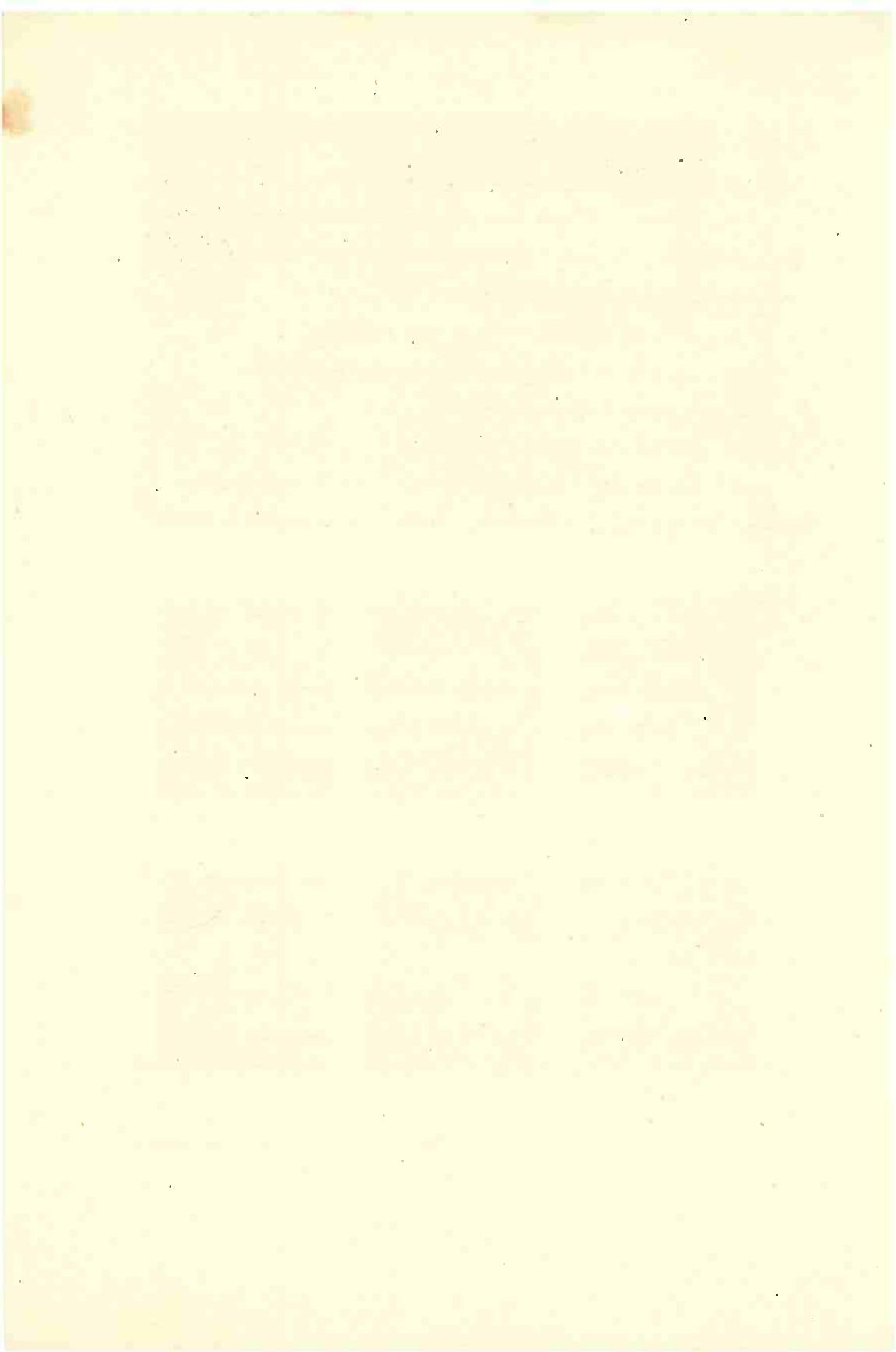


Fig. 5.2



5. 4 - Oscilogramas para vários tipos de lâmpadas

Para a realização das experiências que tínhamos em vista fizemos a disposição geral do aparelhamento como é mostrada na fotografia 5.1, na qual assinalamos os aparelhos seguintes:

F₁ = lâmpadas fluorescentes de 15 watts (trifásico)

F₂ = lâmpadas fluorescentes de 30 watts (trifásico)

F₃ = lâmpadas fluorescentes Phillora

A = válvula fotoelétrica e amplificador

T₁ = transformador do tipo de dispersão para a lâmpada de sódio

T₂ = transformador do tipo de dispersão para a lâmpada fluorescente Phillora

F = fotômetro Weston

R = fonte de energia (C.C.) para o amplificador e válvula fotoelétrica

P = polianalizador

I = miliamperômetro de controle em série com o polianalizador.

Os oscilogramas que obtivemos, graças ao emprêgo combinado do polianalizador-oscilógrafo catódico e da célula fotoelétrica com amplificação "cathode follower", são apresentados nas figs. 5.2 de A a C e 5.3 de A a H.

Como estão representadas as curvas da tensão, corrente, fluxo luminoso, pode-se examinar em conjunto as características dos vários tipos de lâmpadas e circuitos estudados por nós, nas condições de operação mostrados na tabela abaixo.

O efeito da correção do fator de potência pelo emprêgo do sistema "Tulamp" é mostrado nas figs. 5.3E e 5.3E'. Oscilogramas de lâmpadas com resistência em série, e portanto já com fator de potência alto, são mostrados nas figs. 5.3(A, B, C, F, G).

Todos os outros oscilogramas das figs. 5.2 e 5.3 correspondem

às lâmpadas com fator de potência baixo. Achamos conveniente mostrar para alguns casos os ciclogramas correspondentes.

Tabela

A = Lâmpada Phillora - 75 w - HP 300

A' = Lâmpada Phillora - 75 w - HP 300

B = Lâmpada Phillora - HPL 300 - 75 w. Início de operação.

B' = Lâmpada Phillora - HPL 300 - 75 w. Início de operação.

C = Lâmpada Phillora - HPL 300 - 75 w. (operação normal)

C' = Lâmpada Phillora - HPL 300 - 75 w. (operação normal)

A = Lâmpada Phillora - 180 w. - 3 000 lumens (início de operação)

B = Lâmpada Phillora - 180 w. - 3 000 lumens (operação normal)

C = Lâmpada fluorescente pequena, tipo bulbo.

D = Lâmpada fluorescente de 30 watts-white-3 500° (monofásico)

D' = Lâmpada fluorescente de 15 watts-white-3 500° (monofásico)

E = Lâmpada fluorescente de 30 watts-white-3 500° (monofásico)

E' = Lâmpada fluorescente de 15 watts-white-3 500° ("Tulamp")

F = Lâmpada fluorescente de 30 watts com resistência em série (v, v_e, i)

G = Lâmpada fluorescente de 30 watts com resistência em série (v, f, i)

H = Lâmpada fluorescente de 15 watts com reator simples

H' = Lâmpada fluorescente de 15 watts com reator simples (ciclograma).

■ - A lâmpada indicada é do tipo fluorescente, com limitação da corrente por meio da resistência de um filamento de tungstênio dentro da própria lâmpada, a qual é do tipo de bulbo como as lâmpadas incandescentes. Pode-se verificar pelo exame dos oscilogramas A e B que no início opera apenas o filamento e, depois, aumenta o fluxo luminoso e também o efeito estroboscópico. Este, entretanto, é menor que o de muitas outras lâmpadas sem circuito especial de correção.

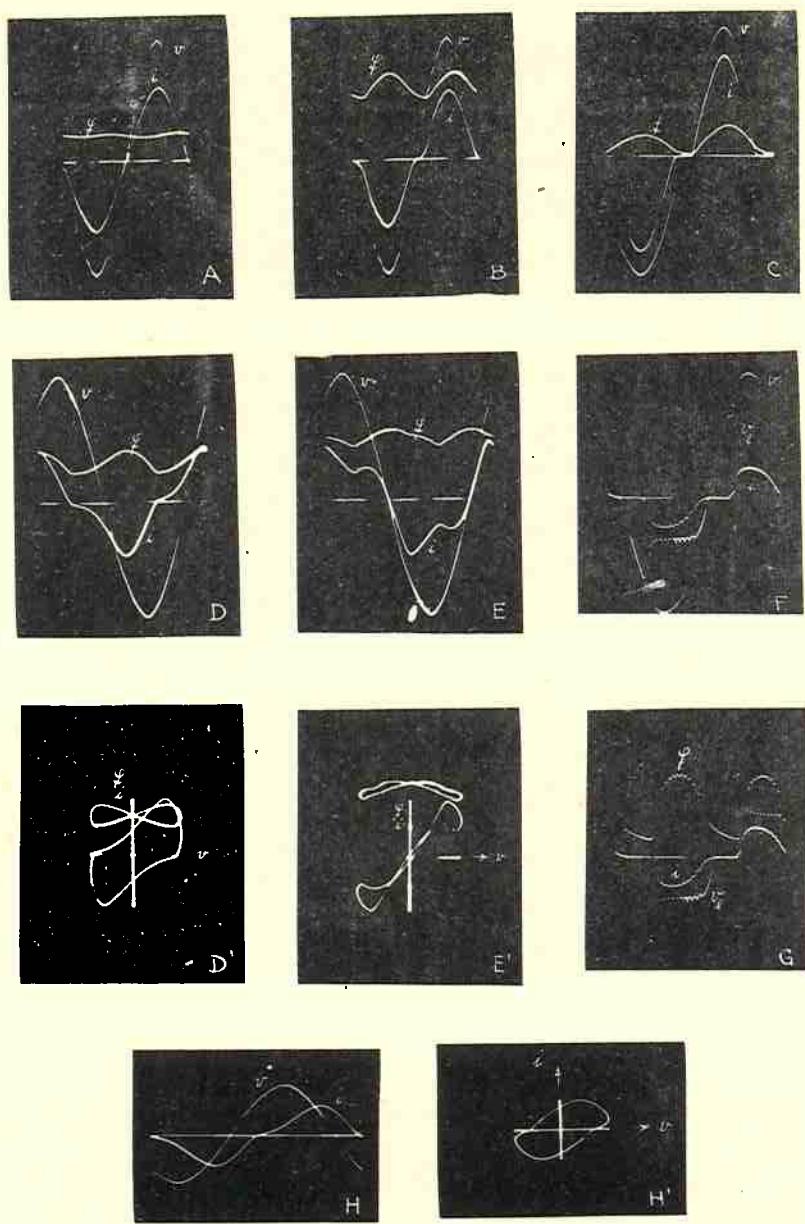
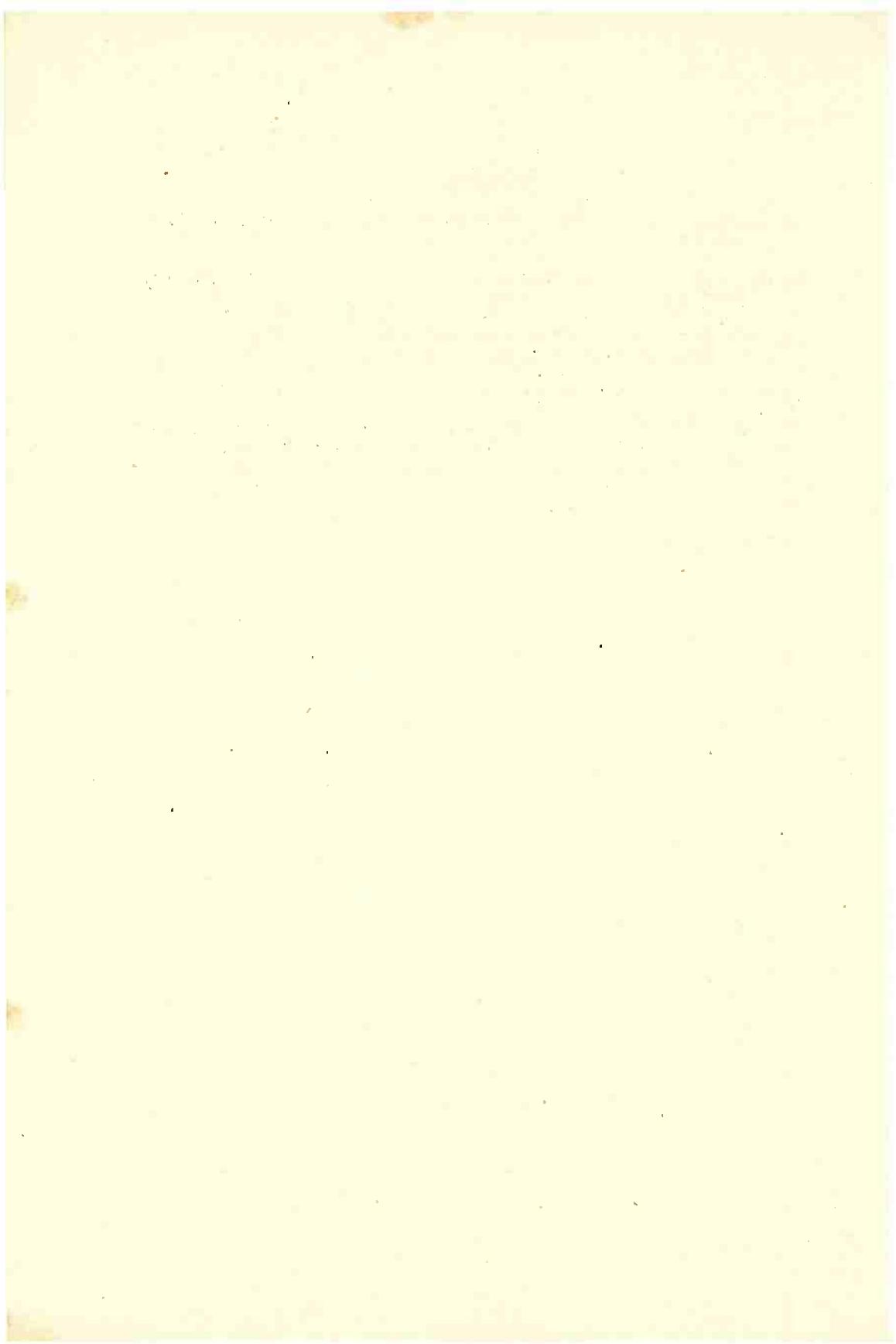


Fig. 5.3

Bibliografia

- AMICK, Charles L. - "Fluorescent Lighting Manual"
New York, Mc Graw Hill Book Company, Inc., 2a. Ed., pp.45-53, 1947
- BOAST, W.B. - "Illumination Engineering"
New York, Mc Graw Hill Book Company, Inc., 1a. Ed., pp.143-158, 1947
- BOURNE, H.K. - "Discharge Lamps for Photography and Projection"
Londres, Chapman & Hall, pp.114-120, 287.
- COTTON, H. - "Electric Discharge Lamps"
Londres, Chapman & Hall, pp.226-249, 350-351, 380-381, 1941.
- KERCHNER, Russel M & CORCORAN, George F. - "Alternating Current Circuits"
New York, John Willey & Sons, Inc. 2a. Ed., pp.163-170, 1943.



CAPÍTULO VI

SÓBRE A POSSIBILIDADE DE SE OBTER UM SISTEMA TRIFÁSICO A PARTIR DE UM CIRCUITO MONOFÁSICO

6. 1 - Transformação de sistema difásico em trifásico

Conhecida, que é, a possibilidade de se obter um sistema trifásico a partir de um sistema difásico, conforme a conexão Scott, ocorreu-nos abordar o problema de conseguir um difásico a partir de um monofásico, e em condições de ser aplicado ao caso citado.

Na conexão Scott, os dois transformadores, que serão designados por T_1 e T_2 , têm as seguintes características: sendo V'_1 e V'_2 as tensões nos primários e V_1 e V_2 as tensões nos secundários, e n a razão de transformação de um dos transformadores.

$$\text{Transformador } T_2, \quad V'_2/V_2 = n$$

$$\text{Transformador } T_1, \quad V'_1/V_1 = (\sqrt{3}/2)n$$

O transformador T_2 tem ligação no centro do secundário, de modo que a tensão entre cada terminal da bobina secundária e o seu ponto central é $V_2/2$, e este é, em geral, chamado transformador principal.

O esquema é indicado na fig. 6.1. Designando-se por V_{BO} e V_{CO} as tensões do transformador principal (T_2) em relação ao ponto central e V_{AO} a tensão do transformador T_1 que tem um dos terminais do secundário ligado ao centro do transformador T_2 , pode-se escrever:

$$V_{AB} = V_{AO} + V_{OB}$$

$$V_{BC} = V_{BO} + V_{OC}$$

$$V_{CA} = V_{CO} + V_{OA}$$

O diagrama vetorial correspondente a estas tensões é mostrado na fig. 6.2, pelo qual se verifica que, estando os transformadores alimentados em difásico, obtém-se da ligação Scott um sistema trifásico equilibrado simétrico, pois, desde que, no diagrama, o raio do círculo representa $|V|$, temos:

$$V_{AO}^* = 0 + j\sqrt{3}V/2$$

$$V_{BO}^* = V/2 + j0$$

$$V_{CO}^* = -V/2 + j0$$

Pela combinação dos vetores, resulta:

$$V_{AB}^* = V_{AO}^* - V_{BO}^* = -V/2 + j\sqrt{3}V/2 \quad \therefore V_{AB} = V$$

$$V_{BC}^* = V_{BO}^* - V_{CO}^* = V + j0 \quad \therefore V_{BC} = V$$

$$V_{CA}^* = V_{CO}^* - V_{AO}^* = -V/2 - j\sqrt{3}V/2 \quad \therefore V_{CA} = V$$

Os ângulos de defasamento entre as tensões são os seguintes:

$$\Phi_{AB} = \text{arc tg } |(\sqrt{3}:2)/(-1:2)| = 120^\circ$$

$$\Phi_{BC} = \text{arc tg } 0 = 0$$

$$\Phi_{CA} = \text{arc tg } |(-\sqrt{3}:2)/(-1:2)| = 240^\circ$$

A transformação Scott é reversível, podendo ser empregada, portanto, para transformar um sistema trifásico em difásico.

6.2 - Tensão numa impedância Z_L de um circuito RLLC à ressonância

No presente parágrafo e nos seguintes apresentamos o desenvolvimento de cálculos que nos permitiram abordar o problema da extensão da conexão Scott, no sentido de transformar um sistema monofásico em trifásico, mediante uma prévia transformação de monofásico em difásico.

Seja Z_1^* , uma impedância de tipo indutivo, expressa por:

$$Z_1^* = R + jX_L$$

para a qual podemos definir o fator de mérito:

$$Q = X_L/R = \omega L/R$$

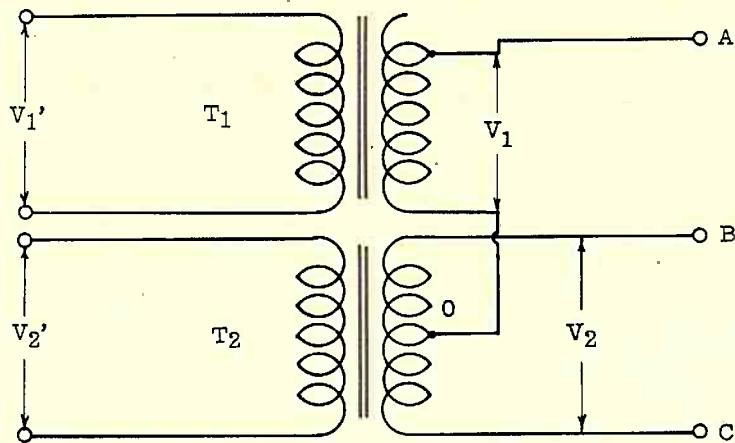


Fig. 6.1

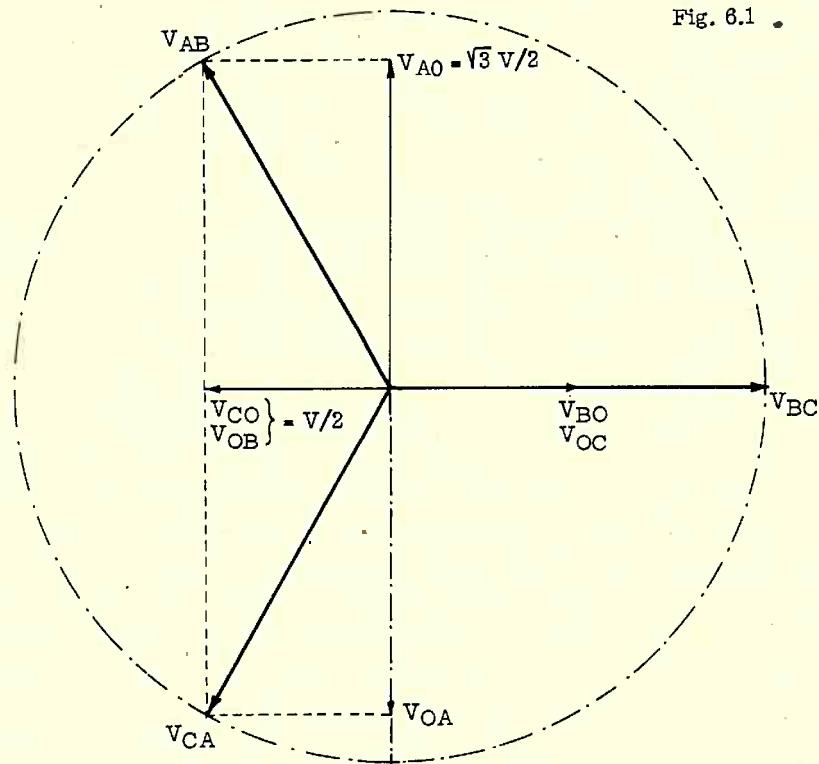
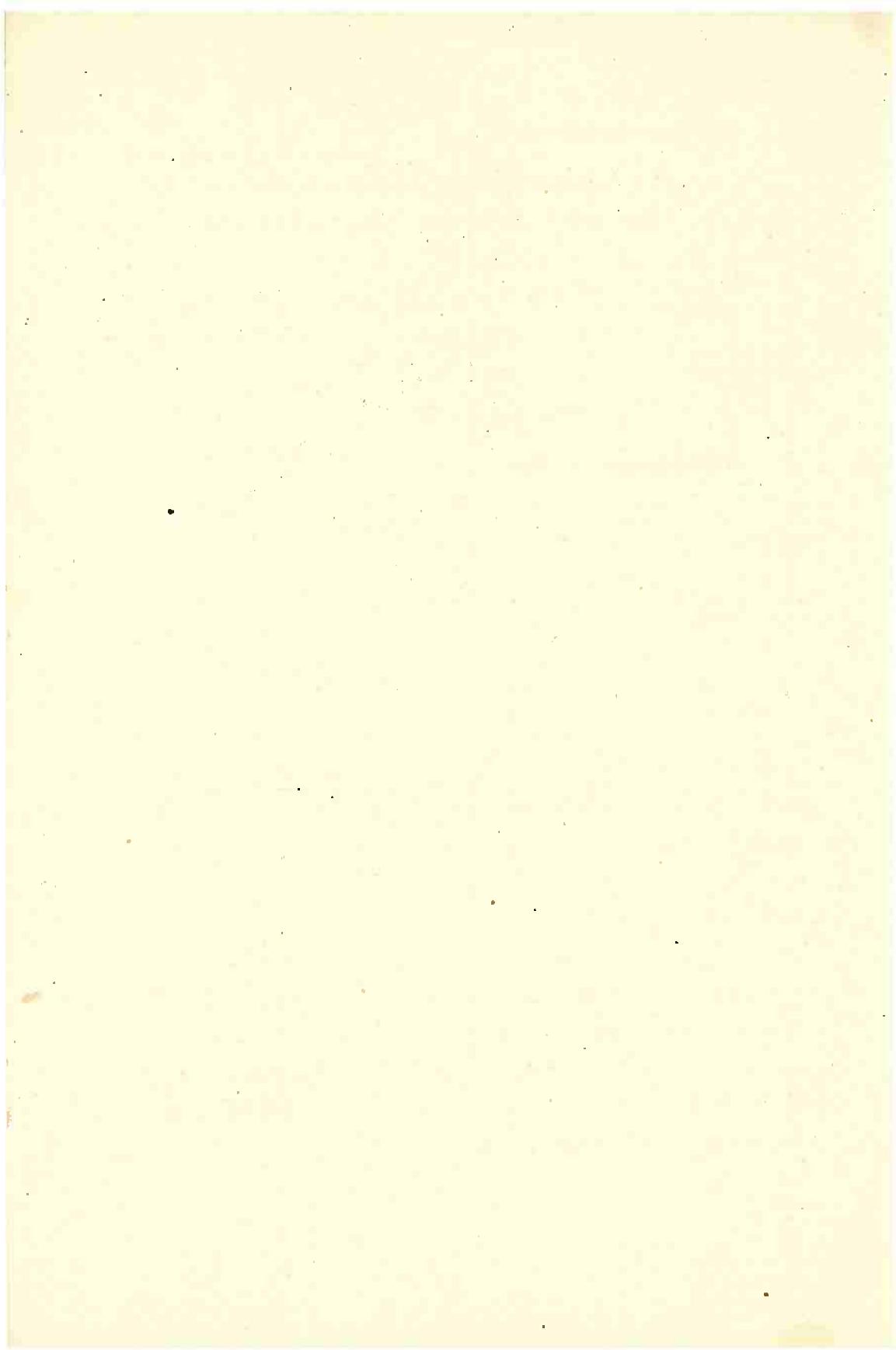


Fig. 6.2



Se a essa impedância fôr ligada em série uma capacidade C tal que $X_C = X_L$, obtendo-se assim a ressonância, teremos, para a frequência, a expressão clássica:

$$= 1/2\pi\sqrt{LC}$$

A corrente no circuito será $I = V/Z = V/R$ para essas condições e a tensão na reatância indutiva será:

$$V_L = IX_L = V \cdot X_L / R = VQ.$$

6.3 - Diagrama do círculo para ressonância série

Seja $Z_1^* = R + jX_L$ uma impedância qualquer, pela qual passa a corrente $I^* = I + j0$. A tensão aplicada será:

$$V^* = I^*Z_1^* = IR + jIX_L = V_R + jV_L$$

onde $IR = V_R$ e $IX_L = V_L$.

Donde:

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

Sendo V constante, e estando sempre em quadratura as tensões na resistência (V_R) e na reatância (V_L), podem estas ser representadas gráficamente pelo triângulo retângulo das tensões, sendo V_R e V_L os catetos, e V a hipotenusa. Considerando a infinitude dos valores possíveis da impedância Z, o lugar geométrico do vértice do ângulo formado por V_R e V_L estará na circunferência que tem por diâmetro V.

A representação gráfica das tensões pelo diagrama designado como "diagrama do círculo" é mostrado na fig. 6.3, onde ob é o diâmetro da semi-circunferência bao. Para exemplificar, tomemos as linhas, em traço-ponto que formam o ângulo reto oab. Sendo $k = 1/m$, o inverso do módulo (m) da escala, e expresso em volts/cm, e medindo-se os valores em centímetros dos segmentos do diagrama, tem-se:

$$V_R = k(\bar{oa})$$

$$V_L = k(\bar{ab})$$

$$V = k(\bar{ob})$$

$$\operatorname{tg} \Phi_1 = \bar{ab}/\bar{oa} = V_L/V_R = X_L/R = \omega L/R = Q$$

$$\cos \Phi_1 = \bar{oa}/\bar{ob} = V_R/V = R/Z$$

O diagrama, representando a tensão aplicada e as tensões parciais em R e em L pode também representar o diagrama da impedância, desde que, por uma mudança de escala, os valores das tensões sejam considerados como sendo divididos pelo valor de corrente I. Nesses termos:

$$X_L = V_L/I = k(\bar{ab})/I$$

$$L = k(\bar{ab})/2\pi\nu I$$

Para frequência $\nu = 60 \text{ seg}^{-1}$, pode-se ter a expressão:

- 1) $L = 0,00285 k(\bar{ab})/I$ henrys, sendo $k(\bar{ab})$ em volts e I em ampéres.

Desde que, para as condições de ressonância, $X_L = X_C$, tem-se:

$$X_C = V_L/I = k(\bar{ab})/I$$

$$X_C = 1/2\pi\nu C$$

onde $C = 10^8 I/2\pi\nu k(\bar{ab})$ microfarads

ou, para $\nu = 60 \text{ seg}^{-1}$,

2) $C = 2650 I/k\bar{ab}$ microfarads

Pode-se, pois, determinar com o auxílio do diagrama a capacidade necessária para obter a ressonância a 60 seg^{-1} .

Exemplo:

Seja, no diagrama $\bar{ab} = 8,7 \text{ cm}$, $k = 10 \text{ volt/cm}$ (diagr. original).

Deseja-se saber a capacidade necessária para obter ressonância a 60 seg^{-1} , quando a corrente for $I = 2$ ampéres, para a impedância representada pelo triângulo oab.

De (2) tem-se:

$$C = 2 \cdot 650 \cdot 2/87 = 61 \text{ microfarads}$$

De (1) tem-se:

$$L = 0,00265 \cdot 87/2 = 0,115 \text{ henrys}$$

Donde resulta a seguinte verificação:

$$= 10^3/2\pi\sqrt{LC} = 10^3/2\pi\sqrt{0,115 \cdot 61} \approx 60 \text{ seg}^{-1}.$$

6. 4 - Transformação de um sistema monofásico em difásico

Vejamos agora como é possível obter-se um sistema difásico, a partir de um sistema monofásico, estabelecendo as condições necessárias para que se obtenha, numa impedância dada, uma tensão igual e em quadratura com uma dada tensão qualquer.

Fazendo-se $Q = 1 = \omega L/R = \operatorname{tg} \Phi_1$, então $\Phi_1 = 45^\circ$ e a corrente está atrasada em relação à tensão V_{Z1} .

Para se obter o ângulo de 90° , é necessário neutralizar a reatância indutiva X_L por meio de uma reatância capacitiva e obter a seguir um ângulo de 45° com a corrente avançada, pelo emprêgo de mais uma reatância capacitativa igual a V_L , em série com o sistema.

Fazendo-se $X_C = 2X_L$, tem-se:

$$X = X_L - X_C = X_C - 2X_C = -X_C$$

Isto é, predomina a reatância capacitativa e, no circuito RLC em série ter-se-á, pois

$$\operatorname{tg} \Phi_2 = -X_L/R = -Q = -1 \quad \text{e}$$

$\Phi_2 = -45^\circ$, isto é, a tensão V estará atrasada 45° em relação à tensão V_R na resistência.

Multiplicando-se a impedância $Z^* = R + j(X_L - 2X_C)$ pela corrente $I^* = I + j0$, tem-se:

$$V^* = IR + j(I(X_L - 2X_C))$$

Chamando $IR = V_R$, $IX_L = V_L$ e $2IX_C = V_C$, pode-se escrever:

$$V^* = V_R + j(V_L - V_C)$$

Em módulo

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

Como $I_1 = 45^\circ$ e $I_2 = -45^\circ$, o desfasamento entre V_L e V é de 90° , como se pretendia.

A tensão no condensador, em módulo, é:

$$V_C = IX_C = 2V_L$$

$$V_L = V \operatorname{sen} 45^\circ = V \cdot \sqrt{2}/2$$

$$V_C = 2 \cdot \sqrt{2} V/2 = \sqrt{2} V.$$

$$V = V_C/\sqrt{2}$$

$$V_{Z1} = V_C \cos 45^\circ = V_C \cdot \sqrt{2}/2 = V\sqrt{2}/2 = V.$$

É possível, portanto, realizar a condição de que V_{Z1} esteja em quadratura de fase com V e seja do mesmo módulo que V .

No diagrama da fig. 6.4, esta condição está indicada pelo triângulo retângulo boe, no qual:

$$V_C = k(\overline{be})$$

$$V_R = k(\overline{oi}) \quad \widehat{boi} = \Phi_1 = 45^\circ$$

$$V_L = k(\overline{bi}) \quad \widehat{ioe} = \Phi_2 = 45^\circ$$

$$V = k(oe)$$

$$V_{Z1} = k(ob)$$

A construção é feita ligando-se o ponto b ao ponto i que está no meio da semi-circunferência bio e prolongando até encontrar, no ponto e a reta traçada pelo ponto o, perpendicular a ob.

Pelo que foi demonstrado:

$$\overline{bo} = \overline{oe}$$

$$V_{Z1} = V$$

$$V_{Z1} \perp V$$

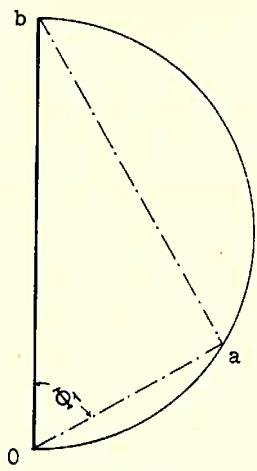


Fig. 6.3

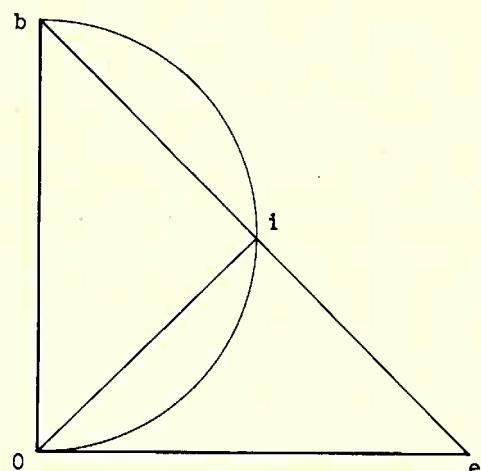


Fig. 6.4

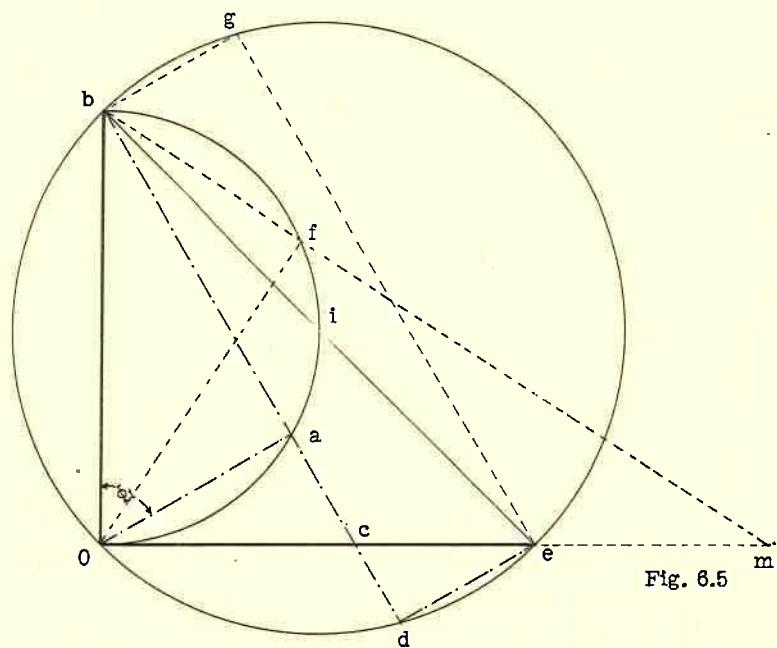


Fig. 6.5

Pode-se escrever ainda:

$$V^* = V_{Z_1}^* + V_C^*$$

Ou, chamando V_C^* de V_Z^* , para uma composição qualquer de resistência e capacidade, tal que $V_Z^* = I(R_C + jX_C)$ tem-se:

$$V_Z = I\sqrt{R_C^2 + X_C^2}$$

Nessas condições V_Z corresponderá à hipotenusa de um triângulo retângulo cujos catetos são IR_C e IX_C respectivamente. Como no caso da impedância Z_1 , as tensões V_{R_C} e V_C estão em quadratura e o vértice do ângulo formado pelos segmentos representativos de V_{R_C} e V_C tem como lugar geométrico uma circunferência.

Desde que $V_Z = \sqrt{2}V_{Z_1} = \sqrt{2}V = \text{const}$ o lugar geométrico do vértice do ângulo reto formado por IR_C e IX_C estará na semi-circunferência que tem o diâmetro representado por V_Z . No diagrama da fig. 6.5 traça-se a circunferência bgeo, com centro em i.

Para o valor $Q = 1$, $R_C = 0$ e $V_C = V_Z$. No diagrama V_Z é representado por $V_Z = k(\overline{be})$, e a capacidade correspondente pode ser determinada pela expressão

$$C = 2650 I/k(\overline{be}) \text{ microfarads}$$

Para valores de Q superiores à unidade, o ângulo de defasamento na indutância será maior que 45° . Um caso destes é indicado pela linha em traço-ponto, já citada no exemplo anterior e repetida na fig. 6.5.

Seja o triângulo das tensões na impedância Z_1 representado por:

$$V_R = k(\overline{oa})$$

$$V_L = k(\overline{ab})$$

$$\Phi_1 = \arctg(\overline{ab}/\overline{oa})$$

Desde que o circuito $R_L L C R_C$ é série, trace-se a linha bg paralela a oa até encontrar a circunferência de diâmetro be no ponto g; ligue-se o

ponto g ao ponto e. Então

$$V_{R_C} = k(\overline{bg})$$

$$V_C = k(\overline{ge})$$

Pode-se então determinar R_C e X_C necessários para realizar as condições de ter V_{Z_1} igual e em quadratura com V .

$$V_{R_C} = IR_C$$

$$R_C = V_{R_C}/I = k(\overline{bg})/I \text{ ohms}$$

$$\text{e } C = 2\ 650 I/k(\overline{ge}) \text{ microfarads}$$

O mesmo resultado pode ser obtido de modo mais conveniente pela construção seguinte: Prolonga-se ba até encontrar o círculo de diâmetro be no ponto d. Liga-se o ponto d ao ponto e. Evidentemente bged é um retângulo, portanto $bg = de$ e $bd = ge$, donde pode-se escrever:

$$4) R_C = k(\overline{de})/I \text{ ohms}$$

$$5) C = 2\ 650 I/k(\overline{bd}) \text{ microfarads}$$

Ve-se, portanto, que se pode obter uma queda de tensão na impedância Z_1 igual à tensão aplicada, e em quadratura com a mesma desde que, para ondas senoidais, para as quais são válidas as relações demonstradas, se ligue em série com o sistema uma capacidade C e uma resistência R_C , determinados pela expressão (4) e (5), respectivamente, sendo que a expressão (5) só é válida para 60 ciclos/seg.

Na resistência R_C haverá uma perda de potência $P = I^2 R_C$, que pode ser eliminada se a tensão aplicada ao sistema $R_L LC$ tiver um valor conveniente, em consequência de uma redução na tensão aplicada V , mediante o emprego de um transformador redutor de tensão ou de um autotransformador.

A tensão necessária, quando se elimina a resistência R_C , é dada pelo valor $V'_C = k(\overline{oc})$, onde o ponto c é a intersecção da reta bd com a reta oe.

Reduzindo-se a tensão do valor V para o valor V'_C , a queda de

tensão na capacidade fica reduzida para $k(\bar{bc})$, donde:

$$C' = 10^6 I/2\pi V k(\bar{bc}) \text{ microfarads, ou para } V = 60 \text{ seg}^{-1}$$

$$C' = 2650 I/k(\bar{bc}) \text{ microfarads.}$$

Portanto, obtem-se um sistema difásico a partir de um monofásico, combinando em paralelo, uma impedância indutiva com uma impedância indutivo capacitiva, desde que os valores numéricos dos elementos em jôgo satisfazam às condições ditadas pelo diagrama do círculo, como propuzemos acima.

Para o problema da transformação de um sistema monofásico em um sistema trifásico, resta-nos ainda indicar como as impedâncias acima definidas podem ser efetivamente representadas pelas impedâncias equivalentes na linha difásica, do sistema de transformadores da conexão Scott.

Antes, porém, de apresentar essa prova, julgamos oportuno discutir a questão dos fatores de potência do sistema que propuzemos, pois que este é um aspecto inteiramente geral daquela ligação de impedâncias, e portanto, reflete, como veremos, no seu aproveitamento numa conexão do tipo Scott.

6.5 - Fator de potência de um sistema paralelo, formado por uma impedância indutiva e uma impedância indutivo-capacitativa.

Em 6.5 foi considerado o caso de uma linha alimentar uma impedância Z_1 de modo que $V_{Z_1} = V$, estando V_Z avançada 90° em relação a V .

Imagine-se então que V represente a tensão aplicada a uma impedância $Z_2^* = Z_1^*$, de resistência R_L' e reatância X_L' .

Como foi mostrado em 6.3, o lugar geométrico do vértice do ângulo formado pelos catetos que representam as tensões na resistência R_L' e na reatância X_L' , é uma circunferência.

Trace-se, portanto, a semi-circunferência eis na fig. 6.6 tendo

como diâmetro \overline{oe} : Seguindo-se ainda o exemplo representado pela linha e m traço-ponto, traça-se \overline{of} fazendo um ângulo $\Phi_2 - \Phi_1$ em relação a \overline{oe} . Liga-se o ponto \bar{f} , ponto de intersecção com a circunferência, ao ponto e . Tem-se então:

$$V_L' = V_L = k(\bar{fe})$$

$$V_R' = V_R = k(\bar{of})$$

Do diagrama, verifica-se que

$$\widehat{aoc} = 90^\circ - \Phi_1$$

$$\widehat{cof} = \Phi_2 - \Phi_1 \text{ (por construção)}$$

$$\widehat{oad} = 90^\circ$$

$$\overline{oa} = \overline{of} \text{ (tensão nas resistências iguais)}$$

$$\widehat{afe} = 90^\circ$$

\overline{oadf} é um quadrado, no qual \overline{od} é a diagonal, que faz o ângulo

$\widehat{aod} = 45^\circ$ com o lado \overline{oa} , donde:

$$\widehat{cod} = \widehat{aod} - \widehat{aoc} = 45 - 90 + \Phi_1 = \Phi_1 - 45^\circ$$

Chamando $\widehat{cod} = \Phi$, tem-se:

$$\Phi = \Phi_1 - 45^\circ$$

onde Φ é o ângulo de desfasamento entre a tensão aplicada V e a corrente resultante I como se pode provar do seguinte modo:

Escolhendo-se um módulo conveniente para representar a corrente no diagrama, podemos dizer que $I_1 = k'\overline{oa}$ e como $I_2^* = I_1^*$ pois $V_{Z_1}^* = V_{Z_2}^*$ e $Z_2^* = Z_1^*$, tem-se $I_2 = k'(\overline{of})$. A resultante será $I^* = I_1^* + I_2^*$ e, em módulo $I = k'(\overline{od})$.

Conclui-se também que, para $\Phi_1 = \Phi_2 = 45^\circ$

$$\Phi = 45 - 45 = 0$$

isto é, a tensão da linha e a corrente estarão em fase, o que corresponde à ressonância do sistema formado pela impedância $Z_2^* = R_L + jX_L$ em paralelo com o sistema $Z_1^* = R_L - j(X_L - X_C)$ onde $X_C = 2X_L$.

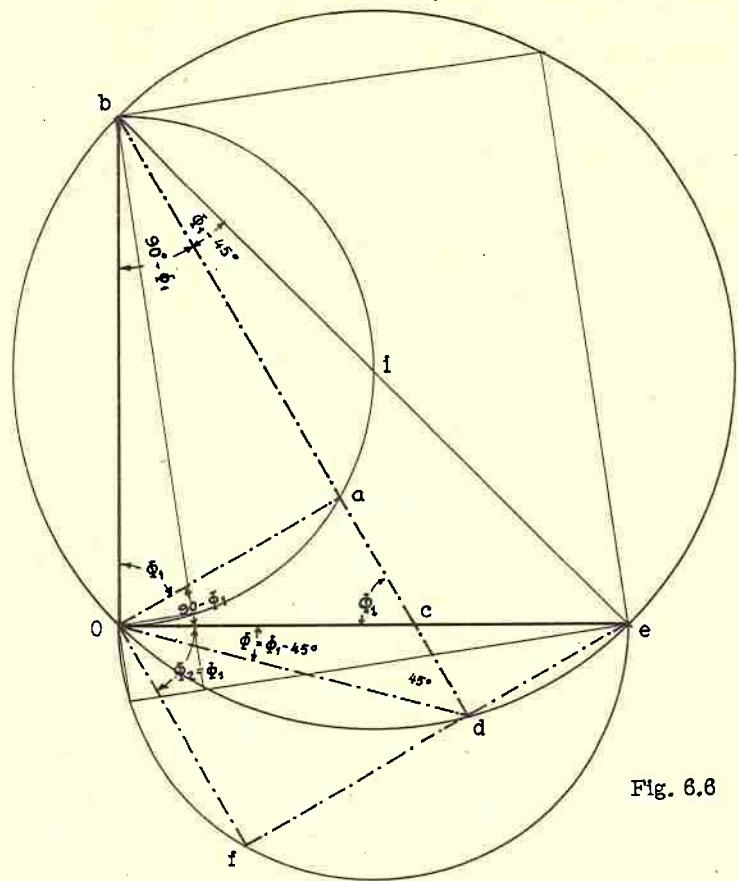
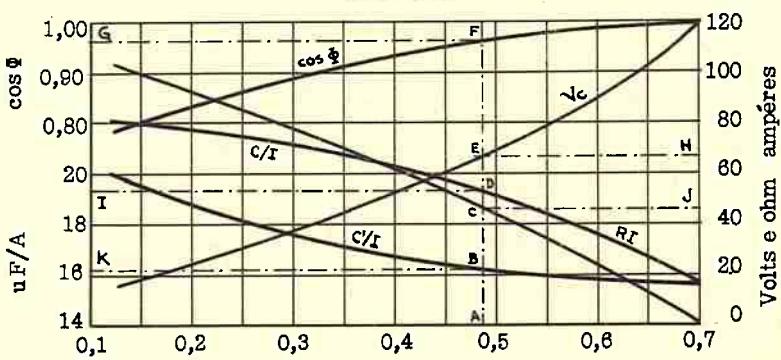
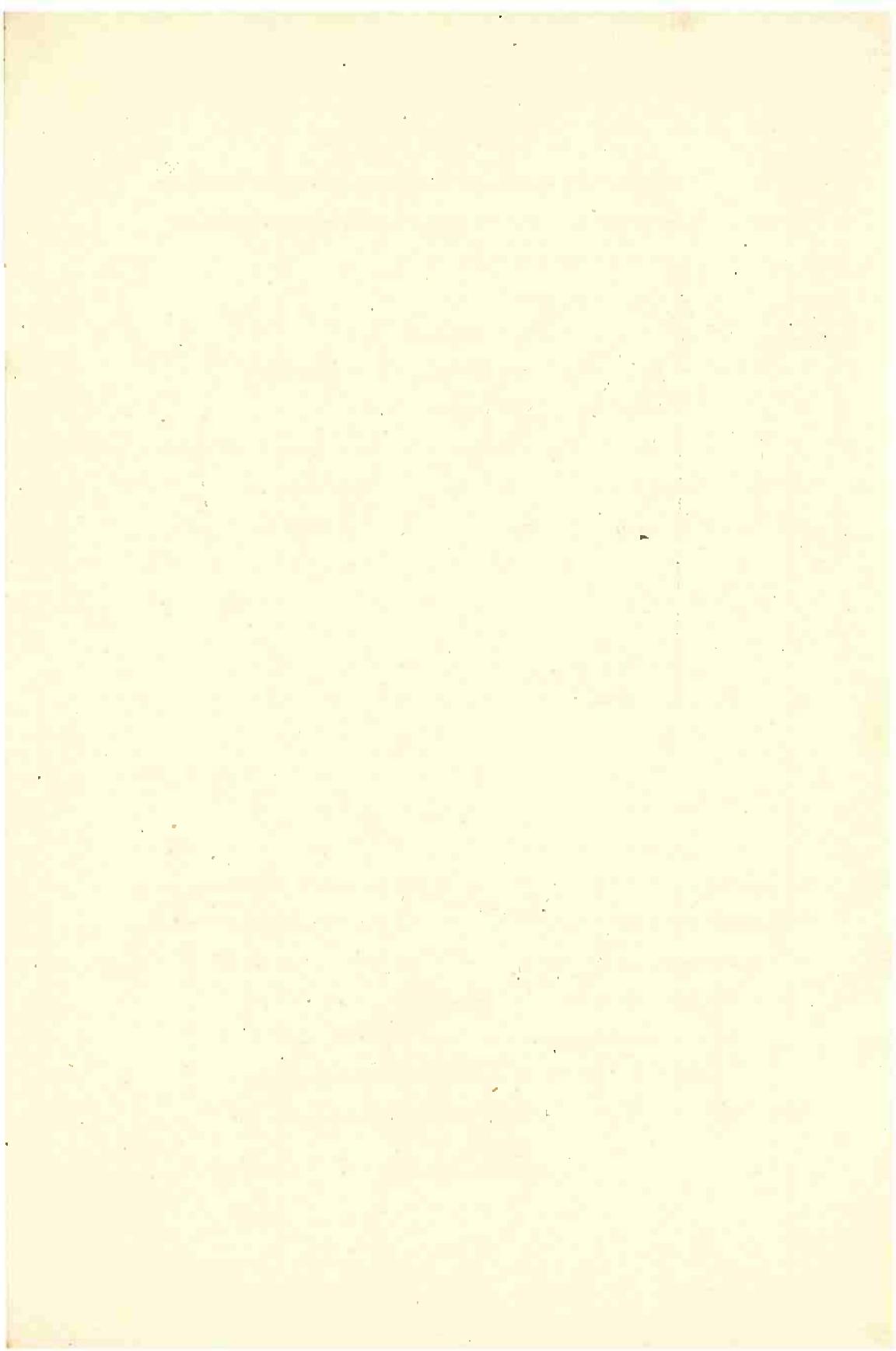


Fig. 6.6



Fator de potência da carga

Fig. 6.7



Os principais valores que interessam ao problema podem ser obtidos do diagrama da fig. 6.7 com as seguintes relações trigonométricas:

$$\cos \Phi = \cos(\Phi_1 - 45^\circ)$$

$$V_C = (1/\tan \Phi) V$$

$$C = (10^6 I / 2\pi f V) \sin \Phi_1 \text{ microfarads}$$

$$C' = 10^6 I / |2\pi f V \cos(\Phi_1 - 45^\circ)| \text{ microfarads}$$

$$R' = \sqrt{2} V \sin(\Phi_1 - 45^\circ)$$

Para se obterem valores aproximados no exame deste circuito, foi feito o gráfico da fig. 6.7, do qual podem ser determinados $\cos \Phi$, V_C , C , C' e R' , dentro da variação de Φ_1 que permite obter $\cos \Phi$ desde 0,8 até 1,00.

O diagrama da fig. 6.8 também mostra as condições para os ângulos $\Phi_1 = 45^\circ$ e $\Phi_1 = 81^\circ 48'$, este último dando um fator de potência na linha de $\cos \Phi = 0,8$.

6. 6 - Aplicação do diagrama do círculo aos casos de fator de mérito menor do que a unidade

Se o ângulo de defasamento das indutâncias ($\Phi_1' = \Phi_2'$), for inferior a 45° por ser $Q < 1$, como é mostrado pela linha interrompida (fig. 6.5), tem-se $k(\overline{of})$ representando a tensão na resistência, $k(\overline{fb})$ a tensão na indutância, e o segmento \overline{bf} prolongado passa além do segmento \overline{oe} , encontrando em \overline{m} o prolongamento deste último. Portanto, com a tensão representada por $k(\overline{oe})$, não é possível obter-se a tensão \overline{ob} em quadratura e de valor idêntico a V . A tensão a se aplicar ao sistema $R_L C$ é, $k(\overline{om})$, maior que $k(\overline{oe})$.

A capacidade necessária será, a 60 seg^{-1} :

$$C'' = 2650 I / k(\overline{bm}) \text{ microfarads}$$

onde

$$k(\overline{bm}) > k(\overline{be})$$

$$k(\overline{bm}) > \sqrt{2} V$$

O sistema exigiria um transformador elevador de tensão com a relação de transformação

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\overline{oe}}{\overline{om}}$$

o que seria inconveniente, por sujeitar o condensador a uma tensão ainda mais elevada do que a tensão da linha, multiplicada pela $\sqrt{2}$.

Nas aplicações práticas, devem ser considerados, apenas os casos em que o fator de potência para a indutância fica compreendido entre os valores 0,707 ($\Phi_1 - \Phi_2 = 45^\circ$) e 0,143 ($\Phi_1' - \Phi_2' = 81^\circ 48'$), casos êsses que correspondem respectivamente aos valores 1,000 e 0,800 para o resultante fator de potência do sistema.

Os diagramas da fig. 6.6 e os gráficos da fig. 6.7 ilustram esta correspondência de valores, estabelecidos de acordo com as construções já descritas.

6.7 - Aplicação do sistema de impedâncias proposto à conexão Scott

Vejamos agora, como os elementos da carga aplicada a um sistema trifásico influem nas condições de operação de uma linha difásica, da qual aquele sistema trifásico tenha sido obtido por meio da conexão Scott.

Se o sistema trifásico for equilibrado, ter-se-á para a potência de cada transformador da conexão Scott, supondo-se o mesmo fator de potência para cada um deles:

$$I_1 = I_2 = \frac{P_1}{V_1 \cos \Phi_1} = (3V_\ell I_\ell / 2V_1)(\cos \Phi / \cos \Phi_1)$$

O fator de potência da carga no secundário de um transformador reflete no primário um fator de potência diferente, devido aos efeitos da reatância e resistência do secundário, corrente de magnetização, reatância e resistência do primário, reatância de dispersão.

Nessas condições, o estudo correto do nosso problema só pode-

ria ser feito levando-se em conta todos êsses elementos.

Para o fim que temos em vista, limitar-nos-emos a uma primeira aproximação, admitindo que o fator de potência no primário seja o mesmo que no secundário ($\cos\Phi_1 = \cos\Phi$).

Resulta, então

$$I_1 = I_2 = 3V_\ell I_\ell / 2V_1'$$

A impedância equivalente do primário será:

$$Z_1 = V_1' / I_1 = 2(V_1')^2 / 3V_\ell I_\ell$$

e pode ser expressa como a impedância equivalente

$$Z_{e1}^* = Z_1 \cos\Phi + jZ_1 \sin\Phi$$

Considerando esta impedância equivalente de cada transformador como cada uma daquelas impedâncias (Z_1 e Z_2) que foram consideradas no diagrama do círculo, relativo à transformação monofásico-difásico, pode-se obter, para determinadas condições do fator de potência da carga, entre os limites já indicados, todos os elementos necessários para caracterizar a transformação completa, de monofásico para difásico, como propomos nesta tese, seguida da transformação de difásico para trifásico, empregando a conexão Scott.

Fica, portanto, provada a viabilidade do método quando as condições da carga são previamente estabelecidas, como dados do problema, o que é possível na prática, pelo conhecimento do tipo de carga que se tem em vista utilizar.

Nos parágrafos anteriores, está indicada a marcha de cálculo que deve ser seguida em cada caso particular, e que agora vamos aplicar às lâmpadas fluorescentes, combinadas três a três numa linha trifásica, tendo em vista melhorar o fator de potência resultante para a linha ao mesmo tempo que conseguir, como já foi demonstrado, uma atenuação do seu efeito estroboscópico.

Podemos ressaltar as vantagens da transformação monofásico a trifásico por nós proposta, pelas razões seguintes:

- 1 - As linhas de distribuição normais para fins de iluminação são monofásicas e, portanto, é conveniente obter delas um sistema trifásico.
- 2 - Nessas condições, é possível manter as instalações comuns empregadas para iluminação, o que não se daria se fosse utilizada uma instalação trifásica, que exigiria equipamento especial para sua utilização.
- 3 - Uma linha trifásica, na qual fossem empregadas lâmpadas fluorescentes, o fator de potência seria baixo e teria que ser corrigido por meio de condensadores em paralelo com a linha. No sistema trifásico obtido a partir do monofásico, o fator de potência é alto, devendo às características próprias do sistema empregado.

Bibliografia

GILLON, Edgar - "Theorie des courants alternatifs"
Dunod, Paris, pg.119-147, 1937.

HEHRE, Frederick W. e HARNESS, George T. - "Alternating Currents"
John Wiley & Sons, New York, 5a. Ed., pg.287-288, 1945.

JANET, P. - "Leçons d'Electrotechnique Générale"
7a. Ed., Tomo III, pg.326-334, 1938.

KRACHENBUCHL, John O. e FAUCET, Max A. - "Circuits and Machines in Electrical Engineering"
John Wiley & Sons, New York, pg.149-175, 1939.

M.I.T. - "Magnetic Circuits and Transformers"
John Wiley & Sons, New York, pg.325-368, 667-669, 1944.

CAPÍTULO VII

LÂMPADAS FLUORESCENTES LIGADAS EM SISTEMA TRIFÁSICO OBTIDO A PARTIR DUMA LINHA MONOFÁSICA

7. 1 - A transformação monofásico-trifásico aplicada às lâmpadas fluorescentes

Em capítulos anteriores foi visto que o funcionamento das lâmpadas fluorescentes é em geral obtido por meio de reatores ligados em série.

Como consequência disso, cada lâmpada faz parte de um sistema que tem baixo fator de potência. Geralmente esse fator de potência tem valores em torno de 0,5, o que seria equivalente a um ângulo da ordem de 60° como defasamento entre a tensão e a corrente, se estas fossem senoidais.

Para tais condições, em primeira aproximação, podemos escrever que as tensões em cada trecho do circuito, incluindo uma lâmpada, são:

$$V_R' = V \cos \Phi = V(1/2)$$

$$V_L' = V \sin \Phi = V(\sqrt{3}/2)$$

A componente ativa da tensão, aplicada à lâmpada mais a resistência do reator, tem módulo igual à metade da tensão total e a componente reativa, aplicada à reatância, tem módulo $\sqrt{3}/2$ da tensão total.

Pode-se, portanto, imaginar que o sistema lâmpada-reator é equivalente a uma impedância

$$Z_1^* = R + jX_L \quad \text{com} \quad X_L/R = \tan \Phi = \sqrt{3}$$

Suponha-se que as lâmpadas estejam ligadas a um sistema trifásico, em Δ , de modo a se ter uma carga equilibrada entre as três linhas. Nes-

se caso teremos para a potência do sistema:

$$P = 3V_t I_t \cos \Phi_t = 3V_t I_t / 2$$

onde V_t é a tensão entre as linhas de alimentação.

I_t a corrente em cada lâmpada

Φ_t o ângulo de desfasamento suposto igual a 60°.

Supondo-se que a linha trifásica das lâmpadas tenha sido obtida por meio de uma conexão Scott, ter-se-á, para a potência de cada transformador dessa conexão, na hipótese de que cada um dos transformadores tenha o mesmo fator de potência, igual aquele da carga e com as restrições que foram feitas (6.7):

$$P_1 = P_2 = P/2 = 3V_t I_t \cos \Phi_t / 2$$

A corrente no primário de cada transformador (linha difásico) será dada por:

$$I_1 = I_2 = 3V_t I_t \cos \Phi_t / 2V_1' \cos \Phi_1 = 3W / 2V_1' \cos \Phi_1$$

em que $W = V_t I_t \cos \Phi_t$ é a potência efetiva da lâmpada-reactor ou lâmpadas-reactores intercalados em cada fase do sistema trifásico.

A impedância equivalente no primário será, na hipótese de
 $\cos \Phi_1 = \cos \Phi_2 = 0,5$,

$$Z_{eq} = 1/2 Z_1 + j\sqrt{3} Z_1 / 2$$

onde $Z_1 = V_1' / I_1 = 2(V_1')^2 \cos \Phi_1 / 3W$.

Na realidade, para a aplicação prática do diagrama do círculo considerado no capítulo anterior, não há necessidade de se conhecer previamente o valor dessa impedância Z_1 , bastando o conhecimento prévio do fator de potência ($\cos \Phi_t$), o qual foi considerado, neste caso, 0,5.

É esse diagrama que permite determinar os valores dos elementos com que o circuito difásico deverá ser construído, em termos da corrente I_1 do primário. Esta corrente é determinada pela fórmula transcrita acima ,

Biblioteca da Escola Politécnica
SÃO PAULO 31297

em função dos seguintes elementos: potência (W) de cada conjunto lâmpada - reator por fase; fator de potência admitido φ e tensão V_1' da linha monofásica de alimentação.

7. 2 - Exemplo de aplicação

Procuramos realizar um caso concreto, para um conjunto de 3 lâmpadas fluorescentes, de potência nominal de 30 watts cada uma, instaladas em série com reatores de fabricação normal, para serem utilizados sob uma tensão de linha de 230 volts. Cada reator, na realidade, foi constituído de dois elementos indutivos em série, cada um deles com 0,7 henry (0,3 A), correspondendo ao reator de uma lâmpada de 15 watts. Nessas condições, cada unidade (lâmpada mais reator), passou a funcionar com as seguintes características, por nós diretamente verificadas:

$$V_t = \text{tensão aplicada} \ 235 \text{ volts}$$

$$I_t = \text{corrente através da lâmpada} = 0,21 \text{ ampéres}$$

$$P_t = \text{potência por unidade} = 24 \text{ watts} \ (\text{medida com wattômetro})$$

Desses valores resulta:

$$\cos \Phi_t = P_t / V_t I_t = 24 / (235 \cdot 0,21) = 0,486$$

É esse o valor do fator de potência que foi considerado nos cálculos que se seguem.

Para comodidade nas aplicações, foi construído o gráfico da fig. 6.7, com base nos elementos computados pelo diagrama do círculo, no caso particular dos dados seguintes, que são normais para S.Paulo: tensão da linha monofásica = 120 volts; frequência = 60 ciclos/seg.

O gráfico se extende, em abscissa, entre os valores 0,1 e 0,7 para o fator de potência, cobrindo desse modo a faixa que interessa ao problema das lâmpadas fluorescentes.

Para o cálculo das capacidades e, eventualmente, das resistências do sistema difásico, devemos determinar agora o valor da corrente I_1 no primário, pela expressão já anteriormente indicada.

$$I_1 = 3W/2V_1' \cos\Phi_l = 3 \cdot 24/2 \cdot 120 \cdot 0,486 = 0,617 \text{ ampéres}.$$

Conforme as linhas do gráfico, mostrados em traço-ponto, tem-se:

$$\cos\Phi = \text{fator de potência resultante} = 0,966 \quad G$$

$$V' = \text{tensão no sistema RLC} = 67,0 \text{ volts} \quad H$$

$$C/I = \text{capacidade/corrente} = 19,4 \text{ microfarads/ampére} \quad I$$

$$C = \text{capacidade necessária} = 19,4 \cdot 0,617 = 12 \text{ microfarads}$$

$$R' I = \text{resistência corrente} = 46 \text{ ohms . ampéres} \quad J$$

$$R' = \text{resistência em série} = 46/0,617 = 74,5 \text{ ohms}$$

$$C'/I = \text{capacidade/corrente} = 18,2 \text{ microfarads/ampére} \quad K$$

$$C' = \text{capacidade} = 18,2 \cdot 0,617 = 10,0 \text{ microfarads.}$$

O nosso dispositivo experimental foi constituído de acordo com o esquema da fig. 7.2, com elementos de valores iguais aos da tabela acima.

A conexão Scott foi realizada efetivamente por meio de dois transformadores (T_1 e T_2) mostrados no esquema da fig. 7.2 e na fotografia de 7.1.

Tais transformadores foram construídos especialmente para os nossos ensaios e têm as características principais seguintes:

$$V_1'I_1' = 100 \text{ volt ampéres, cada um}$$

$$V_1'=V_2' = 120 \text{ volts (primário)}$$

$$V_2 = 230 \text{ volts (115 - 0 - 115) secundário.}$$

$$V_1 = 200 \text{ volts (secundário).}$$

Esses dois transformadores foram construídos do tipo couraçado, de acordo com as normas técnicas habituais, tendo sido previstos, aliás, pa-



Fig. 7.1

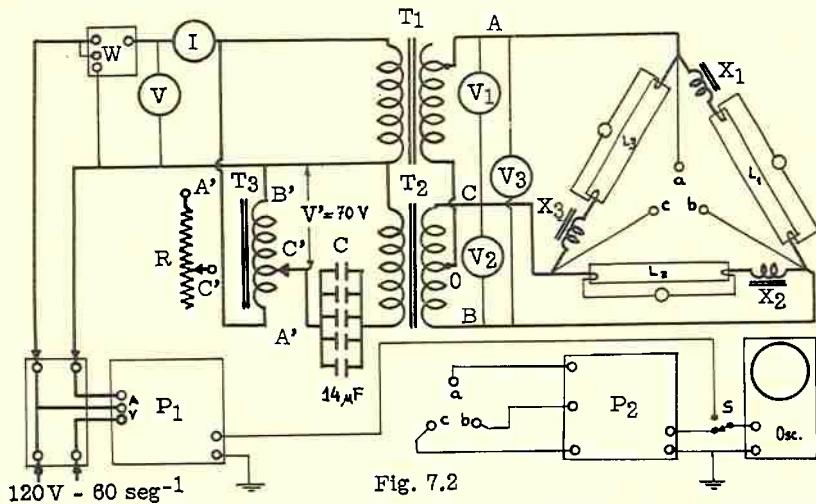


Fig. 7.2

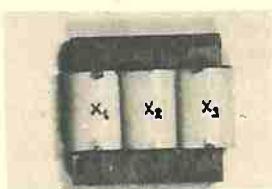


Fig. 7.3 A

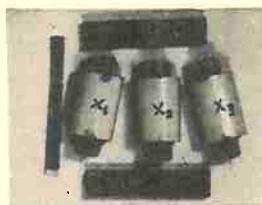


Fig. 7.3 B

ra os primários, algumas tomadas para o ajuste das tensões de entrada.

A tensão V' foi obtida por meio de um auto transformador, T_3 na fig. 7.2, que, nas nossas experiências, era constituído por um "VARIAC" de 115 V - 2A, permitindo variar facilmente a tensão entre 0 e 130 volts.

A resistência $A'B'$, assinalada no esquema, corresponde ao elemento R' dos nossos cálculos, podendo substituir o auto transformador, na forma indicada no esquema, de modo a realizar as condições previstas ($V' = 67$ volts).

As lâmpadas foram indicadas no diagrama 7.2, com os respectivos dispositivos de partida ("starter").

Com o fim de verificar as condições de operação de todo o sistema, foram instalados, em pontos convenientes, os seguintes instrumentos: amperômetro (I), voltômetro (V), wattômetro (W), voltômetros no trifásico ($V_1 - V_2 - V_3$) e dois polianalizadores ($P_1 - P_2$) que podiam ser alternativamente ligados ao oscilógrafo por meio da chave (S).

Um dos polianalizadores foi ligado aos pontos abc do circuito, com o fim de verificar as condições de equilíbrio nas três linhas do circuito trifásico, na sua parte de utilização, a saber, nos terminais das lâmpadas fluorescentes.

O outro polianalizador foi utilizado em sucessivas ligações para verificar as condições do sistema em vários dos seus pontos, permitindo registrar os oscilogramas seguintes:

- 1 - a tensão e a corrente na linha monofásica, ao mesmo tempo que do fluxo luminoso das lâmpadas;
- 2 - as tensões em quadratura da linha difásica, a saber, as tensões nos dois primários dos transformadores da conexão Scott;
- 3 - a tensão e a corrente em cada uma das lâmpadas fluorescentes;

4 - a tensão e a corrente no primário de cada transformador (T_1 e T_2).

O sistema de ligação dos polianalizadores com os vários elementos do circuito foi estabelecido, em cada grupo de observações, de acordo com as normas por nós indicadas em publicações anteriores.

7.3 - Discussão dos resultados

Sob o aspecto do comportamento elétrico do circuito por nós proposto para transformar um sistema monofásico em trifásico, o resultado foi muito bom, conforme se pode constatar pelo exame da fig. 7.4, que mostra, ao lado dos diagramas vetoriais de todo o sistema, os oscilogramas das tensões e correntes em vários pontos do circuito, obtidos, como já dissemos, por meio do polianalizador e oscilógrafo catódico.

Desses oscilogramas verifica-se que:

- 1 - As tensões no sistema trifásico (fig. 7.4 E) são tecnicamente aceitáveis, tendo o defasamento de 120° e o desvio máximo de amplitude é de 3,2% em relação à média.
- 2 - As tensões no sistema difásico estão em quadratura como se ve na fig. 7.4 B. Nota-se a simultaneidade muito precisa entre os valores extremos de uma das tensões e os valores nulos da outra, embora uma das curvas apresente deformação com respeito à forma senoidal, que à outra assume de modo bastante satisfatório.
- 3 - Nesse mesmo oscilograma observa-se, conforme as previsões do cálculo, que as tensões nos dois circuitos da linha difásica são sensivelmente iguais, ficando pois satisfeitas as duas condições exigidas para o funcionamento da conexão Scott (tensões iguais e em quadratura).
- 4 - Na fig. 7.4, os oscilogramas C e D mostram os elementos necessá-

Foi adotada a relação de transformação 1,0 para o diagrama.

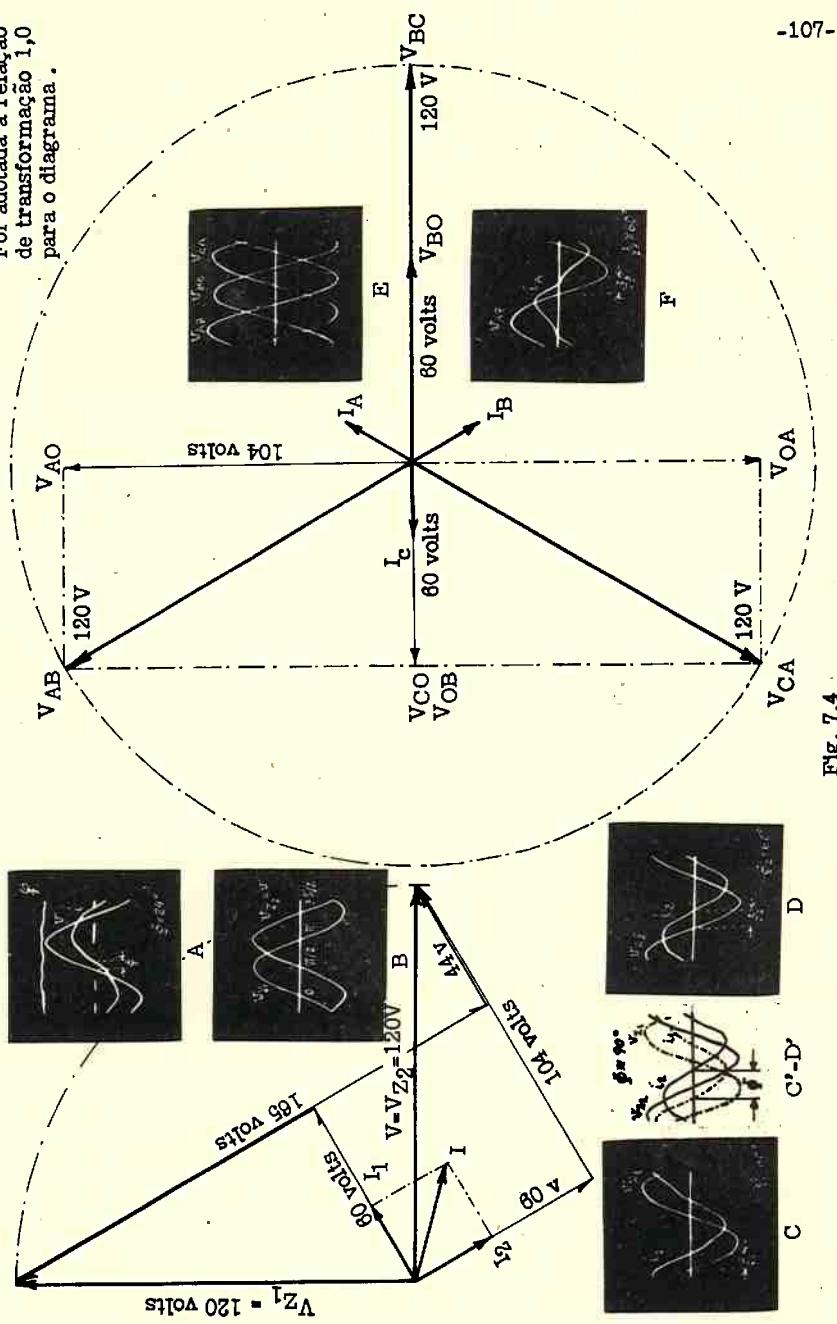
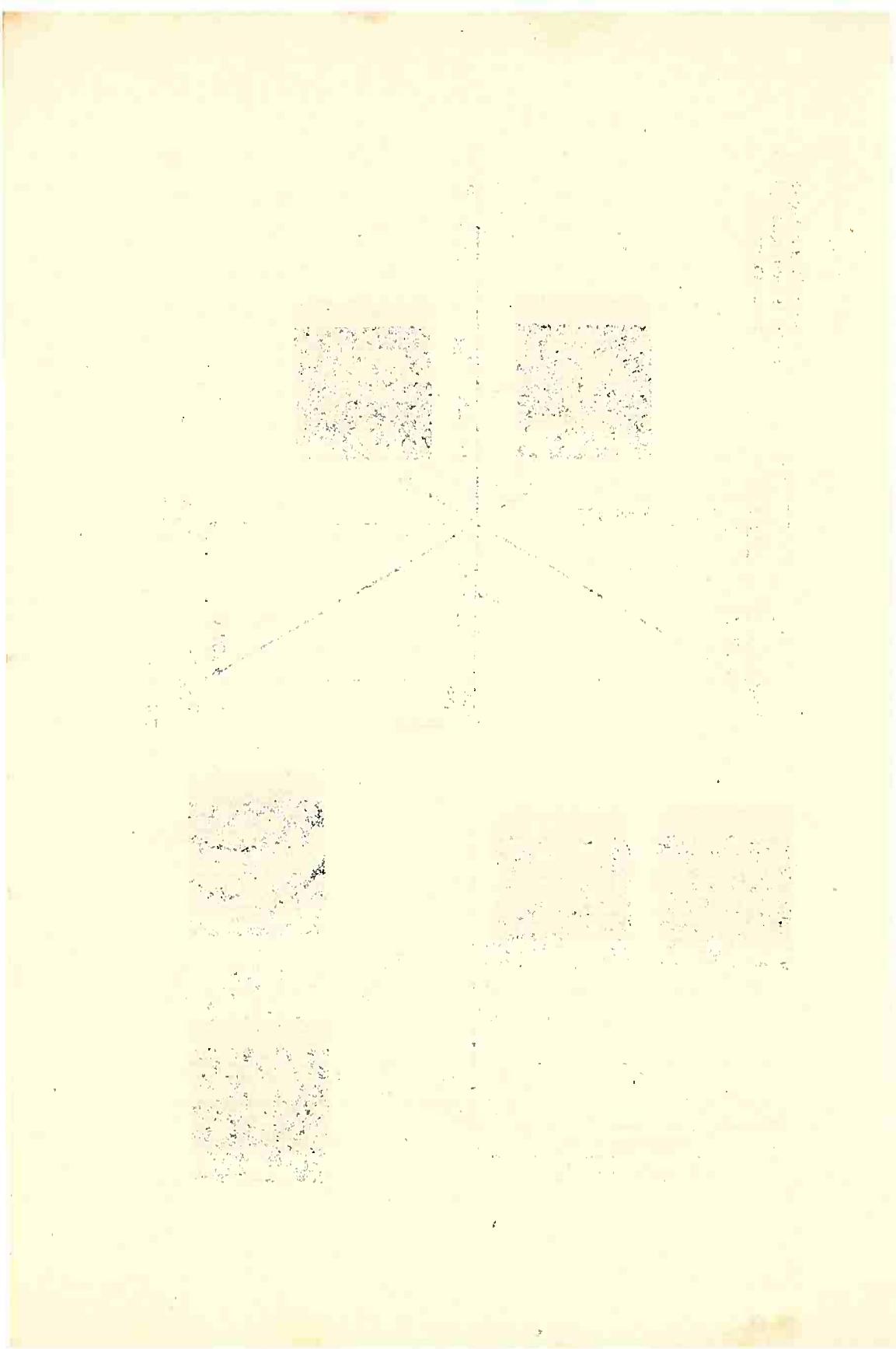


Fig. 7.4



rios à apreciação do fator de potência nos dois primários dos transformadores da conexão Scott (linha difásica). Pode-se verificar pelo exame dos oscilogramas que os ângulos de defasamento entre corrente e tensão são aproximadamente iguais nos dois circuitos, e correspondem a 60° (valor medido) entre as intersecções das curvas com o eixo dos tempos. Um cálculo mais preciso poderia ser feito a partir desses oscilogramas, construindo-se os gráficos da potência instantânea e dos quadrados das tensões e das correntes respectivas, afim de se determinar por integração gráfica os valores das potências médias e valores eficazes, resultando daí os fatores de potência nos dois primários.

- 5 - Na fig. 7.4 é apresentado o oscilograma (F) de um dos circuitos das lâmpadas fluorescentes, tendo sido possível verificarmos serem iguais os oscilogramas relativos às duas outras lâmpadas. Nesse oscilograma pode-se, análogamente ao que foi dito em relação às figuras C e D, determinar o fator de potência, que nessa parte do circuito também corresponde muito aproximadamente ao defasamento de 60° , conferido, aliás, com a medida feita de outro modo, com auxílio de wattômetro, voltômetro e amperômetro. É claro que esta última medida corresponde ao fator de potência de ondas senoidais equivalentes.
- 6 - A comparação entre os oscilogramas nos primários dos transformadores T_1 e T_2 com os oscilogramas relativos ao secundário (circuitos das lâmpadas) indicando para o fator de potência, valores perfeitamente comparáveis entre si, confirmam a hipótese feita de se poder, em primeira aproximação, admitir, no problema em estudo, que o primário funcione com o mesmo fator de potência do secundário.

7 - Por meio da superposição dos oscilogramas C e D, levando em conta o defasamento de 90° entre as tensões, como foi demonstrado pelo oscilograma B, obtém-se a fig. 7.4 C'D', pela qual se verifica que o defasamento entre as correntes I_1 e I_2 é de 90°, conforme a previsão do diagrama do círculo e que está representado no diagrama vetorial da fig. 7.4.

8 - O oscilograma 7.4 - A refere-se à entrada monofásica de toda a instalação, ao mesmo tempo que registra o efeito final, representado pela curva do fluxo luminoso. Nesse oscilograma, além dos traços interrompidos que correspondem ao eixo de tempo, estão registradas as curvas da tensão da linha monofásica, da corrente e do fluxo. O fator determinado pelo oscilograma corresponde a $\cos\theta = \cos 24^\circ = 0,914$.

As medidas diretas, feitas com os instrumentos mostrados no esquema, forneceram os seguintes dados:

Tensão na linha monofásica $V = 115$ volts

Corrente da linha monofásica $I = 1,18$ ampéres

Potência medida com wattômetro $P = 123,8$ watts

$$\therefore \cos\theta = P/V I = 123,8/115 \cdot 1,18 = 0,915.$$

Este último valor concorda plenamente com aquele outro (0,914) obtido pelo exame dos oscilogramas. Ocorre notar que os oscilogramas foram colhidos estando os instrumentos ligados ao circuito.

9 - No circuito trifásico das lâmpadas, foram feitas as seguintes verificações, por meio dos voltômetros V_1 , V_2 e V_3 .

$$V_1 = 230 \text{ volts}$$

$$V_2 = 230 \text{ volts}$$

$$V_3 = 235 \text{ volts}$$

Esses valores confirmam o que já foi dito a propósito dos oscilogramas, sobre a operação praticamente equilibrada da linha trifásica.

Nota: O autor experimentou também a substituição dos reatores comuns, ordinariamente montados um para cada lâmpada, por um reator único trifásico, construído com a mesma técnica dos transformadores trifásicos, a saber; suprimido o ramo central comum, na hipótese de que os fluxos aí se anulem, com a finalidade de se economizar o peso do ferro. As figs. 7.3 A e B mostram as fotografias do mesmo. Os resultados foram satisfatórios, sugerindo, portanto, a possibilidade de se empregar esse tipo de reator trifásico na instalação do conjunto de três lâmpadas ou grupo ternário de lâmpadas fluorescentes.

Uma observação que se nos afigura de capital importância é a circunstância de que, não obstante o baixo fator de potência de cada elemento de carga (lâmpada mais reator) na linha de alimentação monofásica, o sistema por nós imaginado reflete um fator de potência bastante elevado ($\cos\phi = 0,915$).

Esta melhoria final do fator de potência deve ser considerada uma das características próprias do sistema proposto, parecendo-nos desnecessário insistir sobre as vantagens que isso representa para as instalações primárias produtoras e distribuidoras de energia elétrica. Por isso mesmo, o sistema por nós proposto enquadra-se perfeitamente bem nas normas técnicas prescritas em relação à utilização de energia elétrica, tendo em vista o seu melhor aproveitamento.

7.4 - Crítica dos resultados

Os valores medidos no circuito final concordam razoavelmente com os valores previamente estabelecidos em função dos dados. Era mesmo de se esperar certa discrepância, devido principalmente ao fato de não serem

senoidais as correntes e a tensão da linha monofásica ser 5 volts menos do que os 120 volts previstos na construção do diagrama.

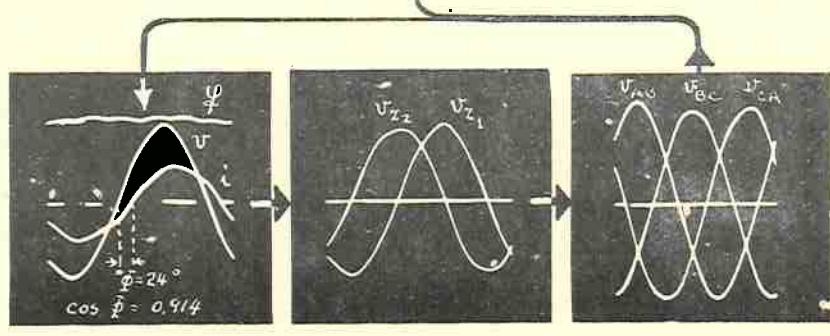
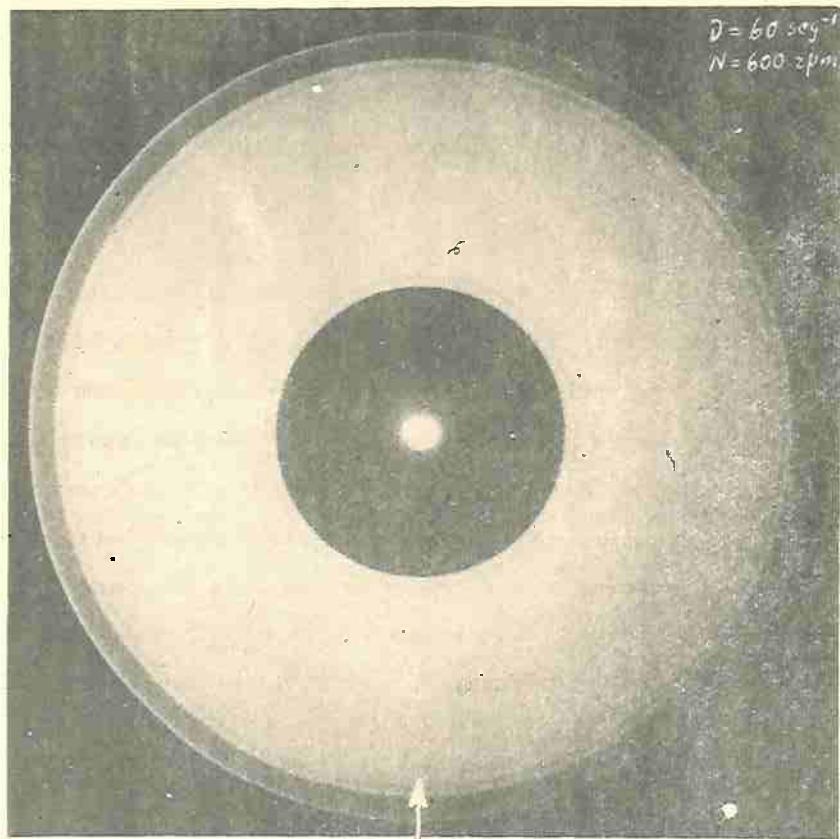
Deve-se notar que as experiências foram feitas tendo em vista demonstrar as possibilidades do sistema, e que, portanto, os transformadores não foram construídos para as condições técnicas de custo que requer o equipamento auxiliar das lâmpadas fluorescentes.

Mesmo assim o peso global dos transformadores, reatores e auto transformador, para 8 lâmpadas de 30 watts, não excede no total, a 40% do peso de três reatores industriais do tipo Tulamp. Pode-se pois, pensar que com transformadores apropriados e condensados do tipo daqueles empregados para correção de fator de potência das lâmpadas fluorescentes, seja possível eliminar aquele excesso de peso que o equipamento auxiliar apresentou em nossas experiências. Com a utilização de equipamento adequado, teríamos, afinal, o mesmo peso e custo para as instalações das lâmpadas fluorescentes, com as duas notáveis vantagens de prática ausência de efeito estroboscópico e elevado fator de potência para o conjunto.

O resultado prático do sistema, sob o ponto de vista estroboscópico, é excelente, como se pode ver pelos oscilogramas e fotografias da fig. 7.5. Esses documentos mostram que a flutuação do fluxo luminoso é de fato desrespeitável.

A propósito, poder-se-á lembrar que, na hipótese de que porventura fosse senoidal a flutuação do fluxo de uma lâmpada isolada, a disposição de três lâmpadas com sistema trifásico equilibrado-simétrico, daria para o fluxo resultante um valor constante, sem qualquer flutuação, como acontece com a potência elétrica numa linha trifásica simétrica e equilibrada.

Na fotografia da referida figura, observa-se a uniformidade da faixa luminosa correspondente ao setor branco, sobre o fundo negro do veludo,

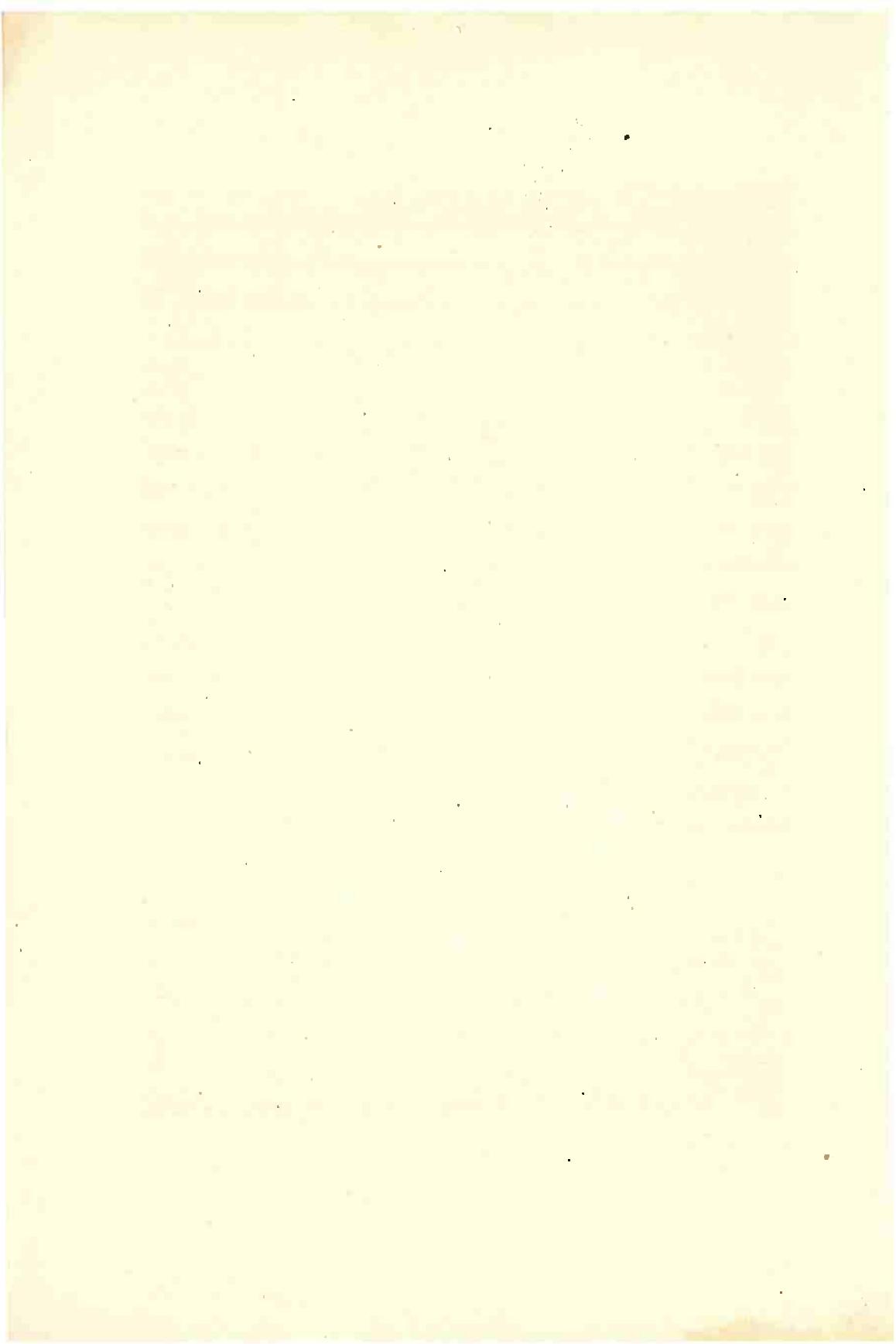


Monofásico

Difásico

Trifásico

Fig. 7.5



girando a cerca de 600 r.p.m. .

Nestes termos, o sistema por nós imaginado, para a obtenção de um circuito trifásico a partir de um sistema monofásico, incluindo a conexão Scott, parece constituir um recurso inteiramente novo e um passo a frente no desenvolvimento da técnica de iluminação, com recurso às lâmpadas fluorescentes.

Uma das restrições que se têm feito ao emprego dessas lâmpadas é a de não aliviar as linhas de alimentação, em proporção com o aumento de rendimento luminoso, o que praticamente implica na utilização de fios, "conduits", etc... da mesma capacidade e custo que as correspondentes às potências relativamente mais elevadas exigidas pela iluminação com lâmpadas incandescentes.

Esta restrição desaparece com o emprego de sistemas que corrigem o fator de potência. Entre estes, o dispositivo por nós apresentado deve ser incluído, sem reservas, com a característica própria de eliminar, de modo praticamente completo, o efeito estroboscópico das lâmpadas fluorescentes, o qual nesse tipo de ligação se apresenta ainda mais atenuado do que no caso das lâmpadas incandescentes.

7.5 - Sobre a utilidade do polianalizador

Este julgamento dos resultados só se tornou possível na forma simples e concludente com que os fenômenos estão traduzidos nos documentos fotográficos, graças à aplicação do polianalizador, que mais uma vez encontrou, no presente estudo, um campo para o qual a sua utilização se verifica ser extraordinariamente cômoda e vantajosa.

Ocorre notar que, o emprego do oscilógrafo catódico em combinação com os dois referidos polianalizadores, permitiu realizar todas as obser-

vações no mesmo circuito, estando os aparelhos de registro colocados ao lado do equipamento de iluminação.

A grande flexibilidade oferecida pelo seletor combinador, que também imaginamos como útil accessório do polianalizador, permitiu-nos, com grande segurança no que respeita a simultaneidade e fidelidade das observações, fazer uma coleta de dados comparativos num grande número de pontos dos vários circuitos: a linha monofásica, as duas linhas difásicas e as 3 linhas trifásicas.

Em observações como essas, em que era oportuno conhecer -se dados relativos a grandezas físicas de espécies diferentes (correntes, tensões, fluxos luminosos, defasamentos) perturbados muitas vezes por fenômenos transitórios e apresentando valores de ordem diferente nos vários pontos do circuito, o que foi feito com os polianalizadores e respectivos accessórios exigiria, na ausência dos mesmos, um complicado equipamento para obter registros oscilográficos equivalentes.

CONCLUSÕES RELATIVAS AO EMPRÉGO DA ILUMINAÇÃO
COM LÂMPADAS FLUORESCENTES

O presente estudo oferece, em relação à técnica da iluminação com lâmpadas fluorescentes, algumas conclusões gerais, que vamos expôr em seguida, como fecho do nosso trabalho.

As "Normas para a execução de Instalações Elétricas" da Associação Brasileira de Normas Técnicas, em seu Art. 23, prescreve: "Todas as instalações de lâmpadas ou tubos de iluminação a mercúrio, neônio, fluorescentes, luminescentes, ultra-violetas ou semelhantes, cujo fator de potência, tomamos em conjunto ou individualmente, seja inferior a 0,90, deverão ser providos dos dispositivos de correção necessários para que seja atingido o fator de potência de 0,90, no mínimo, valor esse medido junto ao medidor da instalação".

Alem dessa exigência de caráter técnico, seria interessante estabelecer também, para a iluminação com as lâmpadas de descarga em gases e lâmpadas fluorescentes, outras especificações, relativas à boa técnica de iluminação, visando a atenuação do efeito estroboscópico.

Já foi mostrado, no Capítulo V, como se pode corrigir o fator de potência por meio de capacitores ligados em paralelo. Essa conexão, entretanto, não atenua o efeito estroboscópico.

Como se procurou demonstrar neste trabalho, pode-se conseguir um fator de potência superior a 0,9, reduzindo-se ao mesmo tempo o efeito estroboscópico pelo emprêgo de circuitos especiais tais como: Sistema "Tulamp"; lâmpadas especiais de duas placas que operam como lâmpadas retificadoras; o sistema trifásico obtido como foi descrito nos Capítulos VI e

VII dêste trabalho, e que poderíamos designar como "Trilamp".

O efeito estroboscópico pode ser ainda mais atenuado selecionando lâmpadas fluorescentes com fósforos de maior persistência, o que torna a luz mais próxima da natural, sob este aspeto.

É interessante observar que as lâmpadas do tipo White 3 600° por exemplo, por nós examinadas, são aquelas de mais elevado rendimento para iluminação geral, e também as que apresentam menor efeito estroboscópico. No caso de não ser especialmente necessária uma curva espetroradiométrica mais próxima da luz natural, como a produzida pela lâmpada "Daylight", a iluminação com lâmpadas "White", torna o ambiente mais agradável, pelo fato de terem essa característica espetroradiométrica deslocada para a região do vermelho no espetro visível, o que não ocorre com a "Daylight", que tem componentes do lado do azul.

O custo da iluminação fluorescente é bastante elevado, principalmente quando são tomadas todas as medidas técnicas para se obter os melhores resultados, tanto do ponto de vista elétrico como do ponto de vista da técnica da boa iluminação.

Apesar disso, uma instalação bem estudada pode permitir um rendimento luminoso mais alto comparado ao sistema de iluminação com lâmpadas incandescentes, mesmo levando-se em conta a potência total aplicada e não apenas aquela das lâmpadas.

No caso, entretanto, de não serem tomadas as medidas técnicas sob o ponto de vista da boa iluminação, com a correção do efeito estroboscópico e do fator de potência, então a única vantagem da luz fluorescente sobre a incandescente é o maior rendimento luminoso. Este aspeto não pode ser, evidentemente, considerado como critério único para a solução de um assunto técnico como a iluminação, que envolve aspectos subjetivos que devem ser levados

em conta.

O campo da aplicação criado pela iluminação fluorescente é muito extenso, e as lâmpadas fluorescentes e de descarga em gases se encontram em franco desenvolvimento, como pode ser constatado pela excelente literatura técnica a respeito, publicada recentemente em vários países.

A finalidade do engenheiro é prover os meios para que a iluminação do ambiente de trabalho seja o mais adequado possível. Nessas condições a iluminação para o trabalho em geral deverá tender para aquela que seja a mais próxima da natureza, isto é, que possa aproximar-se à da luz do sol, sendo esta a que oferece ao indivíduo a sensação de bem estar e segurança.

Sem dúvida alguma a técnica deve procurar o maior rendimento luminoso, como um meio de obter mais econômicamente os aclaramentos recomendados de acordo com o tipo de trabalho. O engenheiro não pode ater-se à penas à obtenção do mais elevado rendimento, devendo além disso, procurar que a iluminação se aproxime o mais possível das condições da natureza, escotilhando para isso as fontes luminosas de curva espetroradiométrica conveniente e corrigidas para o efeito estroboscópico.

É uma feliz coincidência que a correção do efeito estroboscópico possa, em muitos casos, ser obtida conjuntamente com a melhoria do fator de potência, exigência técnica esta das mais importantes para o melhor aproveitamento das disponibilidades da energia elétrica do país.

É com satisfação que constatamos que o sistema por nós proposto corrige o fator de potência, ao mesmo tempo que praticamente anula o efeito estroboscópico.

PRA/mvs.

