

# ESTUDO DAS HARMÓNICAS

## NA REDE DA UNIÃO ELÉCTRICA PORTUGUESA (SUL)

### Introdução

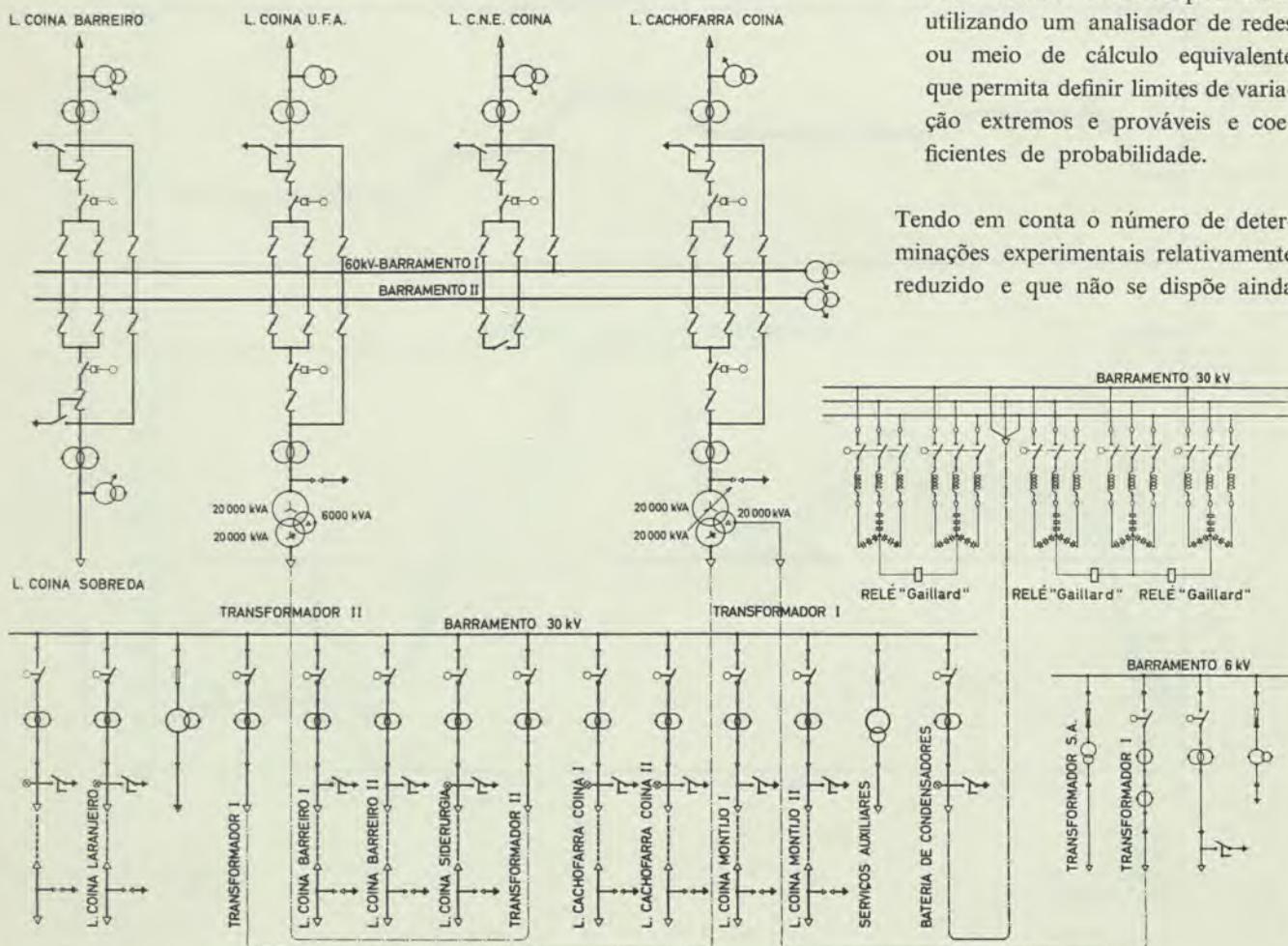
Este estudo refere-se ao problema das harmónicas na rede da União Eléctrica Portuguesa (Sul), especificamente na Subestação de Coima, e fundamenta-se em determinações experimentais efectuadas nessa subestação em Dezembro de 1961 por pessoal e utilizando equipamento do Laboratório Electrotécnico da Companhia Nacional de Electricidade. Pretendia-se averiguar, designadamente, os efeitos sob o ponto de vista das harmónicas das baterias de condensadores da Subestação de Coima.

Um estudo relativamente completo de harmónicas numa zona de uma rede deve basear-se:

- Num conjunto de determinações experimentais na própria rede, em número apreciavelmente elevado e incluindo situações quanto possível diversas quanto ao valor dos múltiplos parâmetros que afectam as harmónicas.
- Num estudo teórico que permita dar coerência aos resultados experimentais e destriçar aquilo que corresponde a uma variação regular e sistemática daquilo que corresponde a variações aleatórias.

- Num estudo teórico-experimental utilizando um analisador de redes ou meio de cálculo equivalente que permita definir limites de variação extremos e prováveis e coeficientes de probabilidade.

Tendo em conta o número de determinações experimentais relativamente reduzido e que não se dispõe ainda



Esquema geral unifilar da Subestação de Coima

de um analisador de redes, este estudo fundamenta-se apenas nas duas primeiras «bases» acima mencionadas e não se dispõe de critério seguro para definir a «probabilidade» dos resultados.

Neste artigo segue-se o seguinte esquema:

- Na posição 1 expõem-se os resultados directos das determinações experimentais efectuadas na Subestação de Coína da União Eléctrica Portuguesa, em Dezembro de 1961.
- Na posição 2 faz-se uma exposição resumida dos principais aspectos teóricos do problema em condições e com hipóteses válidas para a rede em que se efectuaram os ensaios.
- Na posição 3 indicam-se algumas conclusões essencialmente comparativas obtidas a partir dos ensaios tendo em conta o exposto na posição 2.

A fim de permitir «localizar» as medições efectuadas e as condições em que foram feitas junta-se em anexo o esquema geral unifilar da Subestação de Coína (extraído do desenho UEP W-60).

### 1 — Determinações experimentais efectuadas e resultados directos das mesmas

Como já disse, este estudo é baseado em medições efectuadas durante o mês de Dezembro de 1961, utilizando como

aparelho de medida, fundamentalmente, um analisador de harmónicas.

Efectuaram-se medidas relativas a:

- a) Uma das tensões compostas nos 60 kV;
- b) Uma das tensões compostas nos 30 kV;
- c) A corrente numa das fases na linha Setúbal Coína (1);
- d) A corrente numa das fases de uma das baterias de condensadores.

Efectuaram-se medidas nas seguintes condições:

- a) Todas as cargas da Subestação de Coína em paralelo (barramento único nos 60 kV e nos 30 kV);
- b) Carga da CUF a partir de barramento separado em 60 kV (paralelo com o resto da rede em Cachofarra);
- c) Carga da CUF a partir de barramento separado em 60 kV (paralelo com o resto da rede em Cachofarra) com os rectificadores desligados;
- d) Carga da CUF a partir de barramento separado em 60 kV (paralelo com o resto da rede em Cachofarra), com o forno desligado;
- e) Restantes cargas da Subestação de Coína (além da CUF) em barramento separado em 60 kV (paralelo com o resto da rede em Cachofarra).

(1) Esta linha é designada neste trabalho por «linha CNE Coína».

TABELA 1

N.º da fotografia	Dia	Hora	Grandeza medida	Escala	Relação de transformação do transformador de medida	Resistência do shunt (Ω)	Número de transformadores de 60/30 kV em serviço	Número de baterias de condensadores em serviço	Carga em paralelo em Coína
1	18	16.15	Tensão RT nos 60 kV	2,5 V	60 000/110	—	1	0	Toda a carga de Coína
2	18	17.01	Tensão RT nos 60 kV	2,5 V	80 000/110	—	1	1	Toda a carga de Coína
3	19	10.30	Tensão RT nos 60 kV	2,5 V	60 000/110	—	1	0	Toda a carga de Coína
4	19	16.35	Corrente R na bateria I	5 mV	1000/5	0,397	1	1 (I)	Toda a carga de Coína
5	19	17.20	Corrente R na bateria I	5 mV	1000/5	0,397	1	2 (I+II)	Toda a carga de Coína
6	19	17.45	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	1 (II)	Toda a carga de Coína
7	19	18.11	Tensão RT nos 30 kV	1 V	30 000/110	—	1	5	Toda a carga de Coína
8	19	18.54	Corrente R na bateria I	5 mV	1000/5	0,397	1	5	Toda a carga de Coína
9	29	12.48	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	0	Toda a carga de Coína
10	29	13.00	Corrente R na linha CNE Coína	10 mV	400/5	0,397	1	0	Toda a carga de Coína
11	29	13.05	Corrente R na linha CNE Coína	25 mV	400/5	0,397	1	5	Toda a carga de Coína
12	29	13.06	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	5	Toda a carga de Coína
13	29	13.09	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	3 (I+IV+V)	Toda a carga de Coína
14	29	13.26	Corrente R na linha CNE Coína	10 mV	400/5	0,397	1	0	Toda a carga de Coína
15	29	13.32	Corrente R na linha CNE Coína	25 mV	400/5	0,397	1	3	Toda a carga de Coína
16	29	13.42	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	5	Toda a carga de Coína
17	29	13.46	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	0	Toda a carga de Coína
18	29	15.08	Tensão RT nos 60 kV	2,5 V	60 000/110	—	1	0	Toda a carga de Coína
19	29	15.12	Corrente R na linha CNE Coína	10 mV	400/5	0,397	1	0	Toda a carga de Coína
20	29	15.27	Corrente R na linha CNE Coína	5 mV	400/5	0,397	1	0	Carga de Coína excepto CUF
21	29	15.35	Tensão RT nos 60 kV	2,5 V	60 000/110	—	1	0	Carga de Coína excepto CUF
22	29	15.45	Tensão RT nos 60 kV	2,5 V	60 000/110	—	1	0	Toda a carga de Coína
23	29	15.49	Corrente R na linha CNE Coína	10 mV	400/5	0,397	1	0	Só CUF
24	29	16.18	Corrente R na linha CNE Coína	10 mV	400/5	0,397	1	0	Só CUF com forno desligado
25	29	16.20	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	0	Só CUF com forno desligado
26	29	16.28	Tensão RT nos 60 kV	1 V	60 000/110	—	1	0	Só CUF com rectificador desligado
27	29	16.30	Corrente A na linha CNE-Coína	10 mV	400/5	0,397	1	0	Só CUF com rectificador desligado

Na tabela 1 indicam-se:

- Os números de ordem das fotografias obtidas no analisador de harmónicas;
- O dia e hora correspondentes;
- A grandeza medida;
- A escala do analisador de harmónicas utilizada;
- A relação de transformação dos transformadores de medida utilizados;
- A resistência do «shunt» utilizado para as medições de corrente;
- O número de transformadores de 60/30 kV em serviço na subestação;
- O número de baterias de condensadores em serviço;
- A carga a que se referem as medidas (carga em paralelo).

Da observação das fotografias («vide» as correspondentes reproduções) conclui-se que aparecem sistematicamente e com regularidade as harmónicas, 5ª, 7ª, 11ª e 13ª (as condições de medida da 3ª harmónica são deficientes). Um tanto irregularmente notam-se outras harmónicas, que são, no entanto, (com excepção da 3ª) apreciavelmente reduzidas. Desta forma, e para conseguir uma relativa homogeneidade dos resultados, decidi considerar sistematicamente as harmónicas 5ª, 7ª, 11ª e 13ª.

TABELA 2

N.º da fotografia	Harmónica	Frequência			
		5ª	7ª	11ª	13ª
		250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s
1		0,55	0,19	0,12	0,06
2		0,62	0,20	0,12	0,06
3		0,52	0,14	0,13	0,10
4		1,00	0,40	0,14	0,18
5		0,89	0,40	0,20	0,17
6		1,00	0,44	0,29	0,20
7		0,94	0,25	0,08	0,06
8		0,56	0,22	0,05	0,05
9		1,20	0,30	0,20	0,10
10		1,15	0,22	0,14	0,09
11		0,88	0,20	0,08	0,08
12		0,94	0,23	0,19	0,12
13		1,00	0,23	0,20	0,13
14		1,15	0,34	0,20	0,10
15		1,08	0,17	0,08	0,07
16		0,96	0,26	0,21	0,13
17		1,25	0,28	0,20	0,11
18		0,57	0,12	0,04	0,04
19		1,09	0,23	0,11	0,06
20		1,05	0,23	0,23	0,17
21		0,58	0,12	0,05	0,04
22		0,52	0,11	0,05	0,04
23		0,92	0,23	0,04	0,03
24		1,20	0,36	0,08	0,05
25		1,23	0,33	0,16	0,17
26		1,23	0,46	0,16	0,17
27		0,77	0,62	0,10	0,08

Na tabela 2 indicam-se os valores das amplitudes das harmónicas [na escala da fotografia e sem ter em conta o coeficiente de correcção do filtro do analisador de harmónicas (2)].

TABELA 3

TENSÕES SECUNDÁRIAS NOS ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO, EM VOLTS

Número da fotografia	Grandeza medida	Tensões secundárias, em volts			
		250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s
1	Tensão RT nos 60 kV	2,20	0,66(5)	0,35	0,16(5)
2	Tensão RT nos 60 kV	2,48	0,70	0,35	0,16(5)
3	Tensão RT nos 60 kV	2,08	0,49	0,38	0,27(5)
6	Tensão RT nos 60 kV	1,60	0,61(6)	0,33(4)	0,22
7	Tensão RT nos 30 kV	1,50(4)	0,35	0,09(2)	0,06(6)
9	Tensão RT nos 60 kV	1,02	0,42	0,23	0,11
12	Tensão RT nos 60 kV	1,50(4)	0,32(2)	0,21(8)	0,13(2)
13	Tensão RT nos 60 kV	1,60	0,32(2)	0,23	0,14(3)
16	Tensão RT nos 60 kV	1,53(6)	0,36(4)	0,24(2)	0,14(3)
17	Tensão RT nos 60 kV	2,00	0,39(2)	0,23	0,12(1)
18	Tensão RT nos 60 kV	2,20	0,42	0,12	0,11
21	Tensão RT nos 60 kV	2,12	0,42	0,15	0,11
22	Tensão RT nos 60 kV	2,08	0,38(5)	0,15	0,11
25	Tensão RT nos 60 kV	1,97	0,46(2)	0,18(4)	0,18(7)
26	Tensão RT nos 60 kV	1,97	0,64(4)	0,18(4)	0,18(7)

Na tabela 3 indicam-se, nas medições relativas a tensões, as tensões das referidas harmónicas (em valor eficaz) no secundário dos transformadores de medida. Estas tensões são iguais ao produto das três seguintes grandezas:

- Amplitude da harmónica na fotografia;
- Coeficiente de correcção do filtro;
- Escala do analisador de harmónicas.

TABELA 4

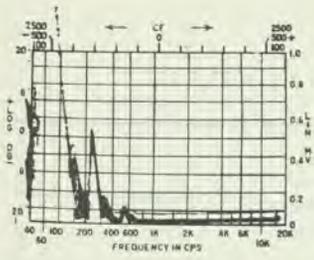
CORRENTES SECUNDÁRIAS NOS ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE, EM MILIAMPÈRES

Número da fotografia	Grandeza medida	Correntes secundárias, em miliampères			
		250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s
4	Corrente R na bateria I	20,2	7,1	2,0(3)	2,5
5	Corrente R na bateria I	17,9	7,1	2,9	2,4
8	Corrente R na bateria I	11,3	3,9	0,7(2)	0,7
10	Corrente R na linha CNE Coima	46,3	7,8	4,1	2,5
11	Corrente R na linha CNE Coima	83,6	17,6	5,8	5,5
14	Corrente R na linha CNE Coima	46,3	12,0	5,8	2,8
15	Corrente R na linha CNE Coima	108,8	15,0	5,8	4,8
19	Corrente R na linha CNE Coima	43,9	8,1	3,2	1,7
20	Corrente R na linha CNE Coima	21,2	4,1	3,3(3)	2,4
23	Corrente R na linha CNE Coima	37,1	8,1	1,2	0,8
24	Corrente R na linha CNE Coima	48,4	12,7	2,3	1,4
27	Corrente R na linha CNE Coima	31,0	21,9	2,9	2,2

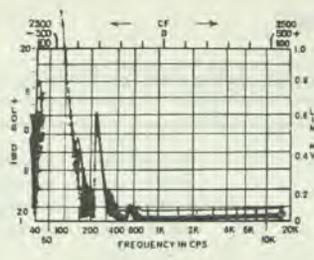
Na tabela 4 indicam-se, relativamente às medições de correntes, as correntes das harmónicas já mencionadas (em valor eficaz) no secundário dos transformadores de

(2) O coeficiente de correcção do filtro do analisador de harmónicas é, para estas frequências:

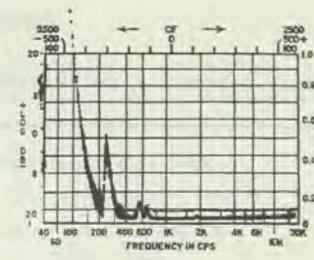
5ª harmónica	1,6
7ª »	1,4
11ª »	1,15
13ª »	1,1



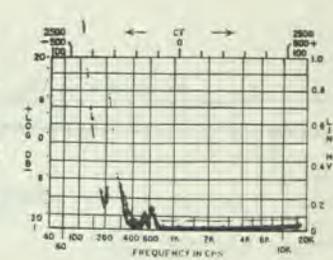
Fotografia 1



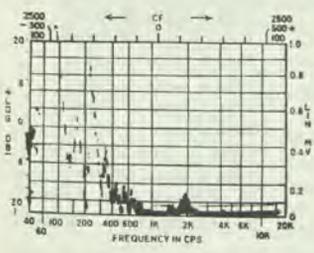
Fotografia 2



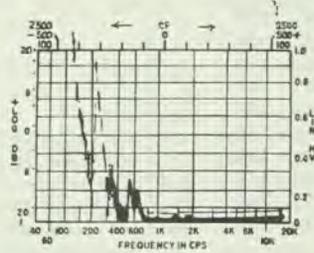
Fotografia 3



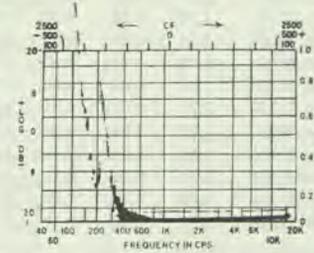
Fotografia 4



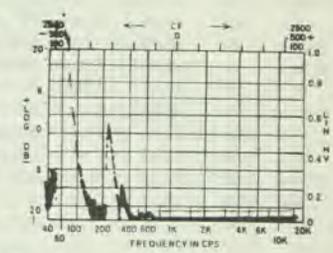
Fotografia 5



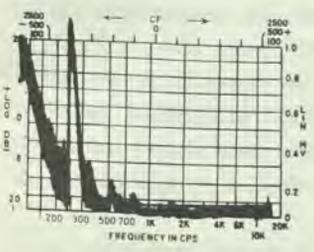
Fotografia 6



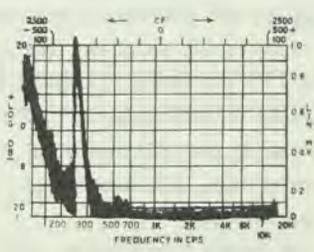
Fotografia 7



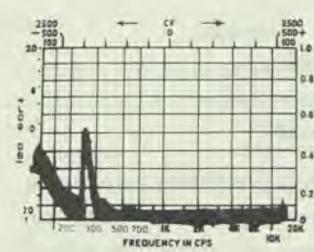
Fotografia 8



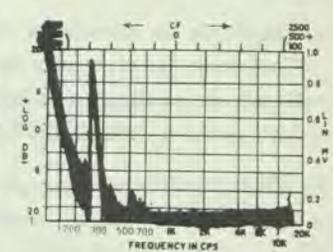
Fotografia 9



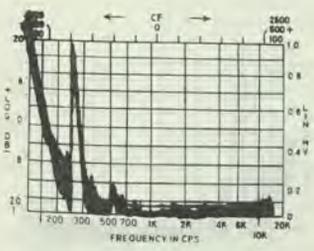
Fotografia 10



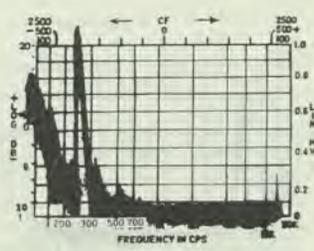
Fotografia 11



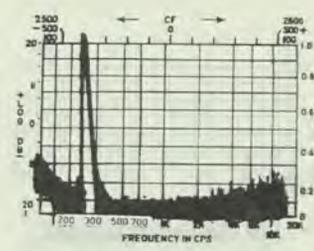
Fotografia 12



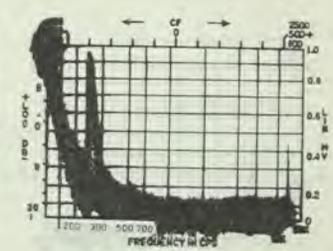
Fotografia 13



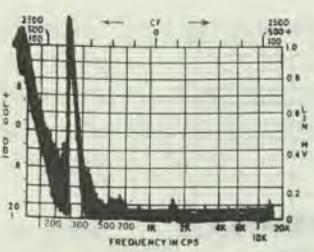
Fotografia 14



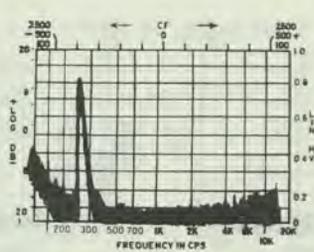
Fotografia 15



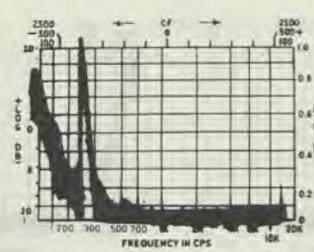
Fotografia 16



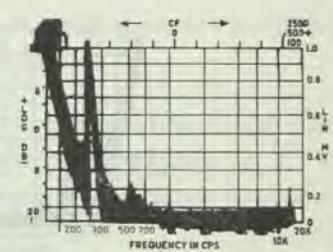
Fotografia 17



Fotografia 18



Fotografia 19



Fotografia 20

TABELA 5

HARMÓNICAS DA TENSÃO E ÍNDICE  $\sigma$ , EM PORCENTAGEM, REFERIDOS ÀS TENSÕES 63 kV E 32,5 kV

N.º da fotografia	Dia	Hora	Grandeza	Harmónicas em percentagem				$\sigma$ o/o	Número de transformadores de 60/30 kV em serviço	Número de baterias de condensadores em serviço	Carga em paralelo em Coína
				250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s				
1	18	16.45	Tensão RT nos 60 kV	1,90	0,58	0,31	0,14	2,93	1	0	Toda a carga de Coína
2	18	17.01	Tensão RT nos 60 kV	2,15	0,61	0,31	0,14	3,21	1	1 (I)	Toda a carga de Coína
3	19	10.30	Tensão RT nos 60 kV	1,80	0,42	0,34	0,23	2,79	1	0	Toda a carga de Coína
6	19	17.45	Tensão RT nos 60 kV	1,39	0,53	0,29	0,19	2,40	1	1 (II)	Toda a carga de Coína
7	19	18.11	Tensão RT nos 30 kV	1,26	0,29	0,08	0,06	1,69	1	5	Toda a carga de Coína
9	29	12.48	Tensão RT nos 60 kV	1,66	0,36	0,20	0,10	2,32	1	0	Toda a carga de Coína
12	29	13.06	Tensão RT nos 60 kV	1,30	0,28	0,19	0,11	1,88	1	5	Toda a carga de Coína
13	29	13.09	Tensão RT nos 60 kV	1,39	0,28	0,20	0,12	1,99	1	3 (I+IV+V)	Toda a carga de Coína
16	29	13.42	Tensão RT nos 60 kV	1,33	0,32	0,21	0,12	1,98	1	5	Toda a carga de Coína
17	29	13.46	Tensão RT nos 60 kV	1,73	0,34	0,20	0,10	2,37	1	0	Toda a carga de Coína
18	29	15.08	Tensão RT nos 60 kV	1,97	0,36	0,10	0,10	2,46	1	0	Toda a carga de Coína
21	29	15.35	Tensão RT nos 60 kV	1,84	0,36	0,13	0,10	2,43	1	0	Carga de Coína excepto CUF
22	29	15.45	Tensão RT nos 60 kV	1,80	0,33	0,13	0,10	2,36	1	0	Toda a carga de Coína
25	29	16.20	Tensão RT nos 60 kV	1,71	0,40	0,16	0,16	2,43	1	0	Só CUF com forno desligado
26	29	16.28	Tensão RT nos 60 kV	1,71	0,56	0,16	0,16	2,59	1	0	Só CUF com rectific. desligado

medida. Estas correntes são iguais ao produto das seguintes grandezas:

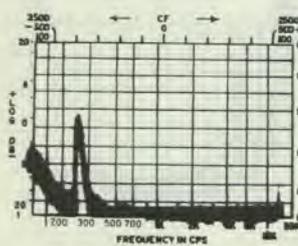
- Amplitude da harmónica na fotografia;
- Coeficiente de correcção do filtro;
- Escala do analisador de harmónicas;
- Inverso da resistência do «shunt».

Na tabela 5 indicam-se, para as quatro referidas harmónicas, as harmónicas de tensão em percentagem da primeira harmónica, tendo-se admitido para o respectivo cálculo tensões nos 60 kV e nos 30 kV respectivamente 63 kV e 32,5 kV.

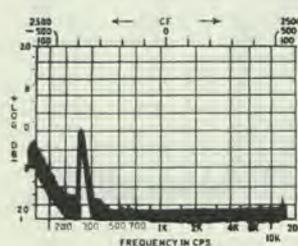
Nesta mesma tabela indica-se também a grandeza  $\sigma$ , igual à soma das percentagens das harmónicas 5ª, 7ª, 11ª e 13ª.

Julgo esta grandeza  $\sigma$  (somatório das percentagens das harmónicas significativas, em geral, neste caso, a 5ª, 7ª, 11ª e 13ª) um índice significativo da importância das harmónicas e relativamente adequado para efeitos gerais, na medida em que não haja razões para definir um critério específico diferente para avaliar a «importância» das harmónicas.

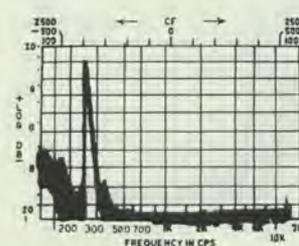
Na tabela 6 indicam-se, para as quatro harmónicas que se têm considerado, os valores eficazes das harmónicas das correntes primárias medidas, bem como o valor da tensão,



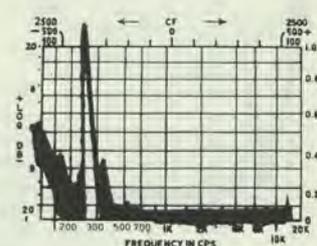
Fotografia 21



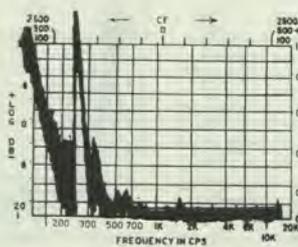
Fotografia 22



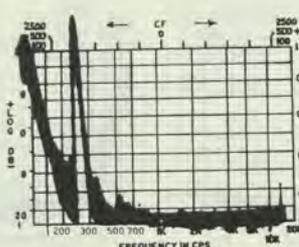
Fotografia 23



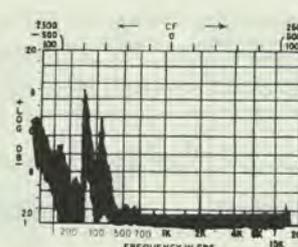
Fotografia 24



Fotografia 25



Fotografia 26



Fotografia 27

TABELA 6

HARMÔNICAS DAS CORRENTES PRIMÁRIAS, EM AMPÈRES

Número da fotografia	Dia	Hora	Grandeza	Harmônicas, em ampères				$\Sigma$ em ampères	Número de transformadores de 60/30 kV em serviço	Número de baterias de condensadores em serviço	Carga em paralelo em Coína	Grandeza de referência			
				250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s					Tensão (kV)	Potência (MW)	Factor de potência	Corrente (A)
4	19	16.35	Corrente R na bateria I	4,04	1,42	0,41	0,50	6,37	1	1 (I)	Toda a carga de Coína	32,5			40,(02)
	19	16.35	Corrente R no conjunto das baterias	4,04	1,42	0,41	0,50	6,37	1	1 (I)	Toda a carga de Coína	32,5			40,(02)
5	19	17.20	Corrente R na bateria I	3,58	1,42	0,58	0,48	6,06	1	2 (I+II)	Toda a carga de Coína	32,5			40,(02)
	19	17.20	Corrente R do conjunto das baterias	7,16	2,84	1,16	0,96	12,12	1	2 (I+II)	Toda a carga de Coína	32,5			80,(05)
8	19	18.54	Corrente R na bateria I	2,26	0,78	0,14	0,14	3,32	1	5	Toda a carga de Coína	32,5			40,(02)
	19	18.54	Corrente R no conjunto das baterias	11,30	3,90	0,70	0,70	16,60	1	5	Toda a carga de Coína	32,5			200,(12)
10	29	13.00	Corrente R na linha CNE Coína	3,70	0,62	0,33	0,20	4,85	1	0	Toda a carga de Coína	63	12	0,89	124
11	29	13.05	Corrente R na linha CNE Coína	6,69	1,41	0,46	0,44	9,00	1	5	Toda a carga de Coína	63	14	0,97	132
14	29	13.26	Corrente R na linha CNE Coína	3,70	0,96	0,46	0,22	5,34	1	0	Toda a carga de Coína	63	16,8	0,86	179
15	29	13.32	Corrente R na linha CNE Coína	8,70	1,20	0,46	0,38	10,74	1	3	Toda a carga de Coína	63	16,8	0,94	164
19	29	15.12	Corrente R na linha CNE Coína	3,51	0,65	0,26	0,11	4,56	1	0	Toda a carga de Coína	63	16,8	0,86	179
20	29	15.27	Corrente R na linha CNE Coína	1,70	0,33	0,27	0,19	2,49	1	0	Carga de Coína excepto CUF	63	14	0,95	135
23	29	15.49	Corrente R na linha CNE Coína	2,97	0,65	0,10	0,06	3,78	1	0	Só CUF	63	10	0,95	96
24	29	16.18	Corrente R na linha CNE Coína	3,87	1,02	0,18	0,11	5,18	1	0	Só CUF com forno deslig.	63	10	0,95	96
27	29	16.30	Corrente R na linha CNE Coína	2,48	1,75	0,23	0,18	4,64	1	0	Só CUF com rectificador deslig.	63	9,5	0,95	92

TABELA 7

HARMÔNICAS DE CORRENTE E ÍNDICE  $\sigma$ , EM PERCENTAGEM

Número da fotografia	Dia	Hora	Grandeza	Harmônicas, em percentagem				$\sigma$ %	Número de transformadores de 60/30 kV em serviço	Número de baterias de condensadores em serviço	Carga em paralelo em Coína
				250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s				
4	19	16.35	Corrente R na bateria I	10,09	3,55	1,02	1,25	15,92	1	1 (I)	Toda a carga de Coína
	19	16.35	Corrente R no conjunto das baterias	10,09	3,55	1,02	1,25	15,92	1	1 (I)	Toda a carga de Coína
5	19	17.20	Corrente R na bateria I	8,95	3,55	1,45	1,20	15,14	1	2 (I+II)	Toda a carga de Coína
	19	17.20	Corrente R no conjunto das baterias	8,95	3,55	1,45	1,20	15,14	1	2 (I+II)	Toda a carga de Coína
8	19	18.54	Corrente R na bateria I	5,64	1,95	0,35	0,35	8,30	1	5	Toda a carga de Coína
	19	18.54	Corrente R no conjunto das baterias	5,64	1,95	0,35	0,35	8,30	1	5	Toda a carga de Coína
10	29	13.00	Corrente R na linha CNE Coína	2,98	0,50	0,27	0,16	3,91	1	0	Toda a carga de Coína
11	29	13.05	Corrente R na linha CNE Coína	5,07	1,07	0,35	0,33	6,82	1	5	Toda a carga de Coína
14	29	13.26	Corrente R na linha CNE Coína	2,06	0,54	0,26	0,12	2,98	1	0	Toda a carga de Coína
15	29	13.32	Corrente R na linha CNE Coína	5,30	0,73	0,28	0,23	6,55	1	3	Toda a carga de Coína
19	29	15.12	Corrente R na linha CNE Coína	1,96	0,36	0,15	0,08	2,55	1	0	Toda a carga de Coína
20	29	15.27	Corrente R na linha CNE Coína	1,26	0,24	0,20	0,14	1,84	1	0	Carga de Coína excepto CUF
23	29	15.49	Corrente R na linha CNE Coína	3,09	0,68	0,10	0,06	3,94	1	0	Só CUF
24	29	16.18	Corrente R na linha CNE Coína	4,03	1,06	0,19	0,11	5,39	1	0	Só CUF com forno deslig.
27	29	16.30	Corrente R na linha CNE Coína	2,70	1,90	0,25	0,20	5,04	1	0	Só CUF com rectif. deslig.

potência, factor de potência e corrente da grandeza de referência.

Na mesma tabela indica-se a soma dos valores eficazes das quatro harmônicas mencionadas, grandeza que se representa por  $\Sigma$ .

Na tabela 7 indicam-se, para as quatro harmônicas que se têm considerado, os valores relativos das harmônicas de corrente (em percentagem), bem como o valor (também

em percentagem) do índice  $\sigma$ , igual à soma dos valores relativos dessas mesmas harmônicas.

Na tabela 8 indica-se a amplitude das harmônicas já mencionadas, em valor relativo, na tensão composta nos 30 kV, com base nas determinações correspondentes às fotografias n.ºs 4, 5, 7 e 8.

Indica-se, também em valor relativo, o valor do índice  $\sigma$  correspondente às mesmas determinações.

TABELA 8

HARMÓNICAS DA TENSÃO NOS 30 kV, EM PORCENTAGEM

Número da fotografia	Dia	Hora	Harmónicas, em percentagem				$\sigma$ %	Número de transformadores de 60/30 kV em serviço	Número de baterias de condensadores em serviço	Carga em paralelo em Coíma
			250 c/s	350 c/s	550 c/s	650 c/s				
4	19	18.35	2,02	0,51	0,09	0,09	2,71	1	1 (I)	Toda a carga de Coíma
5	19	17.20	1,79	0,51	0,13	0,09	2,52	1	2 (I+II)	Toda a carga de Coíma
7	19	18.11	1,26	0,29	0,08	0,06	1,69	1	5	Toda a carga de Coíma
8	19	18.54	1,13	0,28	0,03	0,03	1,47	1	5	Toda a carga de Coíma

**2—Comportamento de um circuito do ponto de vista das harmónicas perante a variação de uma capacidade em paralelo**

**2.1 — Introdução**

Consideremos as harmónicas numa «zona» de uma rede eléctrica, em princípio de «potência» relativamente reduzida em face da «potência» do «resto da rede». Designemos essa «zona» por rede «1» e o «resto da rede» por rede «2» (fig. 1).  
Suponhamos que se pretende analisar o efeito da variação de uma capacidade em paralelo na rede 1 nas harmónicas da tensão e da corrente na ligação da rede 1 à rede 2.

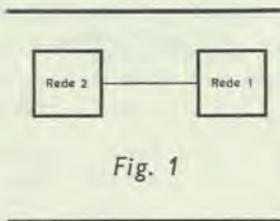


Fig. 1

Consideremos uma harmónica genérica, de ordem  $n$ . Para efeitos de sistematização convém «desdobrar» as harmónicas de tensão e corrente em duas «parcelas» (no sentido vectorial):

- As harmónicas «originadas» pelos elementos não lineares da rede 1, que, mesmo na hipótese de uma tensão rigorosamente sinusoidal na ligação das duas redes, originariam harmónicas de corrente na mesma ligação.
- As harmónicas «originadas» pelos elementos da rede 2.

A «decomposição» das harmónicas em duas «parcelas» não pode, naturalmente, ser considerada como rigorosa, dado que, para elementos não lineares, não é aplicável o princípio de sobreposição. Desde que aplicada prudentemente esta decomposição permite, no entanto, uma interpretação razoavelmente simples e relativamente aproximada dos fenómenos em jogo.

**2.2 — Harmónicas «originadas» pela rede 1**

Começemos então por considerar as harmónicas «originadas» pela rede 1. Na medida em que as harmónicas de tensão sejam reduzidas, e, pelo menos, para alguns dos elementos não lineares mais «importantes», pode admitir-se, para efeitos desta «parcela», que esses elementos «impõem» um valor  $\bar{I}_n$  (3) para a harmónica de ordem  $n$  na sua ligação à rede.

Por outro lado (e também dentro de uma «certa» aproximação), para a mesma harmónica genérica, a rede 1 (com excepção do elemento «introdutor» da corrente  $\bar{I}_n$ ), e a

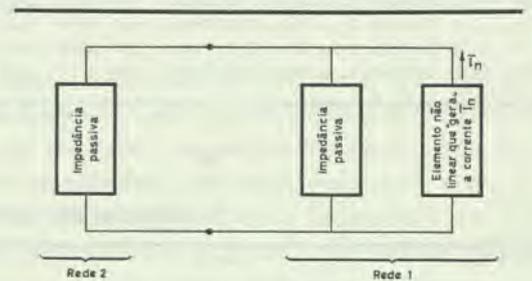


Fig. 2

rede 2, podem considerar-se «equivalentes» a impedâncias passivas (dependentes naturalmente da frequência da harmónica considerada) (fig. 2).

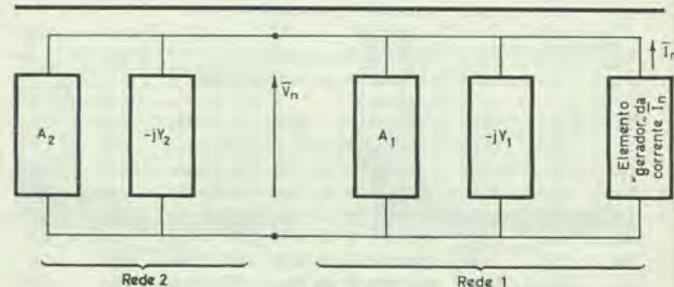


Fig. 3

Representemos cada uma destas impedâncias passivas pelo paralelo de uma impedância activa pura (de admitância  $A = 1/R$ ) e de uma impedância reactiva pura (de admitância  $-jY = 1/jZ_R$ ), conforme se indica na fig. 3.

(3) Represento por  $\bar{X}$  o complexo associado a uma grandeza genérica  $x$  sinusoidal no tempo e por  $X$  o valor eficaz de  $x$ . Represento também por  $\bar{X}$  o complexo associado a uma impedância ou admitância genérica (em representação complexa) e por  $X$  o módulo de  $X$ .

Para efeito de  $\bar{V}_n$ , «parcela» da harmónica da tensão na ligação das duas redes associadas a  $\bar{I}_n$ , interessa o conjunto das «impedâncias» das redes 1 e 2. Sejam então

$$A = A_1 + A_2$$

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad ,$$

e considere-se o esquema da fig. 4.

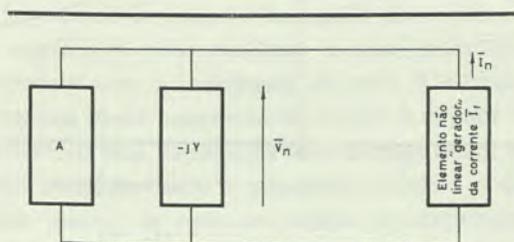


Fig. 4

Ter-se-á, em representação complexa, uma relação entre  $\bar{I}_n$  e  $\bar{V}_n$  dada por

$$\bar{V}_n = \frac{\bar{I}_n}{A - jY} \quad ,$$

a que corresponde a fig. 5.

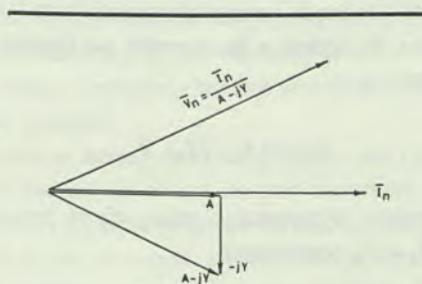


Fig. 5

Suponhamos agora que, em paralelo com a impedância da rede 1, se monta uma capacidade de admitância  $jS$  (fig. 6).

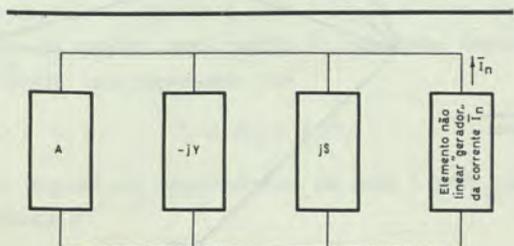


Fig. 6

Ter-se-á uma relação entre  $\bar{I}_n$  e  $\bar{V}_n$  dada por

$$\bar{V}_n = \frac{\bar{I}_n}{A - j(Y - S)} \quad ,$$

a que corresponde a fig. 7.

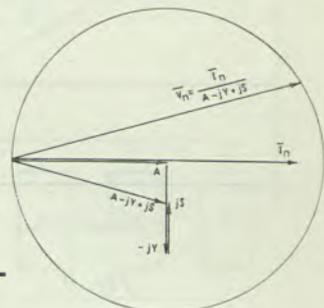


Fig. 7

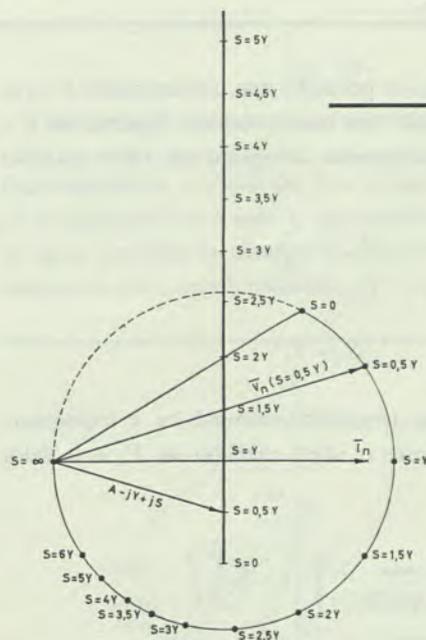


Fig. 8

Suponhamos que se varia  $S$  desde zero a infinito. O afixo de  $A - jY + jS$  desloca-se ao longo de uma semi-recta paralela ao eixo imaginário e o afixo de  $\bar{V}_n$  desloca-se ao longo de uma circunferência de centro no eixo real, que passa pelo ponto  $(0,0)$  e tem o diâmetro  $D = \bar{I}_n/A$  (fig. 8).

Na fig. 9 representa-se a função

$$V_n = f(S)$$

obtida a partir da fig. 8 (correspondente a  $Y/A = 0,625$ ). Esta curva tem um máximo para

$$S = Y \quad .$$

Sendo  $S$  positivo (correspondente a um condensador), este máximo só se verifica, naturalmente, se  $Y$  for positivo (indutivo).

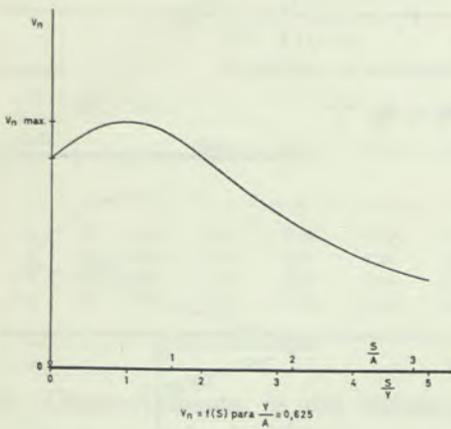


Fig. 9

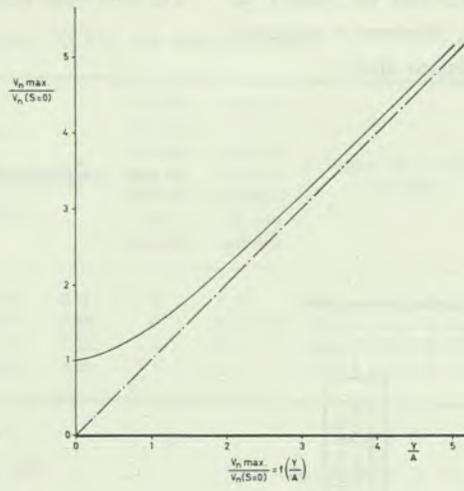


Fig. 10

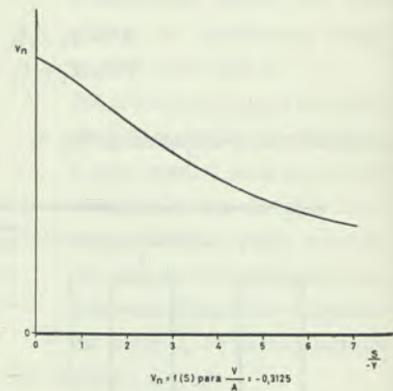


Fig. 11

Sendo  $Y$  positivo tem-se portanto que, aumentando  $S$  (proporcional à capacidade dos condensadores ligados) de 0 a  $\infty$ ,  $V_n$  aumenta primeiramente, atingindo um valor máximo

$$V_n = \frac{I_n}{A}$$

para

$$S = Y,$$

e diminuindo depois, tendendo assintótica e lentamente para 0. A relação entre o valor máximo de  $V_n$  e o valor para  $S = 0$  é

$$\frac{V_n \text{ max}}{V_n(S=0)} = \sqrt{1 + \left(\frac{Y}{A}\right)^2}$$

O «aumento» máximo de  $V_n$  por variação de  $S$  é portanto tanto maior quanto maior a relação  $Y/A$ .

Na fig. 10 representa-se a relação

$$\frac{V_n \text{ max}}{V_n(S=0)} = f\left(\frac{Y}{A}\right).$$

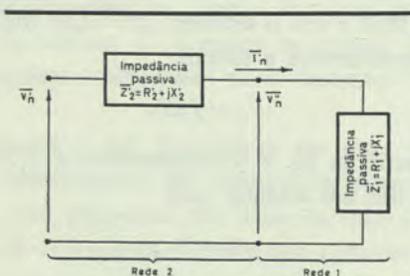


Fig. 12

Esta curva tem como assíntota para  $Y/A \rightarrow \infty$  a recta de equação

$$\frac{V_n \text{ max}}{V_n(S=0)} = \frac{Y}{A},$$

isto é, para valores elevados de  $Y/A$  a tensão  $V_n$  máxima é aproximadamente  $Y/A$  vezes superior à tensão para  $S = 0$  (ausência de capacidade).

Sendo  $Y$  negativo, e variando  $S$  de 0 a  $\infty$ ,  $V_n$  decresce regularmente, tendendo assintoticamente para 0 (fig. 11).

A harmónica de ordem  $n$  da corrente na ligação das redes 1 e 2 é dada por

$$\bar{I}'_n = (A_2 - jY_2) \bar{V}_n,$$

sendo, portanto, o respectivo valor eficaz proporcional a  $V_n$  (para  $A_2$  e  $Y_2$  constantes).

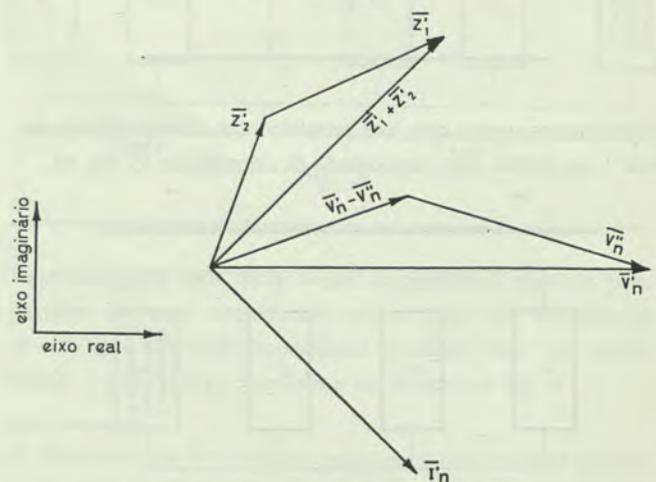


Fig. 13

Portanto, tem-se que, do ponto de vista das harmônicas «originadas» pela rede 1 que se acaba de considerar:

- Se  $Y$  for positivo, isto é, se a «impedância da rede» (conjunto de 1 e 2) for indutiva para efeitos da harmônica de ordem  $n$ , a ligação de uma capacidade em paralelo pode aumentar ou diminuir as harmônicas de ordem  $n$  da tensão e da corrente na ligação das redes 1 e 2 consoante o valor dessa capacidade. O aumento máximo da harmônica de ordem  $n$  da tensão dá-se para o valor da capacidade correspondente a uma ressonância da capacidade com a impedância da rede. A relação entre o máximo dessa harmônica da tensão e o valor correspondente a uma capacidade nula é tanto maior quanto maior a relação entre a admitância indutiva e a admitância ohmica da rede para efeitos da harmônica.
- Se  $Y$  for negativo, isto é, se a impedância da rede (conjunto de 1 e 2) for capacitiva para efeitos da harmônica de ordem  $n$ , a ligação de uma capacidade em paralelo diminui as harmônicas de ordem  $n$  da tensão e da corrente na ligação das duas redes.

### 2.3 — Harmônicas «originadas» pela rede 2

Consideremos agora as harmônicas «originadas» pela rede 2, de acordo com a decomposição mencionada na posição 2.1.

Destas harmônicas há a distinguir dois tipos de «origens». Para efeitos das harmônicas originadas por elementos não lineares (rectificadores p. e.) situados próximo da ligação das duas redes, o comportamento é semelhante ao analisado na posição anterior.

Consideremos as harmônicas «originadas» por elementos da rede 2 «afastados» da rede 1 ou por elementos «geradores de tensão» (p. ex., as harmônicas da f. e. m. dos geradores). Atendendo a que se supôs a rede 1 de potência reduzida em face de potência da rede 2, pode admitir-se, para efeitos de uma harmônica genérica  $n$ , com esta origem, o esquema «equivalente» representado na fig. 12.

Com efeito, sendo a rede 2 de potência «muito maior» que a rede 1, e para a «origem» que estamos a considerar da harmônica  $n$ , e dentro de certos limites, pode admitir-se em primeira aproximação que há uma harmônica de tensão  $\bar{V}_n$  num ponto afastado, pouco influenciada pelo que se passa na rede 1, estando a rede 1 ligada à zona da rede 2 em que se verifica essa tensão  $\bar{V}_n$  por uma determinada impedância, que represento por

$$Z'_2 = R'_2 + j X'_2 .$$

Seja a impedância «equivalente» da rede 1 para efeito da harmônica  $n$

$$\bar{Z}'_1 = R'_1 + j X'_1 .$$

A harmônica  $\bar{V}_n$  de ordem  $n$  da tensão na ligação das duas redes será

$$\bar{V}_n'' = \frac{\bar{Z}'_1}{Z'_1 + Z'_2} \cdot \bar{V}_n' = \frac{R'_1 + j X'_1}{(R'_1 + R'_2) + j (X'_1 + X'_2)} \cdot \bar{V}_n' .$$

A harmônica  $\bar{I}_n$  de ordem  $n$  da corrente na ligação das duas redes será

$$\bar{I}_n' = \frac{\bar{V}_n'}{Z'_1 + Z'_2} .$$

Na fig. 13 representam-se  $\bar{I}_n'$  e  $\bar{V}_n'$ .

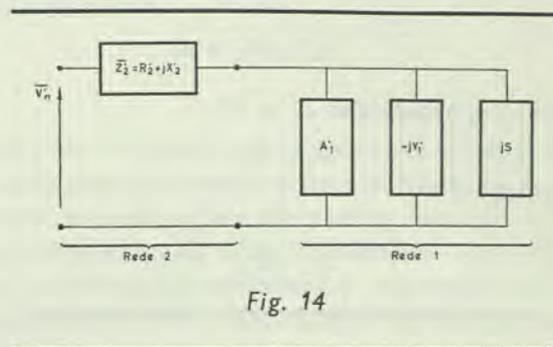


Fig. 14

Para considerar o efeito de uma capacidade de admitância  $jS$  em paralelo com a rede 1, representemos  $\bar{Z}'_1$  pelo paralelo de uma impedância ohmica de admitância  $A_1'$  e de uma reactância pura de admitância  $-jY_1'$  (fig. 14).

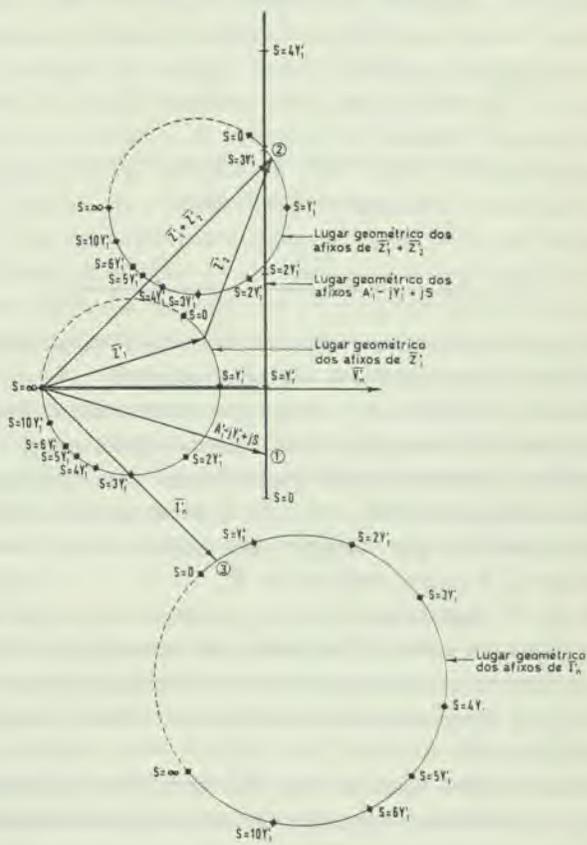


Fig. 15

Na fig. 15 representam-se os lugares geométricos dos afixos das seguintes grandezas, para  $S$  variando de 0 a  $\infty$  [para o caso de ser  $Y_1' = 0,5 A_1'$  e  $Z_2' = \frac{1}{A_1'} (0,38 + j1)$ ]:

— Admitância total da rede 1, igual a

$$A_1' - jY_1' + jS.$$

— Impedância total da rede 1,  $\bar{Z}_1'$  (incluindo a admitância  $jS$ )

$$\bar{Z}_1' = \frac{1}{A_1' - jY_1' + jS}.$$

— Soma das impedâncias  $\bar{Z}_1'$  e  $\bar{Z}_2'$

$$\bar{Z}_1' + \bar{Z}_2'.$$

— Corrente  $\bar{I}_n'$

$$\bar{I}_n' = \frac{1}{\bar{Z}_1' + \bar{Z}_2'} \cdot \bar{V}_n'.$$

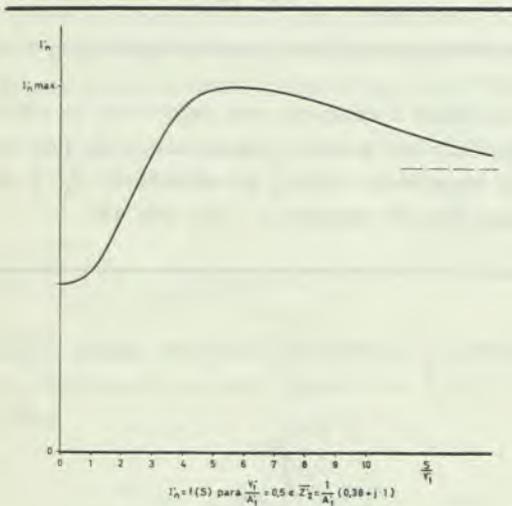


Fig. 16

Na fig. 16 representa-se esquemáticamente a relação entre  $S$  e  $I_n'$  correspondente ao diagrama anterior.

Variando  $S$  de 0 a  $\infty$ ,  $I_n'$  começa por ser crescente havendo uma zona de crescimento relativamente rápido, atinge um máximo e decresce depois gradualmente. Claro que para outros valores de  $Y_1'/A_1'$  e  $A_1' \cdot \bar{Z}_2'$  a forma da curva é diferente, podendo, por exemplo, não existir a zona inicial em que  $I_n'$  é função crescente de  $S$ .

Na fig. 17 representa-se o lugar geométrico da origem do «vector» associado a  $\bar{V}_n''$  suposta a sua extremidade «fixa», para os valores dos diferentes parâmetros atrás considerados.

Na fig. 18 representa-se esquemáticamente a lei de variação de  $\bar{V}_n''$  com  $S$ .

Portanto, sob o ponto de vista das harmónicas originadas por geradores do tipo «gerador de tensão» ou por elementos não lineares da rede 2 afastados da rede 1 tem-se que, variando  $S$  de 0 a  $\infty$ , isto é, variando a capacidade de um condensador em paralelo de 0 a  $\infty$ :

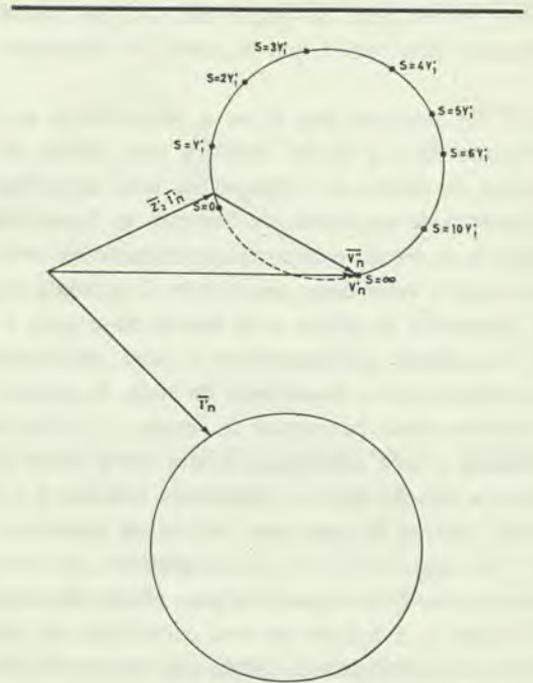


Fig. 17

— Uma harmónica genérica da corrente na ligação das duas redes tem uma variação dependente da proporção dos diversos parâmetros em jogo, sendo uma variação típica a indicada na fig. 16. Nesse caso nota-se um aumento inicial relativamente rápido da corrente referida, seguido de uma diminuição relativamente lenta, tendendo a corrente para um valor finito não nulo.

— Uma harmónica genérica de tensão na zona ligação das duas redes tem uma variação dependente da proporção dos diversos parâmetros em jogo, tendo, no entanto, em

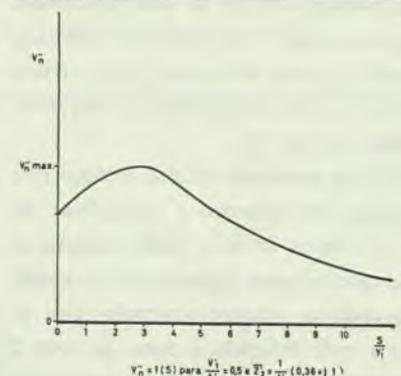


Fig. 18

geral, um andamento diferente do da harmónica da mesma ordem da corrente mencionada. Um caso típico desta lei de variação é a indicada na fig. 18. Nesse caso nota-se um aumento inicial da corrente seguido de uma diminuição com tendência assintótica para 0.

(Continua)

CARLOS PORTELA  
Engenheiro Electrotécnico (I.S.T.)

LABORATÓRIO ELECTROTÉCNICO  
DA COMPANHIA NACIONAL DE ELECTRICIDAD