

# INFLUÊNCIA DAS PERTURBAÇÕES DE POTÊNCIA ACTIVA NO COMPORTAMENTO DA REDE ELÉCTRICA NACIONAL

## AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE REGULAÇÃO

### 1— Introdução.

O desenvolvimento verificado nestes últimos anos na Rede Eléctrica Nacional, tornou necessário o estudo de um sistema de regulação automática, não só motivado pela futura interligação com Espanha mas também para a regulação de frequência da nossa rede isolada.

No âmbito dos estudos feitos considerou-se necessário fazer um ensaio, embora sumário, do comportamento da rede sob a influência de perturbações de potência activa, bem como a avaliação do coeficiente de regulação (énergie réglante).

Para execução destes ensaios e a fim de se poder colher o maior número possível de informações, pediu-se à ELECTRICITE DE FRANCE a sua colaboração e experiência, bem como o empréstimo da aparelhagem de medida necessária de que, de momento, não dispúnhamos.

A ELECTRICITE DE FRANCE, com a sua amabilidade característica, pôs à nossa disposição o Eng.<sup>o</sup> ANDRÉ CHEVALIER e o seu colaborador Eng.<sup>o</sup> HOLLEVILLE, que organizaram o programa de ensaios e se deslocaram ao nosso país a fim de orientarem a sua execução.

Tratando-se de um primeiro ensaio da rede, em que intervinham algumas das empresas concessionárias, havia que proceder a uma organização prévia, de molde a permitir a sua fácil e correcta execução. Cabe-me aqui agradecer ao Repartidor Nacional de Cargas, que tomou a seu cargo o estudo e comando de todas as manobras da rede necessárias ao ensaio, bem como aos Serviços de Exploração da Companhia Nacional de Electricidade e das restantes Empresas afectadas que, numa colaboração e compreensão perfeitas, permitiram realizar com elegância e rapidez, todo o programa previsto.

Uma vez terminados os ensaios foram estes discutidos, tendo os Eng.<sup>os</sup> Chevalier e Holleville, com a sua grande experiência sobre estes assuntos, feito uma análise pormenorizada dos resultados.

Os cálculos e gráficos necessários a este relatório foram executados pelo Eng.<sup>o</sup> CARLOS PORTELA do Centro de Cálculo do nosso Laboratório.

### 2— Descrição dos ensaios efectuados.

Os ensaios efectuados em Maio de 1960 consistiram essencialmente em provocar na rede, em funcionamento normal, variações bruscas de potência activa, e registar em função do tempo a curva de frequência após a perturbação.

Do ponto de vista de teleregulação, as grandezas das variações de potência que interessam, são aquelas que ocorrem normalmente na exploração, isto é, variações normais do diagrama de cargas e variações provocadas por acidentes de exploração. Desta forma foram executados vários ensaios com variações bruscas de potência de 10 MW a 100 MW.

Para obter as perturbações de potência recorreu-se ao corte de grupos, ou mesmo centrais, à ligação e corte de uma resistência líquida, e ao corte das linhas de interligação entre a Zona Norte e a Zona Sul (linhas Zêzere-Pereiros). Fizeram-se também alguns ensaios das duas redes separadas. O esquema geral da rede encontra-se representado na fig. 1.

#### *Ensaio com a rede total*

Potência total referida às barras das centrais (MW) .....	365 a 470
Potência total nominal dos grupos após a perturbação (MW).....	570 a 840

#### *Ensaio com as redes Norte e Sul separadas*

##### *Rede Norte*

Potência total referida às barras das centrais (MW) .....	240 a 245
Potência total nominal após a perturbação (MW).....	500 a 520

##### *Rede Sul*

Potência total referida às barras das centrais (MW) .....	200 a 210
Potência total nominal após a perturbação (MW).....	240 a 245

Convém chamar a atenção para o facto de no ensaio realizado se dispôr apenas de centrais hidráulicas.

QUADRO I

N.º de Ensaio	Data	Hora	Potência activa total da rede recitada às barras das centrais (MW)	Soma das potências nos minúsculos dos grupos após a perturbação (MW)	Variação da potência objecto da perturbação (MW)	Tempo correspondente ao desvio máximo da frequência (em segundos)	Desvio máximo de frequência	Desvio de frequência após 15 segundos	Desvio de frequência após 25 segundos	Desvio de frequência após 60 segundos	K	Valor correspondente ao desvio máximo (MW/Hz)	K	Valor correspondente ao desvio após 15 segundos (MW/Hz)	K	Valor correspondente ao desvio após 25 segundos (MW/Hz)	K	Valor correspondente ao desvio após 60 segundos (MW/Hz)	Valor correspondente ao desvio máximo (%)	Valor correspondente ao desvio após 15 segundos (%)	Valor correspondente ao desvio após 25 segundos (%)	Valor correspondente ao desvio após 60 segundos (%)	Observações
1	23/5/60	15 h 17 m	422	661	-25	4,3	0,42	0,055	0,00	—	—	50	(454)	—	—	—	—	—	—	(1000)	—	—	(*)
2	23/5/60	15 h 20 m	422	661	+25	4,3	0,51	0,13	0,08	-0,025	49	(192)	(312)	(1000)	—	—	—	—	—	—	—	—	(*)
3	23/5/60	15 h 28 m	422	661	-25	4,0	0,355	0,11	-0,044	—	70	(227)	(508)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(*)
4	23/5/60	15 h 42 m	422	661	+40	3,4	0,614	0,06	-0,138	-0,12	65	(607)	(289)	(838)	—	—	—	—	—	—	—	—	(*)
5	23/5/60	16 h 42 m	380	715	-30	3,8	0,43	0,175	0,15	0,10	70	(171)	(200)	(300)	—	—	—	—	—	—	—	—	(*)
6	23/5/60	17 h 18 m	370	715	-30	4,0	0,585	0,29	0,23	0,12	56	104	130	250	25,58	18,75	11,00	5,72	25,58	18,75	11,00	5,72	
7	23/5/60	18 h 0 m	390	660	-30	3,6	0,52	0,205	0,17	0,08	58	140	176	375	22,76	9,04	7,50	3,52	22,76	9,04	7,50	3,52	
8	23/5/60	18 h 6 m	380	660	-30	3,7	0,565	0,345	0,285	0,125	53	87	105	240	24,90	15,17	12,57	5,50	24,90	15,17	12,57	5,50	
9	23/5/60	18 h 13 m	390	660	-30	4,2	0,41	0,21	0,09	0,12	73	143	333	250	18,08	9,23	3,06	5,28	18,08	9,23	3,06	5,28	
10	23/5/60	18 h 31 m	360	660	-30	5,1	0,61	0,41	0,295	0,165	49	73	102	182	26,94	18,08	12,94	7,25	26,94	18,08	12,94	7,25	
11	23/5/60	18 h 50 m	355	660	-25	4,8	0,39	0,255	0,185	0,125	77	118	171	177	17,14	11,19	8,15	5,50	17,14	11,19	8,15	5,50	
12	23/5/60	18 h 56 m	355	660	+30	4,5	0,50	0,21	0,16	0,17	90	143	188	177	22,00	9,23	7,02	7,46	22,00	9,23	7,02	7,46	
13	23/5/60	19 h 7 m	355	660	-10	4,9	0,29	0,14	0,13	0,01	50	72	78	1000	16,34	10,92	1,32	1,32	16,34	10,92	1,32	1,32	(*)
14	23/5/60	19 h 17 m	354	635	-10	4,0	0,25	0,20	0,08	0,125	50	125	80	333	31,75	25,40	10,16	15,87	31,75	25,40	10,16	15,87	(*)
15	24/5/60	8 h 56 m	440	700	-20	5,2	0,28	0,20	0,17	0,08	72	100	118	333	19,44	14,00	11,86	4,20	19,44	14,00	11,86	4,20	
16	24/5/60	9 h 11 m	440	700	-20	6,0	0,318	0,118	0,10	0,048	62	170	200	420	92,58	8,24	7,00	3,33	92,58	8,24	7,00	3,33	
17A	24/5/60	9 h 57 m	200 <sup>(1)</sup>	280	-20	2,6	0,495	0,215	0,145	0,11	40	93	138	182	14,00	0,02	4,06	3,08	14,00	0,02	4,06	3,08	
17B	24/5/60	9 h 57 m	240 <sup>(2)</sup>	500	+20	3,9	0,49	0,21	0,17	0,11	41	95	118	182	24,39	10,53	8,47	5,49	24,39	10,53	8,47	5,49	
18A	24/5/60	10 h 10 m	200 <sup>(1)</sup>	260	-20	3,5	0,40	0,24	0,22	0,14	50	83	91	143	10,40	0,27	5,71	3,64	10,40	0,27	5,71	3,64	
18B	24/5/60	10 h 4 m	240 <sup>(2)</sup>	520	-20	4,8	0,63	0,10	-0,02	0,04	32	200	1000	500	32,50	5,20	1,04	2,08	32,50	5,20	1,04	2,08	
19A	24/5/60	10 h 32 m	210 <sup>(1)</sup>	280	+22	2,8	0,665	0,395	0,255	0,145	33	72	86	152	16,07	7,78	6,51	3,63	16,07	7,78	6,51	3,63	
19B	24/5/60	10 h 32 m	245 <sup>(2)</sup>	500	-22	5,0	0,71	0,17	0,05	0,09	31	120	440	244	32,26	7,75	2,27	4,10	32,26	7,75	2,27	4,10	
20A	24/5/60	10 h 38 m	210 <sup>(1)</sup>	260	-20	2,6	0,45	0,175	0,065	0,085	45	114	308	235	11,56	4,56	1,69	2,21	11,56	4,56	1,69	2,21	
20B	24/5/60	10 h 43 m	245 <sup>(2)</sup>	520	-20	5,5	0,62	0,09	0,05	0,13	32	222	400	154	32,50	4,08	2,60	0,75	32,50	4,08	2,60	0,75	
21	24/5/60	11 h 33 m	470	840	-40	4,8	0,56	0,23	0,20	0,12	72	174	200	333	23,33	9,65	8,40	5,04	23,33	9,65	8,40	5,04	
22	24/5/60	11 h 45 m	470	840	-40	5,4	0,54	0,19	0,17	0,10	74	211	295	400	22,70	7,06	7,14	4,20	22,70	7,06	7,14	4,20	
23	24/5/60	12 h 28 m	380	790	-40	3,4	0,53	0,045	0,075	0,025	75	889	533	1600	21,33	1,79	3,00	1,00	21,33	1,79	3,00	1,00	
24	24/5/60	12 h 43 m	380	790	-40	4,8	0,65	0,28	0,20	0,18	62	143	200	222	24,83	10,76	7,70	6,94	24,83	10,76	7,70	6,94	
25	24/5/60	16 h 31 m	415	700	-40	4,5	0,59	0,215	0,15	0,12	68	186	267	333	20,59	7,53	5,24	4,20	20,59	7,53	5,24	4,20	
26	24/5/60	16 h 46 m	420	700	-40	5,3	0,64	0,30	0,19	0,11	63	133	211	394	22,22	10,53	6,64	3,85	22,22	10,53	6,64	3,85	
27	24/5/60	18 h 0 m	370	620	-60	3,5	0,89	0,36	0,27	0,30	61	107	222	200	20,33	7,43	5,30	6,20	20,33	7,43	5,30	6,20	
28	24/5/60	18 h 23 m	365	620	-80	3,3	1,14	0,39	0,34	0,34	71	205	236	286	17,46	6,05	5,25	5,25	17,46	6,05	5,25	5,25	
29	24/5/60	18 h 50 m	365	570	-100	3,4	1,64	0,53	0,41	0,39	61	189	244	267	18,08	6,03	4,07	4,44	18,08	6,03	4,07	4,44	
30	24/5/60	19 h 5 m	365	570	-40	3,8	0,68	0,195	0,175	0,15	59	205	229	287	19,32	5,36	4,98	4,27	19,32	5,36	4,98	4,27	
31	24/5/60	19 h 18 m	365	570	-40	3,3	0,615	0,195	0,185	0,175	65	205	216	229	17,54	5,50	5,28	4,98	17,54	5,50	5,28	4,98	
32	24/5/60	21 h 32 m	390	570	-40	3,8	0,41	0,16	0,11	0,07	98	250	364	586	11,63	4,56	3,13	1,95	11,63	4,56	3,13	1,95	
33	24/5/60	21 h 43 m	370	570	-40	3,7	0,58	0,16	0,15	0,15	69	250	267	1000	16,52	4,56	4,27	1,14	16,52	4,56	4,27	1,14	

1) Rede Sul (a Sul de Pereiros); 2) Rede Norte (a Norte de Pereiros, e abrangendo Pereiros); 3) Houve regulação manual de grupos; 4) Potência de perturbação muito reduzida.

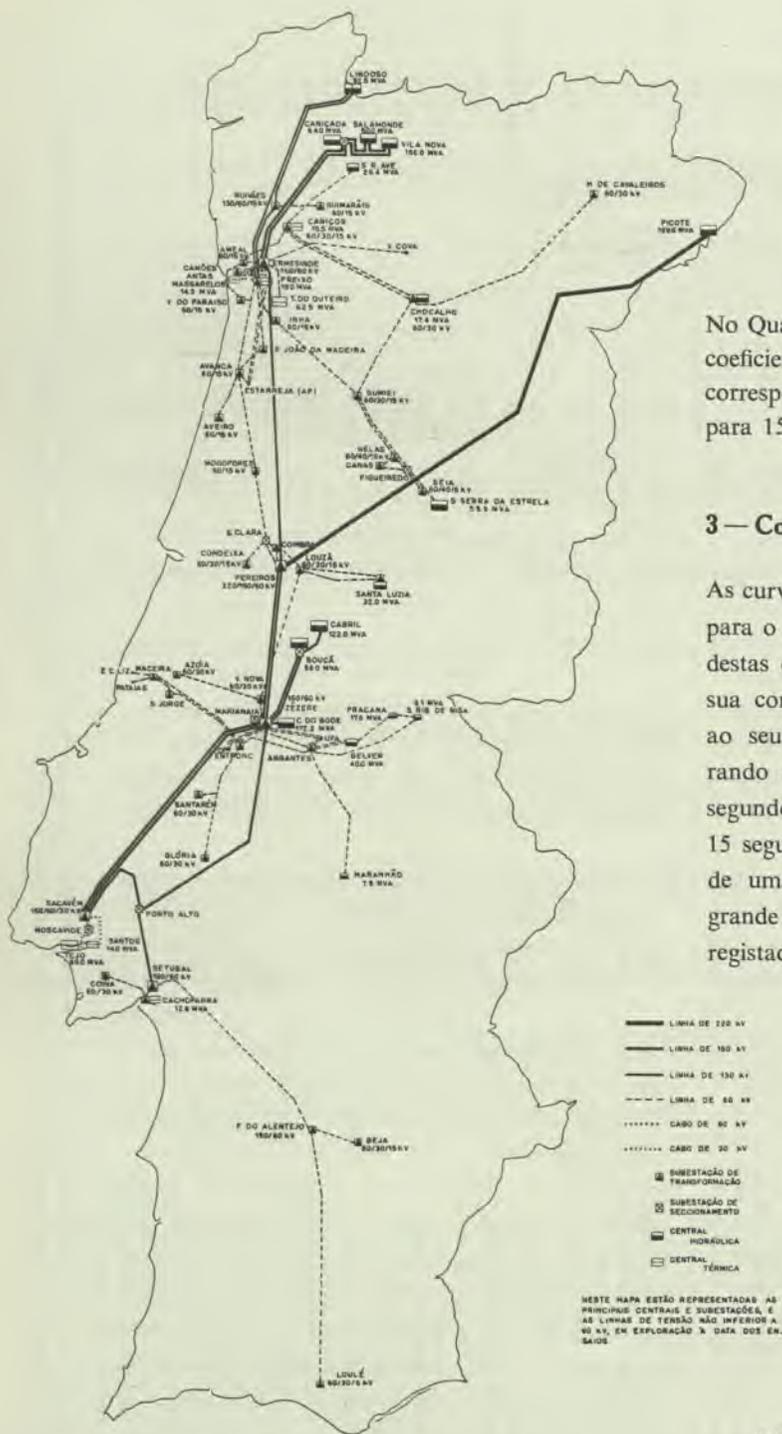


Fig. 1 — Rede eléctrica portuguesa

Quando se deu início aos ensaios, o operador de uma das centrais que não tinha sido perfeitamente esclarecido, procedeu à regulação manual dos seus grupos. Este facto verificou-se nos primeiros cinco ensaios pelo que se consideraram apenas nestes casos os valores dentro dos primeiros 6 segundos. Nos restantes ensaios a regulação foi levada a efeito exclusivamente pelos reguladores respectivos. O valor do estatismo, se bem que tenha variado, pode considerar-se dentro dos limites normais.

Nas figs. 2 a 9 estão representadas as curvas de variação de frequência relativas a todos os ensaios. Nestes desenhos considerou-se como positivo o sentido inicial da variação e agruparam-se as curvas consoante o valor da perturbação a fim de permitirem uma mais fácil comparação. Exceptua-se a fig. 7 em que estão representadas apenas três curvas relativas aos ensaios de grande potência.

No Quadro I estão reunidos todos os ensaios bem como os coeficientes de regulação (énergie réglante) para o instante correspondente ao afastamento máximo de frequência e para 15 s, 25 s e 60 s.

### 3 — Conclusões dos ensaios.

As curvas das figs. 2 a 9 apresentam um andamento normal para o caso de centrais hidráulicas. Do exame de conjunto destas curvas conclui-se que na maior parte dos ensaios a sua concordância é razoável no momento correspondente ao seu máximo, francamente má a 15 segundos, melhorando aos 25 segundos e sendo francamente boa aos 60 segundos. A grande dispersão valores que se nota entre os 15 segundos e 25 segundos, parece ser devida à presença de uma oscilação amortecida da frequência, visível em grande número dos registos. No Quadro I encontram-se registados os valores correspondentes ao afastamento máximo de frequência, que teve lugar ao fim de 3 segundos a 6 segundos após a perturbação, bem como os afastamentos correspondentes a 15 segundos, 25 segundos e 60 segundos, valores estes escolhidos um tanto arbitrariamente. Os coeficientes de regulação (énergie réglante), correspondentes, apresentam variações bastante grandes. Para maior facilidade de apreciação os valores máximos e mínimos obtidos estão indicados no Quadro II.

QUADRO II

VALORES LIMITES DO COEFICIENTE DE REGULAÇÃO  $K$

Valores limites de $K$ (MV/Hz)	Correspondente ao afastamento máximo de frequência (3 a 6) s	Tempos de referência		
		15 segundos	25 segundos	60 segundos
Mínimos	49 (40) <sup>(1)</sup>	73 (50) <sup>(1)</sup>	102 (78) <sup>(1)</sup>	177 (80) <sup>(1)</sup>
Máximos	98	889	533	1600

(1) Os valores entre parêntesis são relativos a uma variação de potência de apenas 10 MW, valor este muito reduzido em face das perturbações aleatórias da rede.

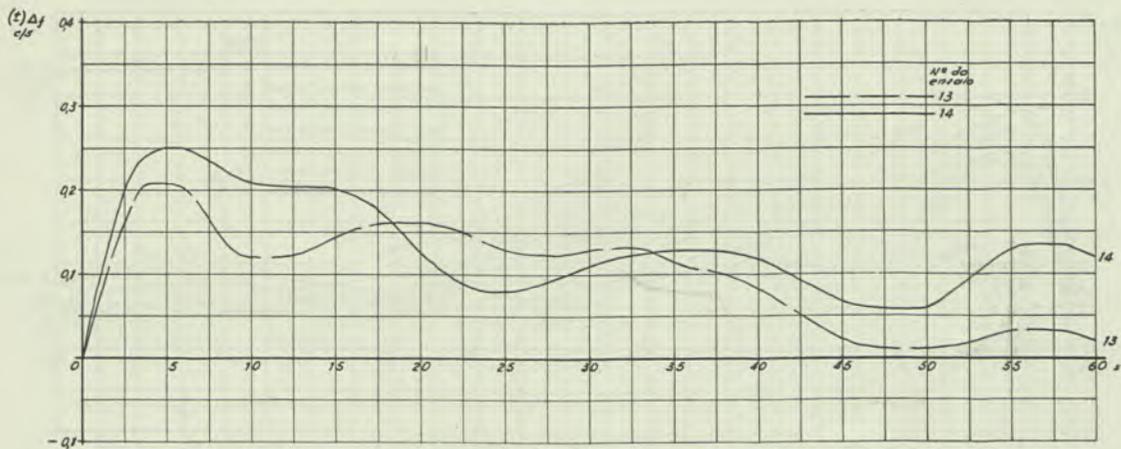


Fig. 2 — Conjunto da rede — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 10 MW

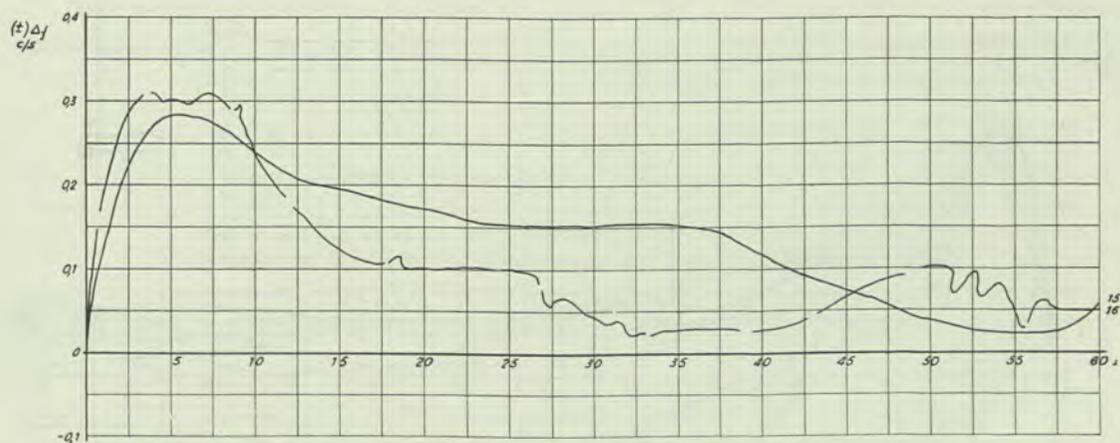


Fig. 3 — Conjunto da rede — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 20 MW

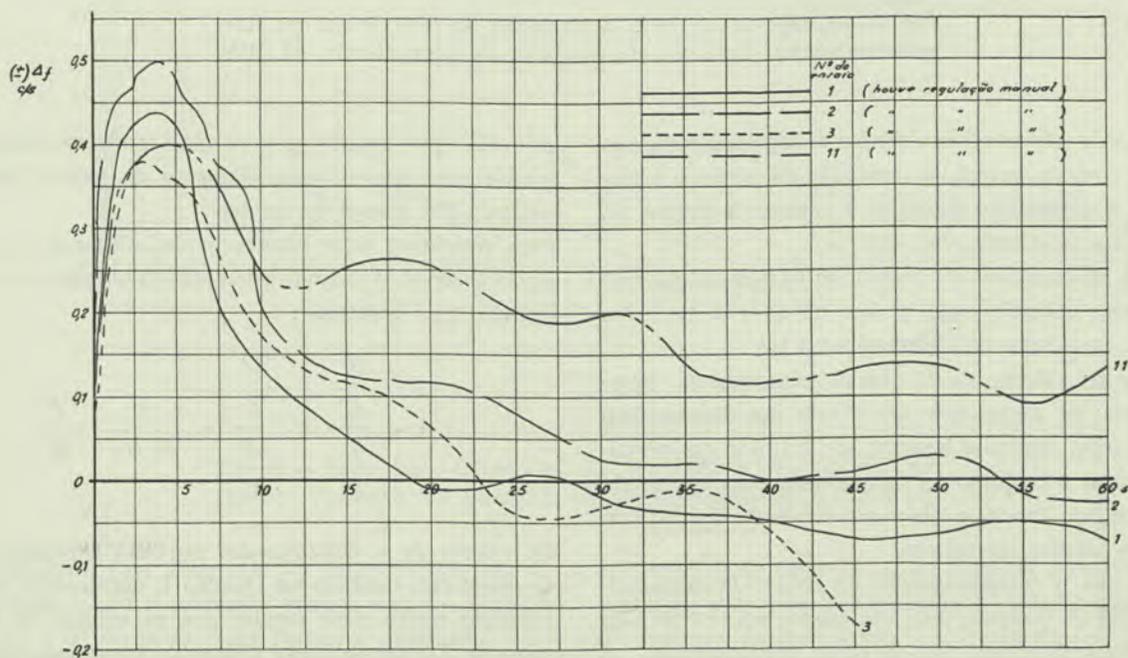


Fig. 4 — Conjunto da rede — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 25 MW

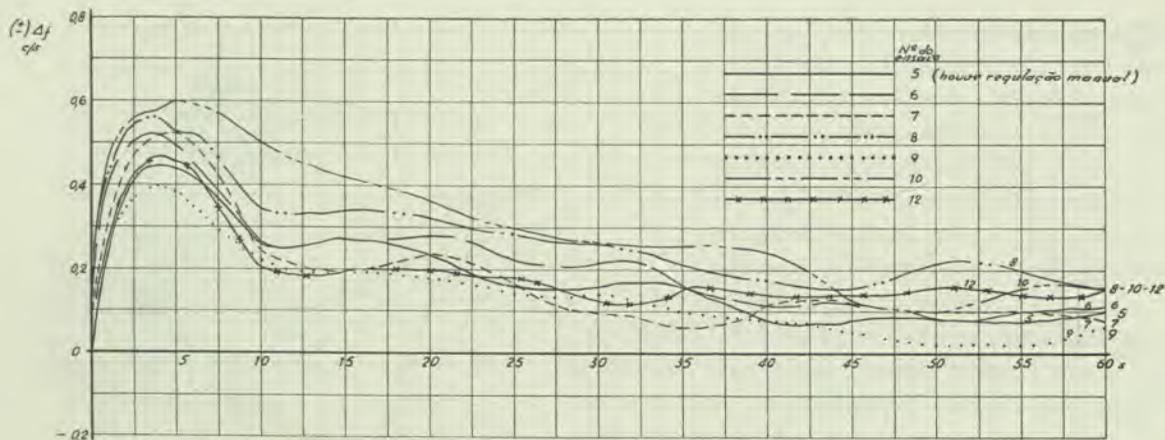


Fig. 5 — Conjunto da rede — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 30 MW

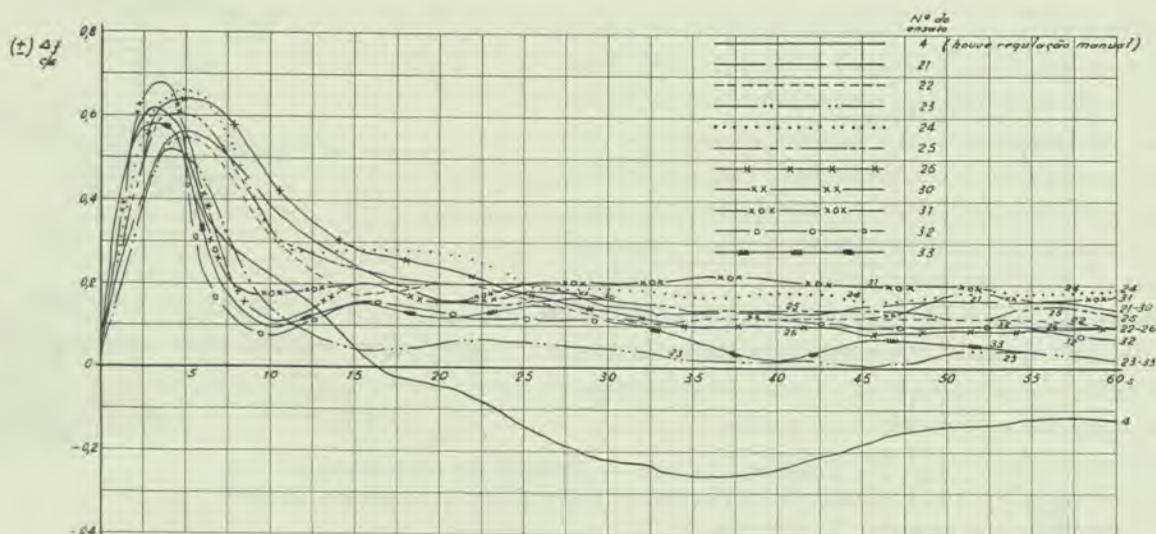


Fig. 6 — Conjunto da rede — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 40 MW

A dispersão de valores obtidos resulta de inúmeras variações aleatórias, como a variação e repartição da potência activa e reactiva, a composição de carga, o número de grupos em serviço e seus estatismos, etc., etc.

Na fig. 10 apresenta-se um registo de frequência da rede em condições normais onde podem observar-se variações rápidas de frequência da ordem dos 0,1 Hz.

Desde que os valores de  $K$  obtidos directamente, apresentam uma tal disparidade em virtude dos diversos factores aleatórios, tentou-se arranjar um artifício que permitisse evidenciar o conjunto dos factores essenciais, agregando os restantes, de forma a obter um resultado significativo dos valores médios estatísticos.

Como se sabe o comportamento da rede é fundamentalmente função da potência total dos grupos em serviço e da potência total da carga, isto à parte, evidentemente, as restantes variáveis aleatórias. Como porém as potências totais dos grupos e da carga podem ser consideradas em

primeira aproximação proporcionais, podemos admitir, sem grande erro, que o comportamento da rede é função da potência dos grupos em serviço.

Para relacionar estes valores, pode utilizar-se o conceito de elasticidade. Aplicando este conceito obtemos um valor  $\varepsilon$ , definido pela expressão:

$$\varepsilon = \frac{\frac{df}{dP}}{\frac{f}{P}} \approx \frac{\frac{\Delta f}{\Delta P}}{\frac{f}{P}} \approx \frac{1}{50 \text{ Hz}} \cdot \frac{P}{K}$$

Os valores de  $\varepsilon$ , determinados por esta expressão, e que se encontram também no Quadro I, apresentam uma distribuição muito mais regular que os valores de  $K$ . Este valor de  $\varepsilon$  é normalmente conhecido como estatismo aparente, ou melhor, estatismo resultante da rede.

No Quadro III vão indicados os valores médios de  $\varepsilon$  expressos

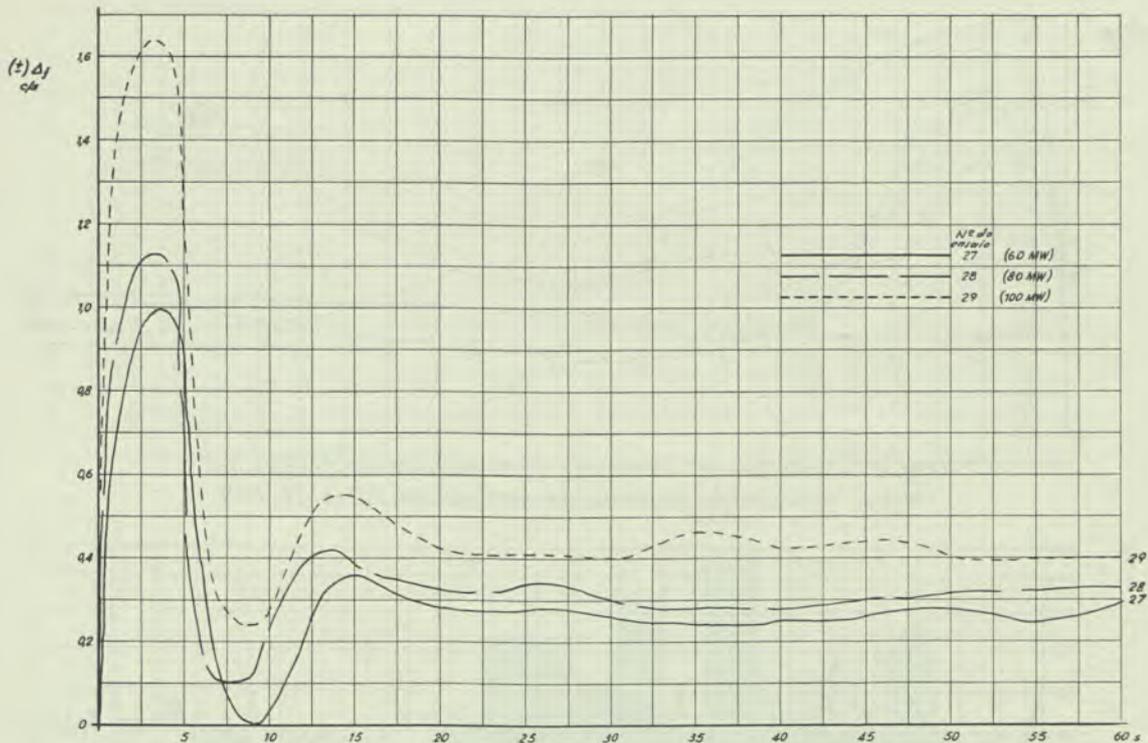


Fig. 7 — Conjunto da rede — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 60/80/100 MW

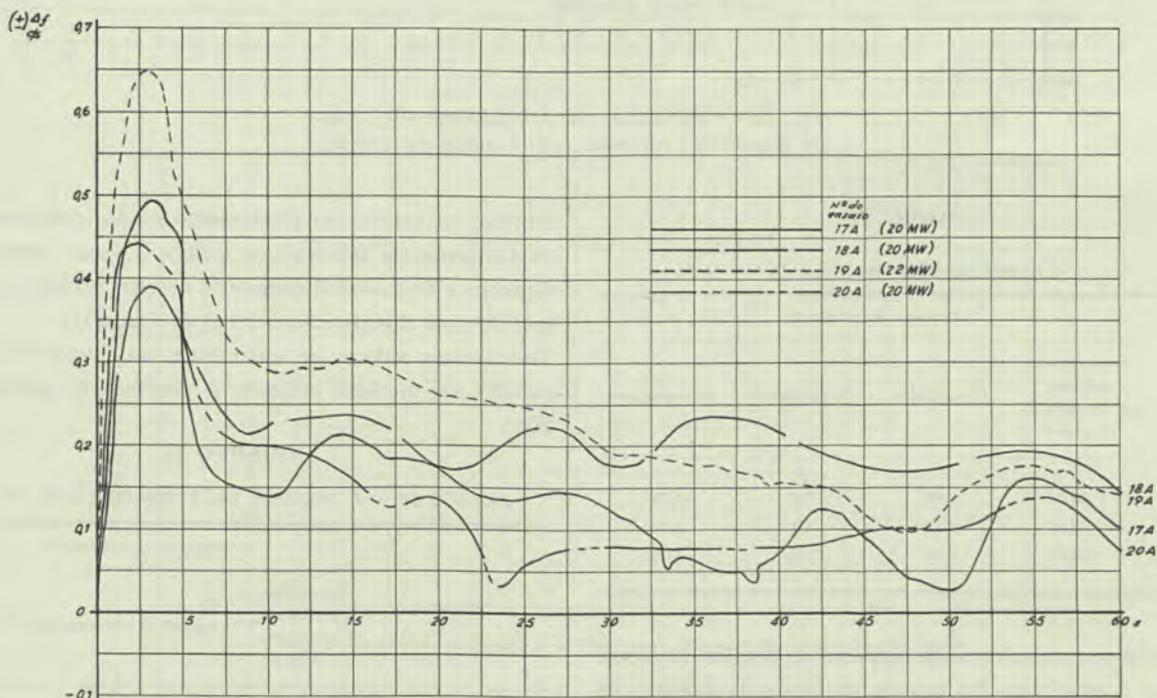


Fig. 8 — Rede Sul — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 20 e 22 MW

em porcentagem. Para determinação destes valores não se consideraram os cinco primeiros ensaios para os instantes de 15, 25 e 60 segundos pelas razões já apontadas, bem como os ensaios 13 e 14 em virtude da pequena potência de perturbação.

É interessante verificar que os valores médios relativos

ao tempo de 60 segundos, (com exceção do relativo à rede norte), se encontram compreendidos entre os valores limites de estatismo de cada grupo (4 a 5%) o que prova a participação quase total dos reguladores no seu conjunto. Este resultado confirma as precauções tomadas durante o período de ensaios de uma margem de potência folgada.

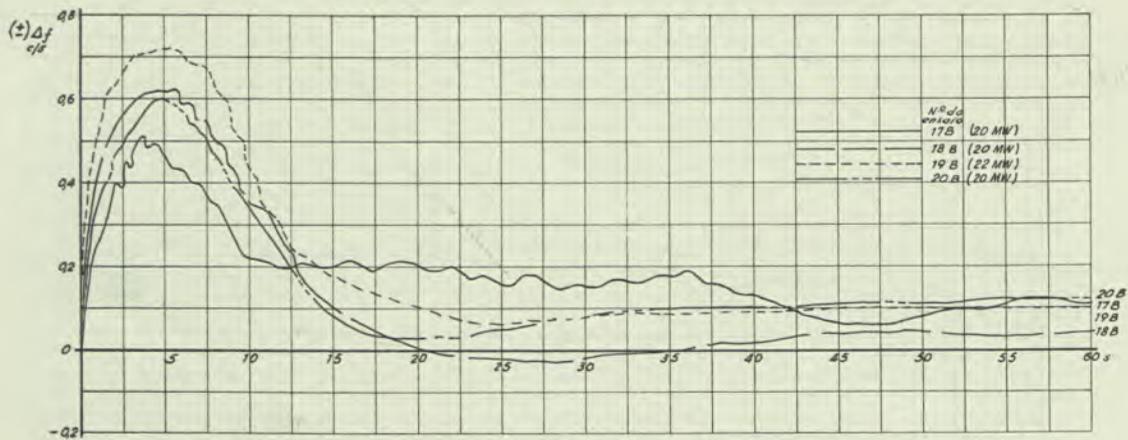


Fig. 9 — Rede Norte — Variação da frequência em função do tempo. Variação da potência de perturbação 20 e 22 MW

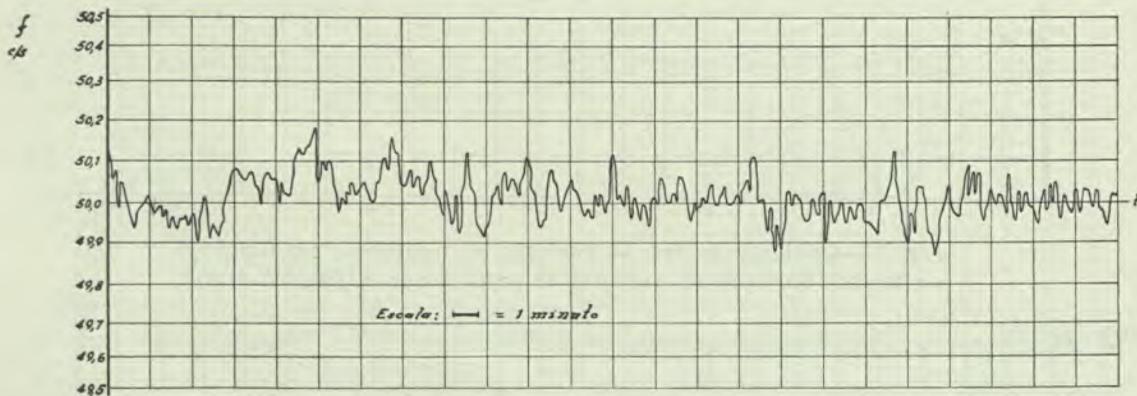


Fig. 10 — Variação da frequência da rede em condições normais, em função do tempo

### QUADRO III

#### VALORES MÉDIOS DE $\epsilon$ EM %

Rede	Afastamento máximo da frequência (3 a 6) s	Tempos de referência		
		15 segundos	25 segundos	30 segundos
Total	20,72	8,90	6,97	4,75
Norte	13,23	6,16	4,49	3,15
Sul	30,41	7,04	3,60	4,60

Dado o número relativamente pequeno de ensaios, interessa averiguar a coerência dos valores obtidos sob o ponto de vista estatístico. Desta forma determinaram-se os valores médios  $\Delta$  dos módulos do afastamento  $\epsilon$ .

$$\Delta = \frac{\sum_i |\epsilon_i - \bar{\epsilon}|}{n}$$

em que  $\epsilon_i$  representa o valor do afastamento de frequência,  $\bar{\epsilon}$  o valor médio de  $\epsilon_i$  e  $n$  o número de valores de  $\epsilon_i$  que figuram no somatório do numerador.

Obtidos os valores do afastamento médio determinaram-se os afastamentos quadráticos médios  $\mu$ , bem como o afastamento  $r$  de probabilidade 50% não ser excedido na hipótese de uma distribuição normal de Gauss<sup>(1)</sup>.

Todos estes valores se encontram no Quadro IV. Neste quadro vai também indicado o domínio de probabilidade 50%.

### QUADRO IV

#### DESVIOS DE $\epsilon$ E DOMÍNIO DA PROBABILIDADE DE 50%

Desvios	Afastamento máximo de frequência (3 a 6) s	Tempos de referência		
		15 segundos	25 segundos	60 segundos
Afastamento médio $\Delta$	2,84	2,97	2,24	1,34
Afastamento quadrático médio $\mu$	3,56	3,72	2,81	1,68
Afastamento provável 50% $r$	2,40	2,51	1,89	1,13
Domínio da probabilidade 50%	18,32 a 23,12	6,39 a 11,41	5,08 a 8,86	3,62 a 5,88

$$(1) \mu = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \Delta ; r = 0,674 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \Delta$$

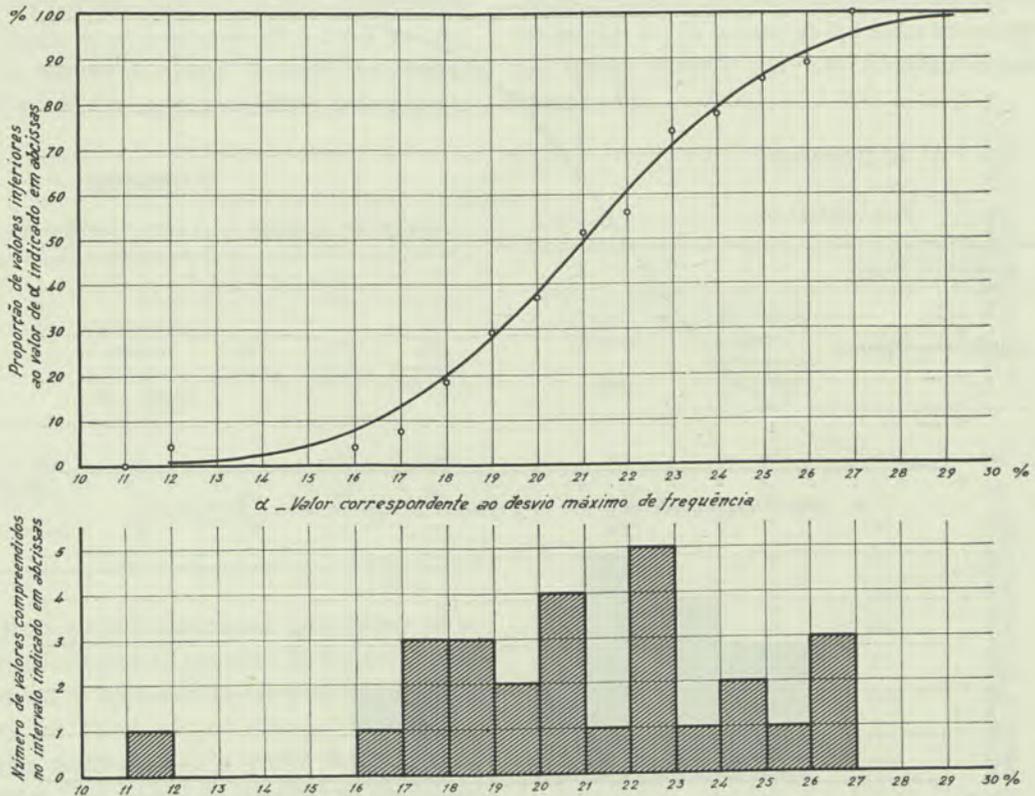


Fig. 11

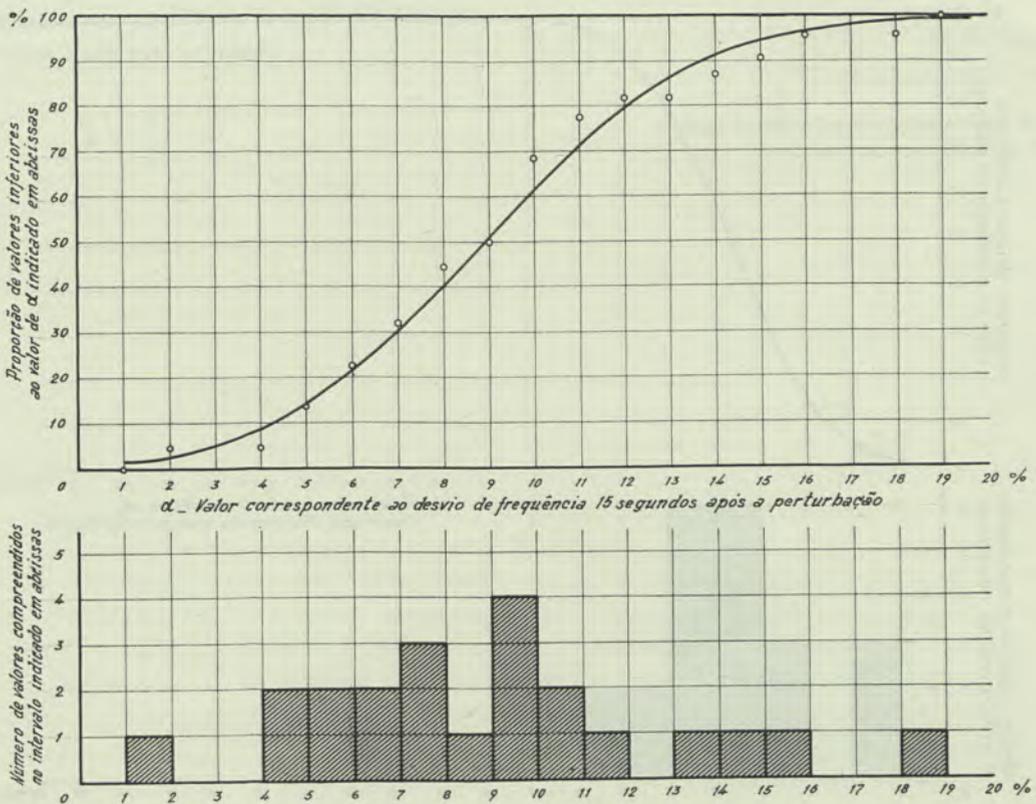


Fig. 12

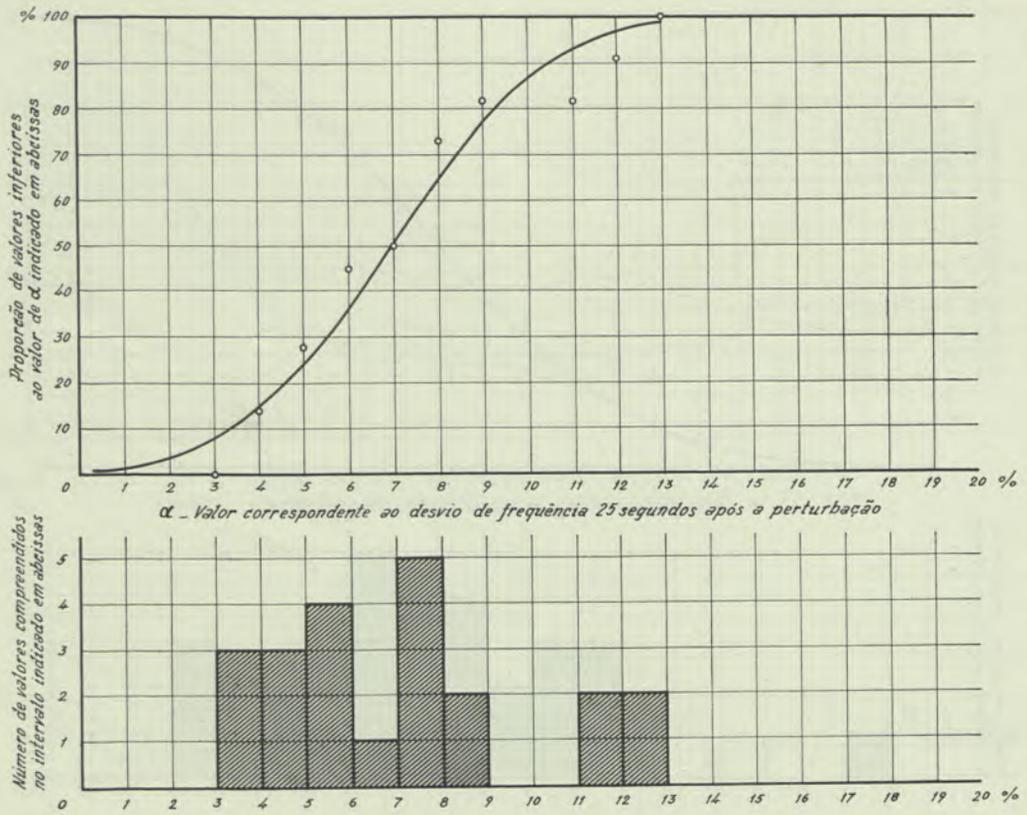


Fig. 13

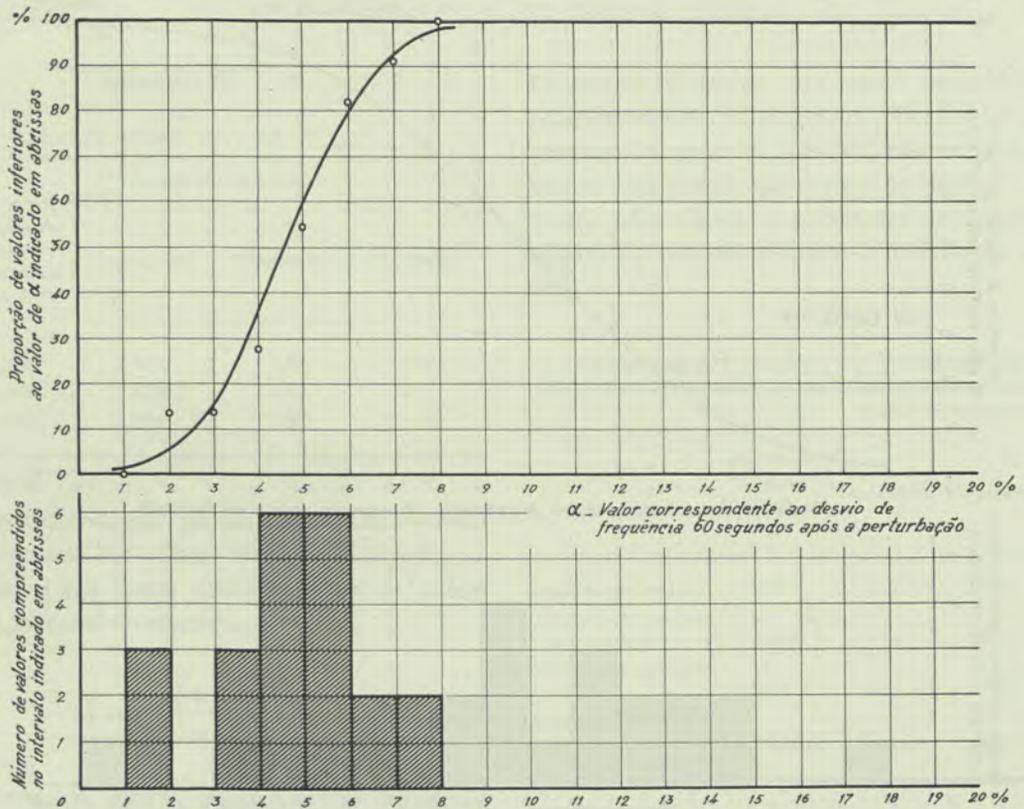


Fig. 14

Seguidamente determinaram-se os valores que se encontram dentro e fora do limite de probabilidade 50%. Estes valores, numa distribuição normal de Gauss, deveriam ser respectivamente de 50% e 25%. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro V.

**QUADRO V**

DISTRIBUIÇÃO EM PERCENTAGEM DOS VALORES DE ENSAIO

Distribuição de valores	Tempo de referência			
	Afastamento máximo de frequência (3 a 6) s	15 segundos	25 segundos	60 segundos
Inferior ao domínio de 50%	27	32	27	18
Dentro do domínio de 50%	50	50	55	59
Superiores ao domínio de 50%	23	18	18	23

A observação deste quadro, mostra-nos que, apesar de se tratar de um número bastante reduzido de ensaios, a distribuição de valores se aproxima bastante da de uma distribuição normal de Gauss.

Como verificação desenharam-se a partir dos elementos obtidos no Quadro V as curvas de distribuição de valores cujo andamento concorda satisfatoriamente com os pontos resultantes dos ensaios. Estas curvas vão representadas nas fig. 11 a 14.

Deste modo, à falta de melhor critério e para condições da rede que não difiram apreciavelmente das dos ensaios, é razoável considerar como coeficiente de regulação (énergie réglante),  $K$ , o valor dado pela expressão:

$$K = \frac{P}{50} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$$

sendo  $P$  a soma das potências activas nominais dos grupos em serviço e  $\varepsilon$  os valores já indicados na tabela III.

Os valores obtidos por este processo encontram-se no Quadro VI.

**QUADRO VI**

VALORES DE  $K$

Potências activas dos grupos em serviço (MW)	Tempos de referência			
	Afastamento máximo da frequência (3 a 6) s	15 segundos	25 segundos	60 segundos
400	39	90	115	169
500	48	112	143	211
600	58	135	172	253
700	68	157	201	295
800	77	180	230	337
900	87	202	258	379
1000	97	225	287	421
1100	106	247	316	463
1200	116	270	344	505
1300	125	292	373	547
1400	135	315	402	589
1500	145	337	430	631

Lisboa, Outubro de 1961.

F. N. RIBEIRO GOMES

Engenheiro Electrotécnico (I.S.T.)

CHEFE DE SERVIÇOS DO LABORATÓRIO ELECTROTÉCNICO  
DA COMPANHIA NACIONAL DE ELECTRICIDADE