

DT503

**EXPERIÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ITAIPU
E DE OUTROS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO RECENTES**

**ENSINAMENTOS PARA DECISÕES PREMENTES QUE SE IMPÕEM PARA O
SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DAS USINAS DO RIO MADEIRA PARA O SUDESTE**

Carlos Portela

Março de 2008

1. – Introdução

A transmissão de energia das usinas do Rio Madeira para o Sudeste, se feita segundo as hipóteses que vêm sendo consideradas e com base nos procedimentos de análise que têm sido adotados, pelas entidades formalmente ligadas ao assunto, têm, aparentemente, uma probabilidade elevada de conduzir a soluções com risco elevado de:

- Desempenho técnico deficiente, incluindo alta probabilidade de interrupções e até apagões.
- Custos muito superiores a soluções adequadamente estudadas e otimizadas, com bom desempenho técnico.

As condições específicas de transmissão de energia elétrica da Amazônia para o Sudeste e o Nordeste tornam potencialmente muito interessantes alternativas baseadas em troncos com pouco mais de meia onda (*meia onda +*) com linhas de transmissão não convencionais (*LNCs*). Este tipo de solução foi estudado e objeto de artigos e palestras sobre o assunto, disponibilizados na internet. Todavia, embora, desde há bastante tempo, se tenha proposto, reiteradamente, que estas alternativas sejam formalmente consideradas, nos leilões a efetuar, as mesmas não têm sido consideradas. As razões invocadas afiguram-se, manifestamente, não pertinentes ou equivocadas.

Aparentemente, para definir corretamente os condicionamentos do leilão para o sistema de transmissão da energia das usinas de Santo Antônio e Jirau para o Sudeste, quer para a alternativa *meia onda +* com *LNCs*, quer para outras alternativas, há que fazer uma otimização cuidadosa de todas elas, considerando aspectos que, aparentemente, não vêm sendo ponderados.

Segundo as programações do PAC, o tempo disponível é curto. Há que optar, urgentemente, explícita ou implicitamente, ou por tomar medidas efetivas e imediatas necessárias para definir corretamente os condicionamentos do leilão, ou por não o fazer e aceitar os riscos e responsabilidades inerentes. Naturalmente, na primeira opção, haverá que assegurar os requisitos necessários para concluir os estudos que se julguem convenientes, para todas as alternativas [*].

No intuito de mostrar alguns condicionamentos importantes que afetam, de maneira diferente, as alternativas e que há que ponderar numa análise correta de otimização, apresento:

- Nos itens 2. a 4. , uma análise de alguns aspectos estatísticos do comportamento operacional dos Sistemas de Transmissão de Itaipu, quer em corrente alternada (no item 2.), quer em corrente contínua (nos itens 3. e 4.), tomando como base informações numéricas constantes de [1].**
- No item 5. , uma análise da importância de alguns aspectos dos critérios de projeto e de diferenças de condicionamentos de desempenho operacional das várias alternativas a considerar para a transmissão da energia das usinas de Santo Antônio e Jirau para o Sudeste, evidenciados pela análise estatística constante dos itens 2. a 4. , por informações constantes de [2] e [3] e por informações relativas aos critérios e opções usados no Sistema de Transmissão de Itaipu.**

[*] Transcrevo, a este respeito, o primeiro parágrafo de [4]:

Como agente normativo e regulador da atividade econômica, o Estado exerce a função de planejamento. No caso do setor energético, o desempenho de tal função requer o desenvolvimento de estudos complexos e multidisciplinares, que demandam elevado grau de qualificação e especialização profissional. Além disso, nesse processo, é essencial garantir a continuidade, a credibilidade, a representatividade e a transparência dos estudos, em especial, por meio da publicidade das premissas, critérios, métodos e resultados, de maneira pública e isonômica, a todos os agentes. Por esse motivo, em 2004 foi constituída a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, uma empresa pública, capitalizada pela União, que tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, compreendendo energia elétrica, petróleo e seus derivados, gás natural, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética.

2. – Elementos estatísticos relativos a número de diversos “tipos” de curto-circuitos, nas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA, de 1984 a 2005 [*]

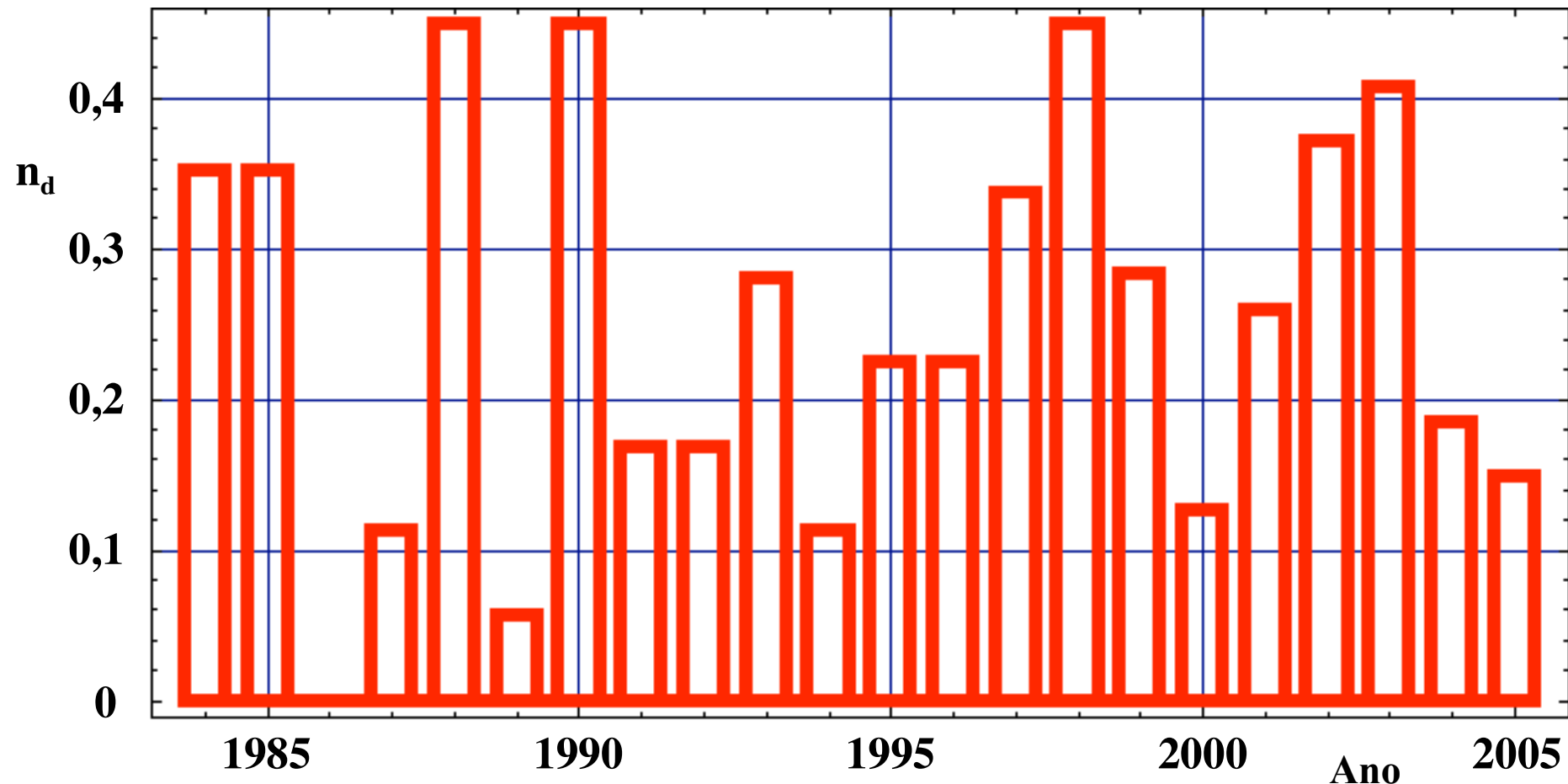


Fig. 2-1 – Variação, de 1984 a 2005, do número, n_d , de curto-circuitos, por 100 km de linha e por ano, originados por descargas atmosféricas, nas linhas de transmissão de Itaipu em CA. O parâmetro n_d variou de 0,000 a 0,449 e o valor médio, de 1984 a 2005, foi 0,251 .

[*] – A análise apresentada neste item baseia-se nas informações numéricas constantes de [1] .

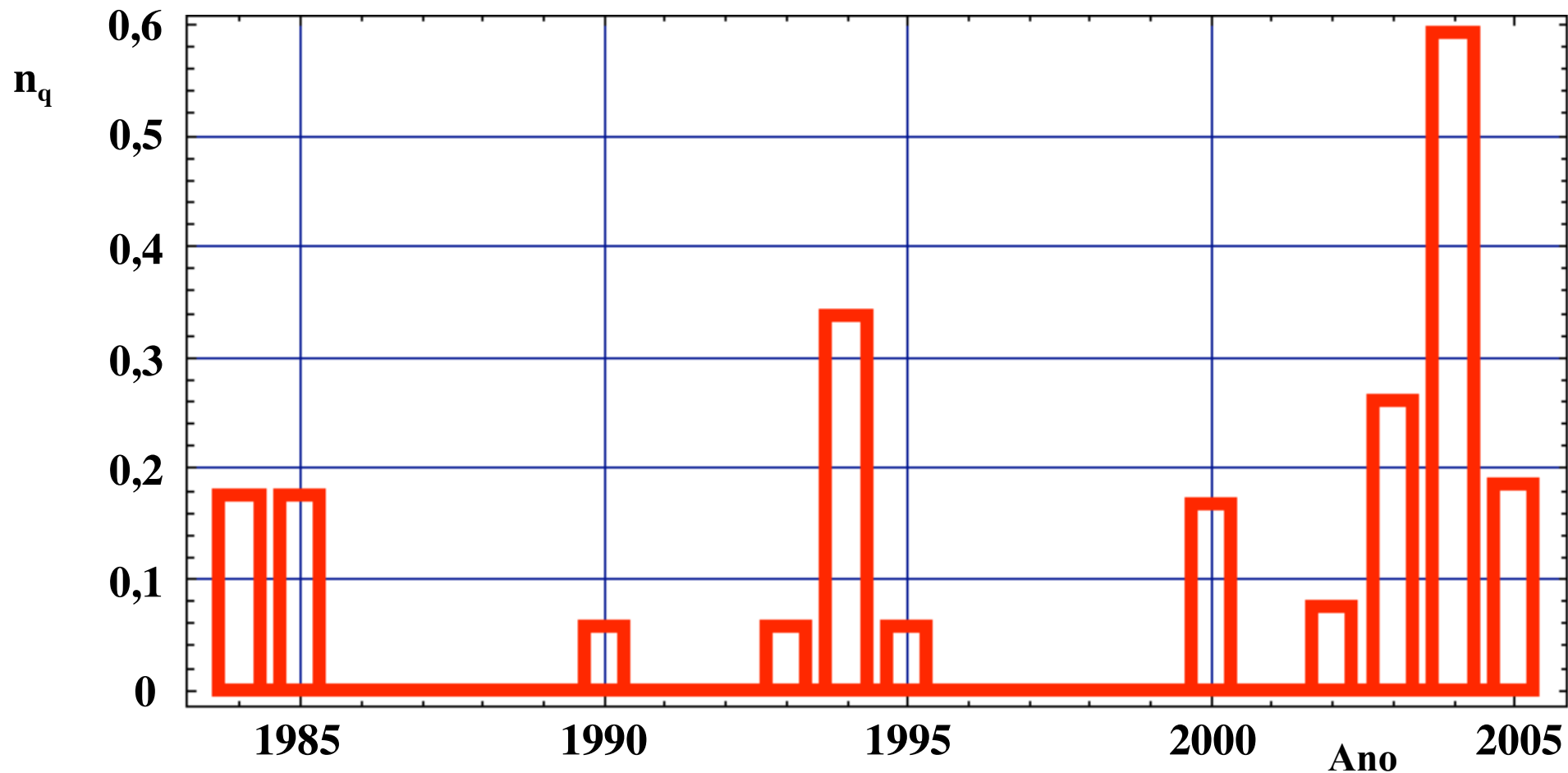


Fig. 2-2 – Variação, de 1984 a 2005, do número, n_q , de curto-circuitos, por 100 km de linha e por ano, originados por queimadas, nas linhas de transmissão de Itaipu em CA. O parâmetro n_q variou de 0,000 a 0,593 e o valor médio, de 1984 a 2005, foi 0,097 .

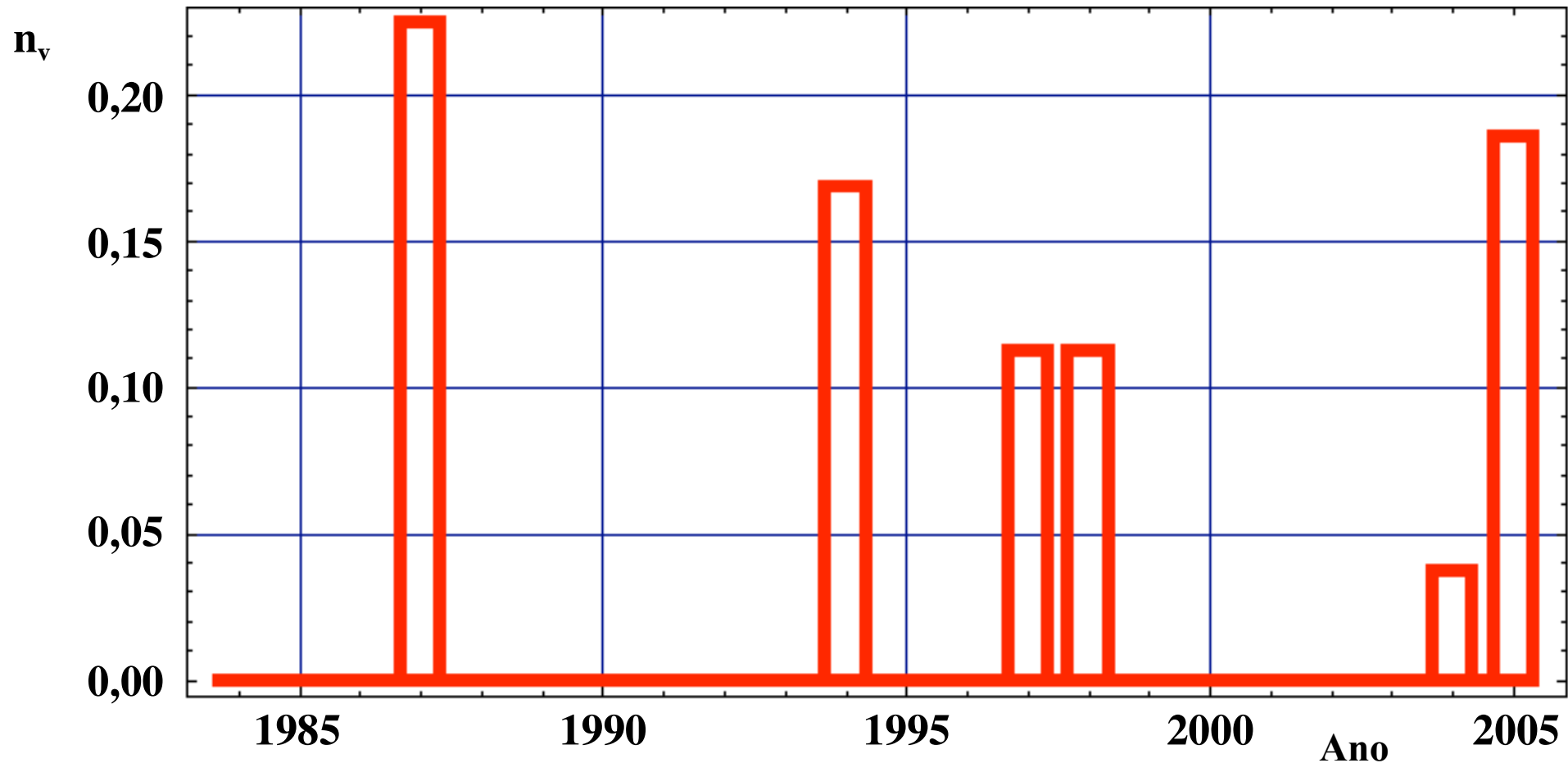


Fig. 2-3 – Variação, de 1984 a 2005, do número, n_v , de curto-circuitos, por 100 km de linha e por ano, originados por queda de estruturas, nas linhas de transmissão de Itaipu em CA. O parâmetro n_v variou de 0,000 a 0,224 e o valor médio, de 1984 a 2005, foi 0,038 .

RESUMO DOS ELEMENTOS ESTATÍSTICOS DO ITEM 2.

Tabela 2-1

Número médio, por 100 km de linha e por ano, de curto-circuitos, nas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA, de 1984 a 2005

Número médio, total e segundo o tipo de “causa”

n	Tipo de causa	n médio [/100 km/ano]
n_d	Descargas atmosféricas	0,251 [¹]
n_q	Queimadas	0,097 [¹]
n_v	Queda de estruturas	0,038 [²]
n_t	Total (incluindo todos os tipos de “causas”)	0,386 [¹] [²]

[¹] As linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA não operam com religamento monofásico. A adoção de religamento monofásico rápido, adequado, permitiria eliminar cerca de 80 % dos curto-circuitos originados por descargas atmosféricas e uma parte importante dos curto-circuitos originados por queimadas, apenas com atuação de abertura e religamento monofásico. Seria possível, dessa forma, que esses curto-circuitos tivessem efeitos perturbadores bastante reduzidos.

[²] Uma informação, com pequena margem de erro, sobre as características estatísticas dos ventos e uma análise estatística cuidadosa do risco de queda de torres, em função dos critérios de projeto, permitem, em projetos futuros, reduzir significativamente a probabilidade de queda de torres.

3. – Elementos estatísticos relativos a número de diversos “tipos” de curto-circuitos, nas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, de 1993 a 2005 [*]

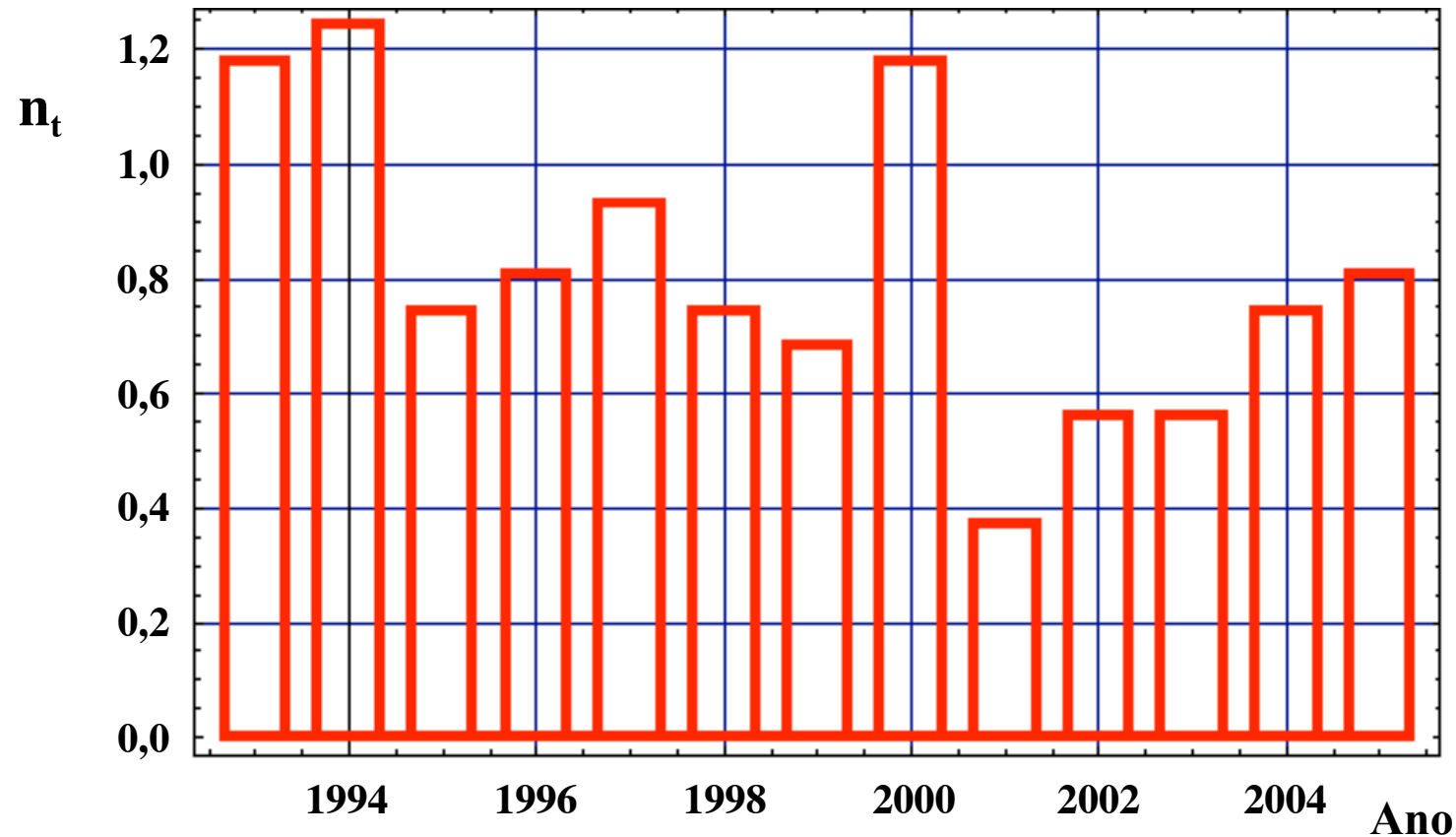


Fig. 3-1 – Variação, de 1993 a 2005, do número total, n_t , de curto-circuitos (num pólo), excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres, por 100 km de linha e por ano, nas linhas de transmissão de Itaipu em CC. O parâmetro n_t variou de 0,372 a 1,241 e o valor médio, de 1993 a 2005, foi 0,811 .

[*] – A análise apresentada neste item baseia-se nas informações numéricas constantes de [1] .

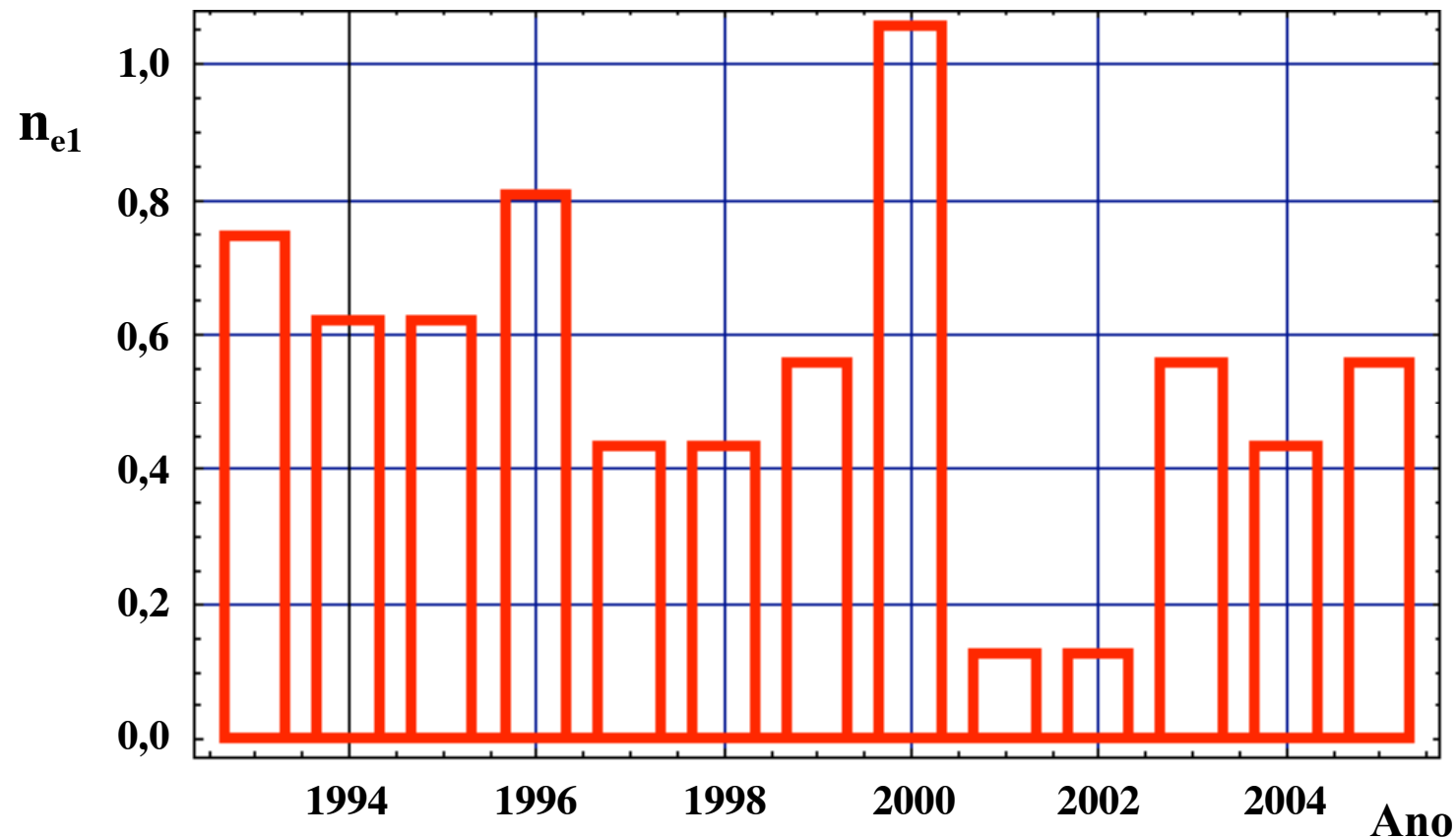


Fig. 3-2 – Variação, de 1993 a 2005, do número, n_{e1} , de curto-circuitos (num pólo), excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres, eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 1 x 600 kV, por 100 km de linha e por ano, nas linhas de transmissão de Itaipu em CC. O parâmetro n_{e1} variou de 0,124 a 1,054 e o valor médio, de 1993 a 2005, foi 0,544 .

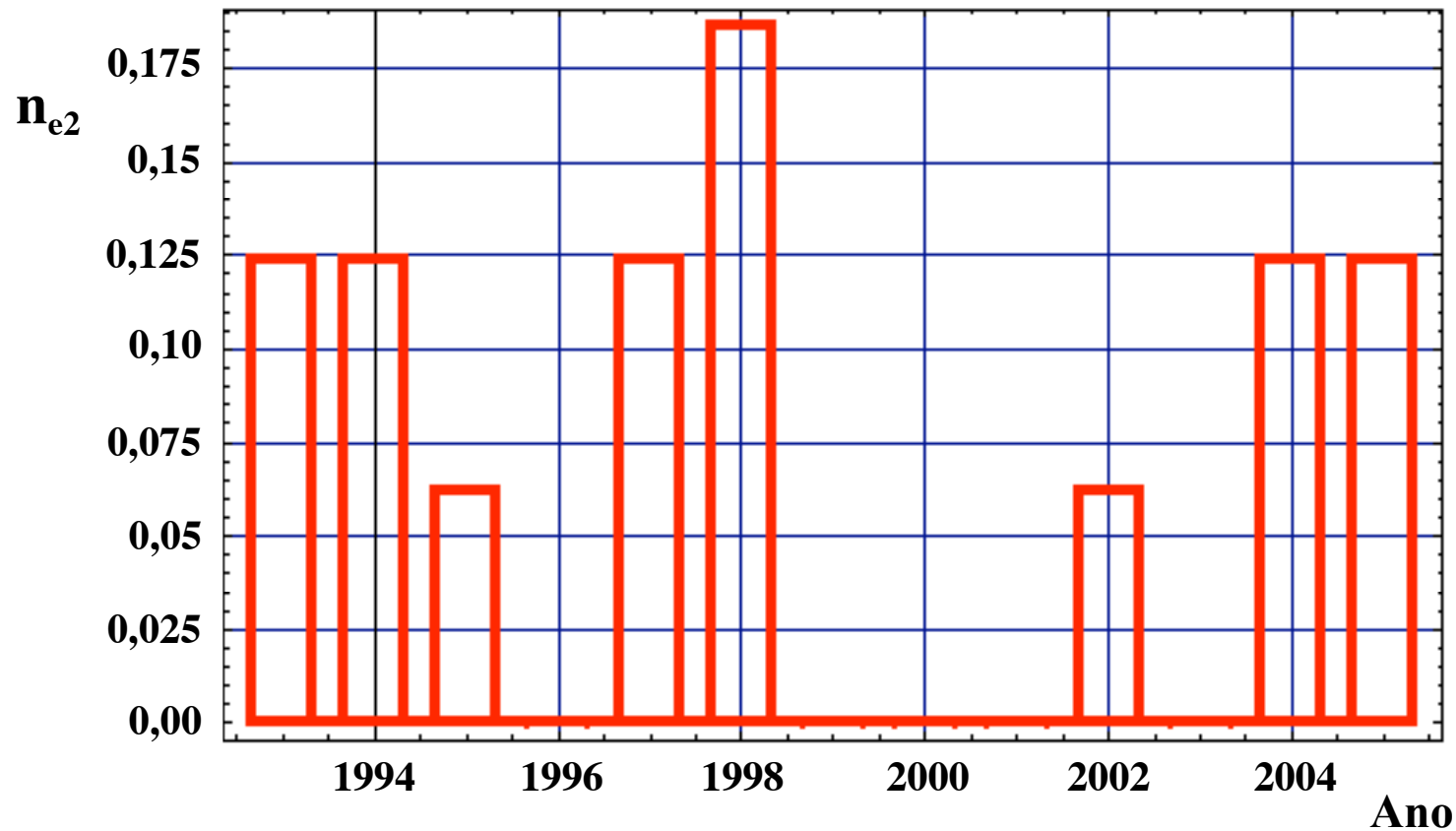


Fig. 3-3 – Variação, de 1993 a 2005, do número, n_{e2} , de curto-circuitos (num pólo), excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres, não eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 1 x 600 kV, mas eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 0,75 x 600 kV, por 100 km de linha e por ano, nas linhas de transmissão de Itaipu em CC. O parâmetro n_{e2} variou de 0,000 a 0,186 e o valor médio, de 1993 a 2005, foi 0,0716 .

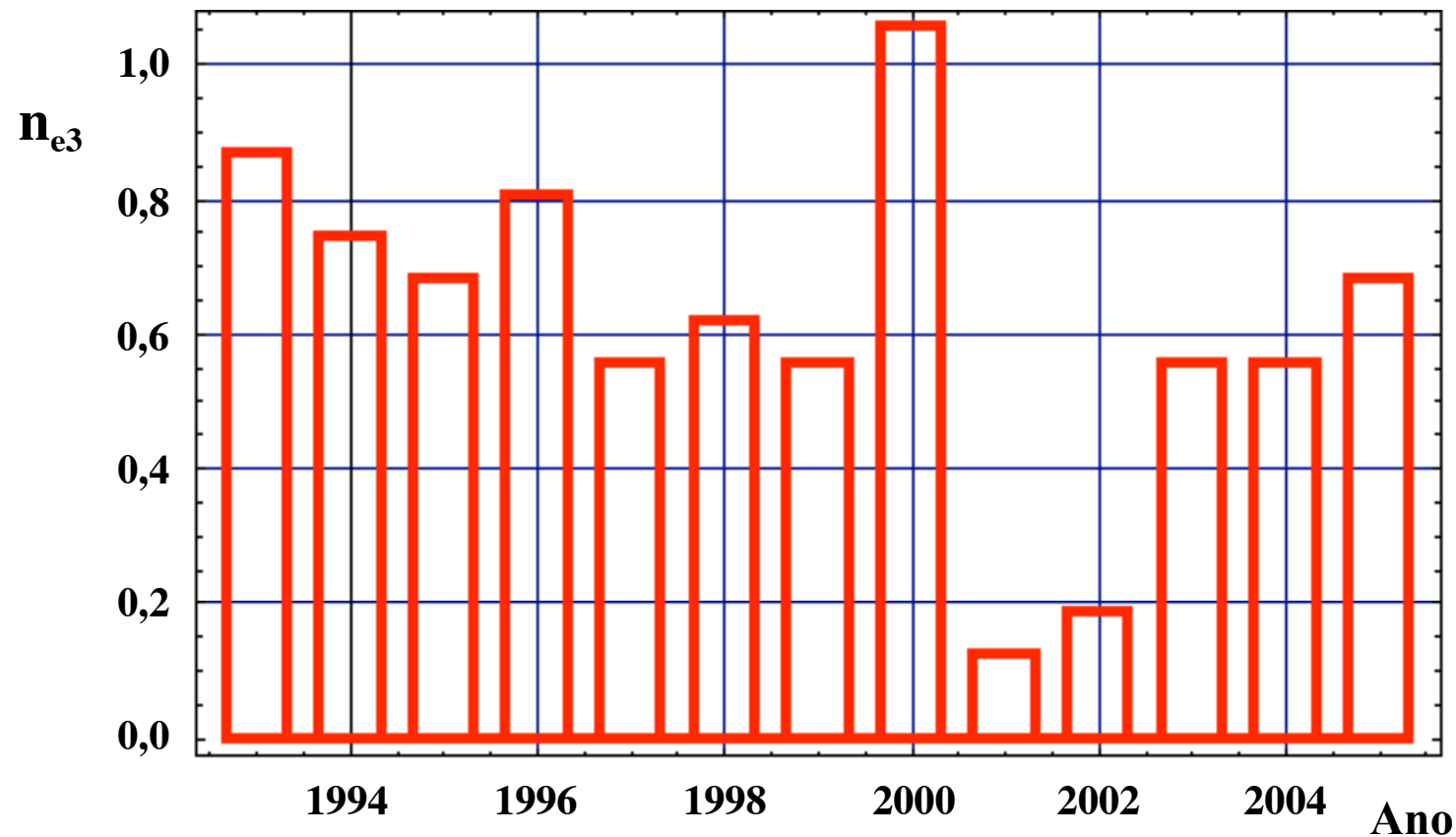


Fig. 3-4 – Variação, de 1993 a 2005, do número, n_{e3} , de curto-circuitos (num pólo), excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres, eliminados com abertura e religamento do pólo, com tensão ou 1 x 600 kV ou 0,75 x 600 kV, por 100 km de linha e por ano, nas linhas de transmissão de Itaipu em CC. O parâmetro n_{e3} variou de 0,124 a 1,055 e o valor médio, de 1993 a 2005, foi 0,616 .

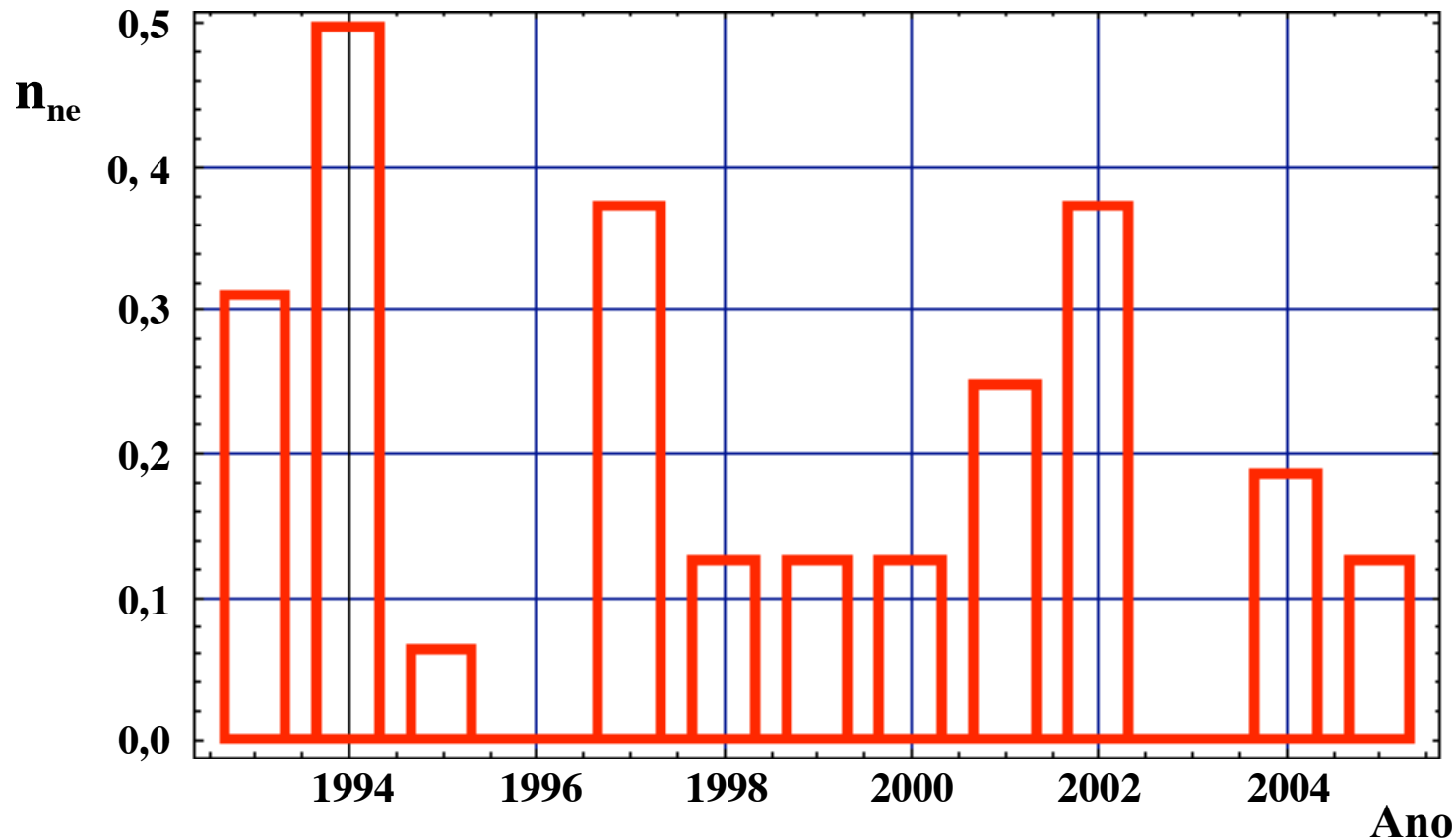


Fig. 3-5 – Variação, de 1993 a 2005, do número, n_{ne} , de curto-circuitos (num pólo), excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres, não eliminados com abertura e religamento do pólo, quer com tensão 1 x 600 kV, quer com tensão 0,75 x 600 kV, por 100 km de linha e por ano, nas linhas de transmissão de Itaipu em CC. O parâmetro n_{ne} variou de 0,000 a 0,496 e o valor médio, de 1993 a 2005, foi 0,196 .

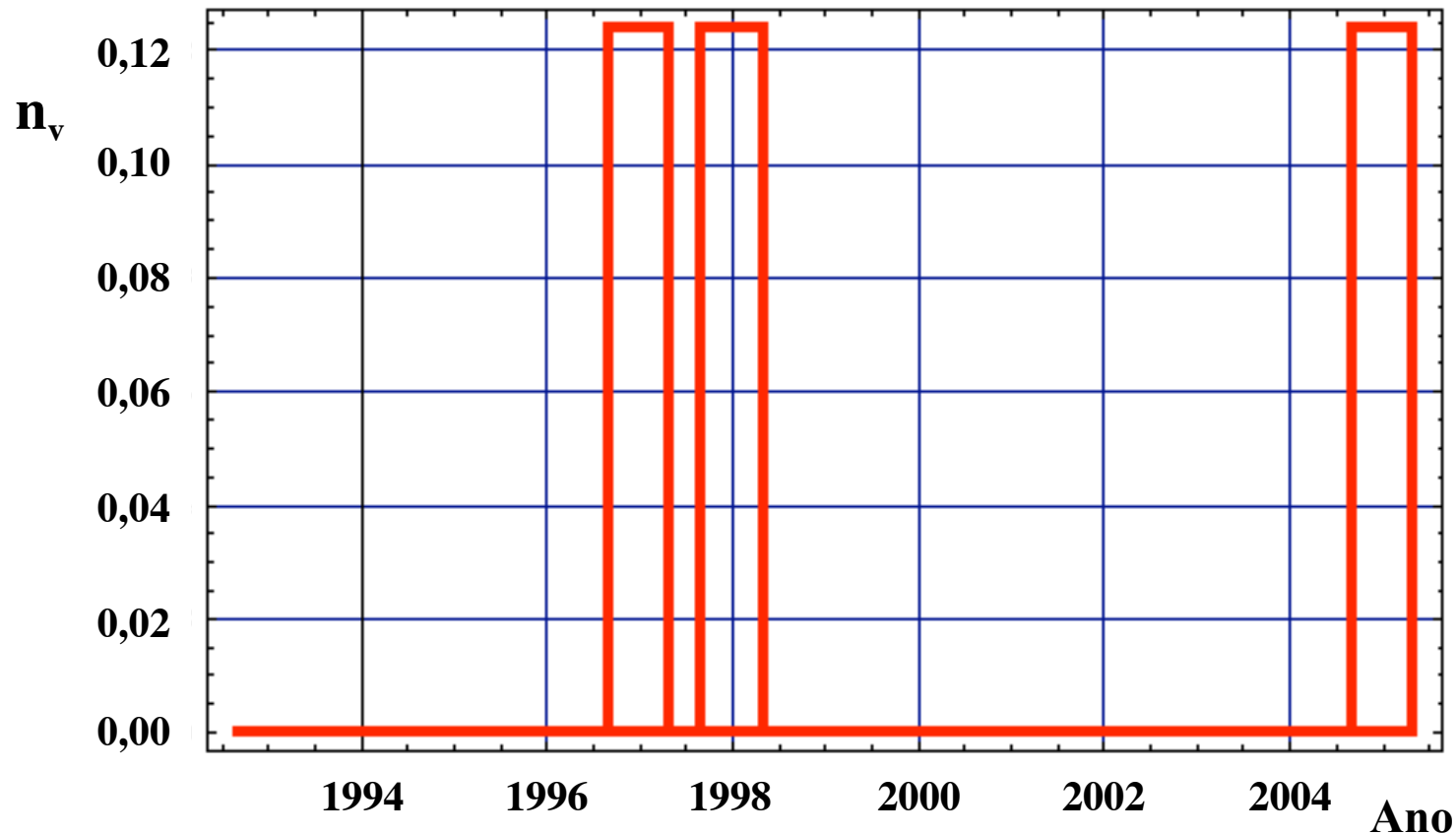


Fig. 3-6 – Variação, de 1993 a 2005, do número, n_v , de curto-circuitos (referidos a pólos afetados), originados por queda de torres, provocando curto-circuito nos dois pólos de um mesmo bipolo, por 100 km de linha e por ano, nas linhas de transmissão de Itaipu em CC. O parâmetro n_v variou de 0,000 a 0,124 e o valor médio, de 1993 a 2005, foi 0,0286 .

RESUMO DOS ELEMENTOS ESTATÍSTICOS DO ITEM 3.

Tabela 3-1

Número médio, de 1993 a 2005, por 100 km de linha e por ano, de curto-circuitos (num pólo), do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres

Número médio, total, e segundo o tipo de “consequência” quanto a eliminação do curto-circuito

n	Tipo de “consequência” quanto a eliminação do curto-circuito	n médio [/100 km/ano]
n_t	Total (incluindo todos os tipos de “consequências”)	0,811
n_{e1}	Eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 1 x 600 kV	0,544
n_{e2}	Eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 0,75 x 600 kV (mas não com 1 x 600 kV)	0,0716
n_{e3}	Eliminados com abertura e religamento do pólo (com tensão 1 x 600 kV ou 0,75 x 600 kV)	0,616
n_{ne}	Não eliminados com abertura e religamento do pólo (com tensão, quer 1 x 600 kV , quer 0,75 x 600 kV)	0,196

Tabela 3-2

Número médio, n_v , de 1993 a 2005, por 100 km de linha e por ano, de curto-circuitos (referidos a pólos afetados), originados por queda de torres, provocando curto-circuito, simultâneo, nos dois pólos de um mesmo bipolo, nas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC

n	Tipo de “ocorrência”	$n_{\text{médio}}$ [/100 km/ano]
n_v	Curto-circuitos originados por queda de torres	0,0286

4. – Elementos estatísticos relativos a saídas forçadas (excluindo os curto-circuitos eliminados com abertura e religamento do pólo afetado), em qualquer dos dois bipolos, no Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, de 1989 a 2005 [*]

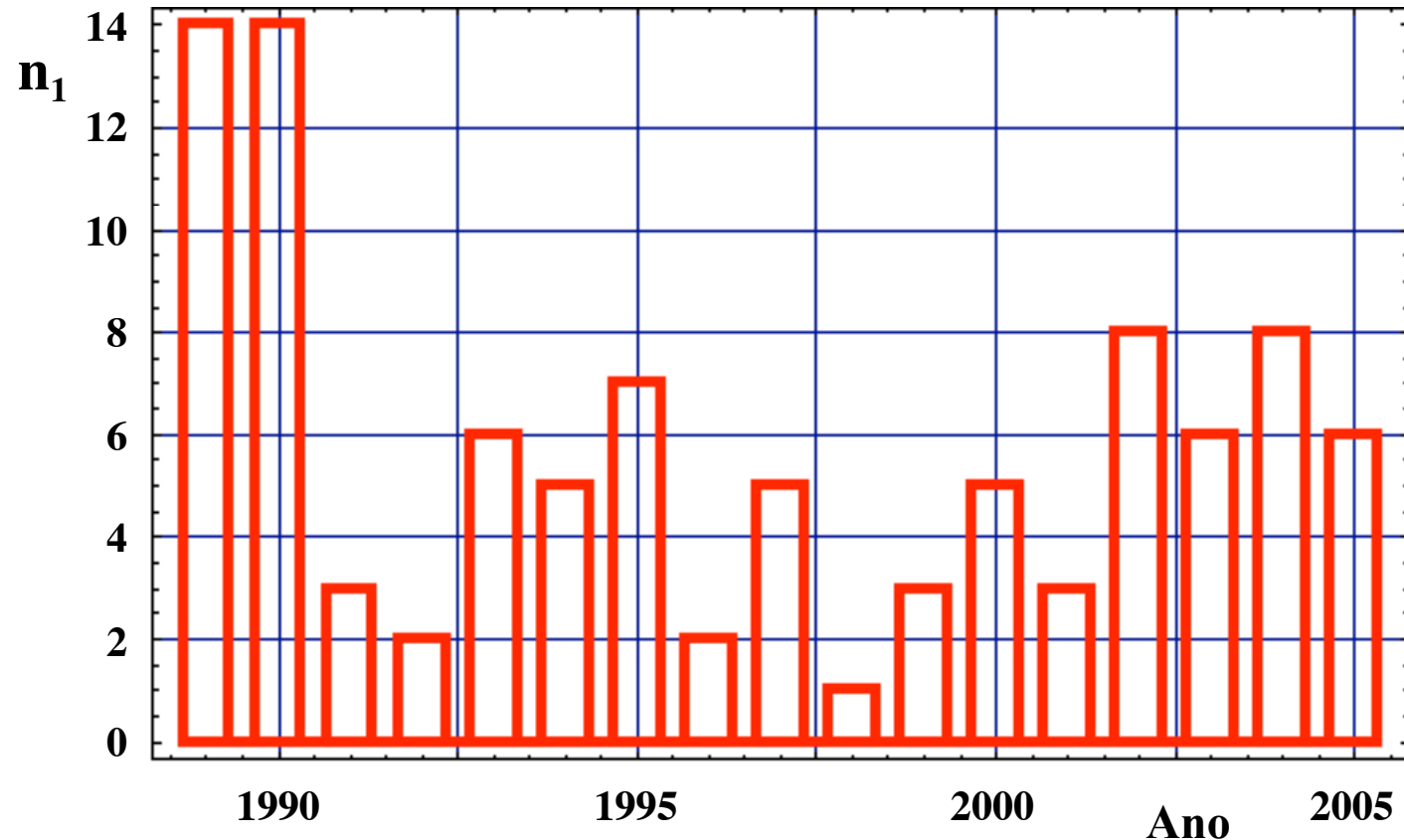


Fig. 4-1 – Variação, de 1989 a 2005, do número, n_1 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “corrente alternada” e de “serviços auxiliares” das estações conversoras. O parâmetro n_1 variou de 1 a 14 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 5,76 .

[*] – A análise apresentada neste item baseia-se nas informações numéricas constantes de [1] .

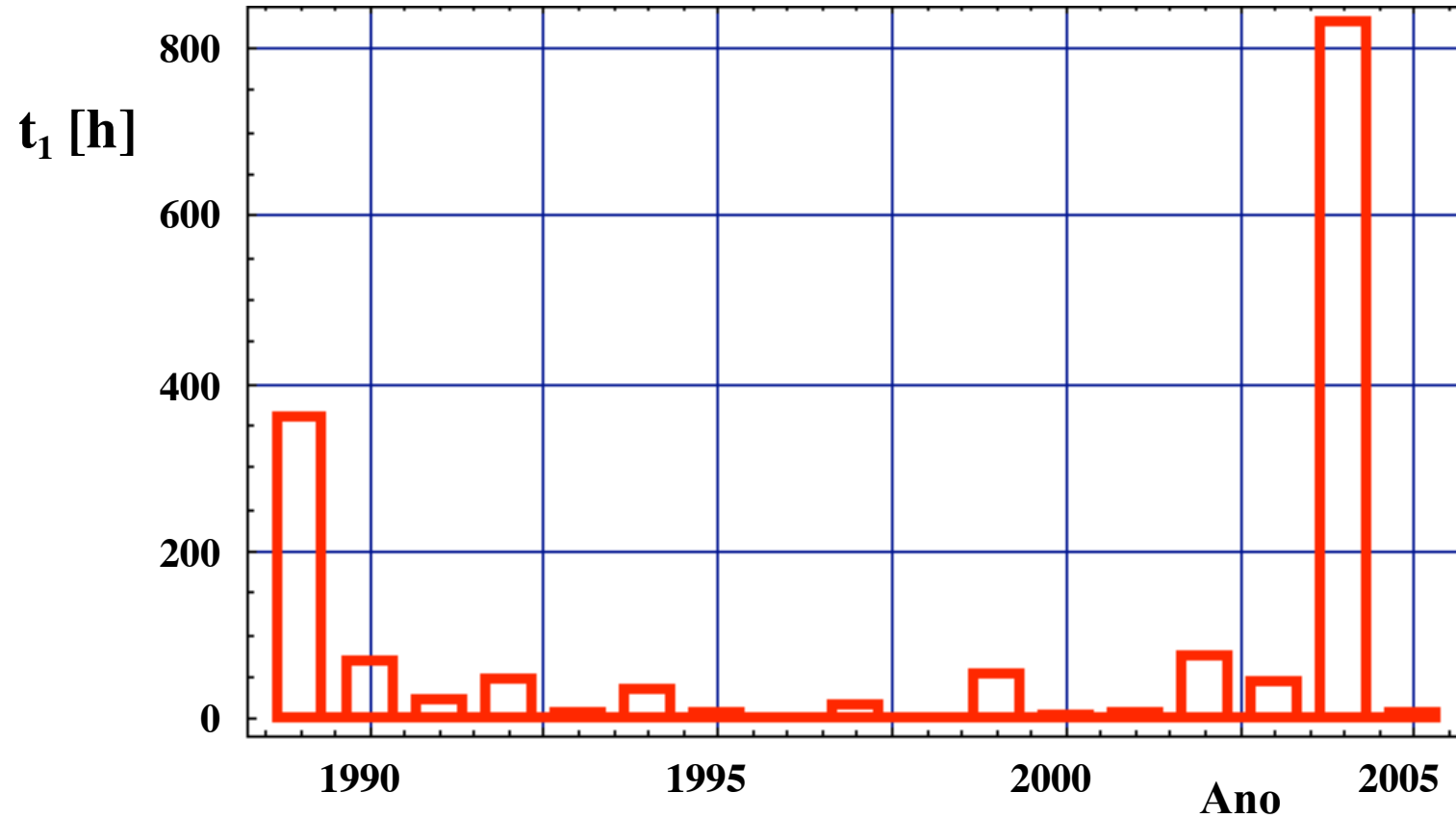


Fig. 4-2 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_1 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “corrente alternada” e de “serviços auxiliares” das estações conversoras. O parâmetro t_1 variou de 0,09 h a 890 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 93,3 h .

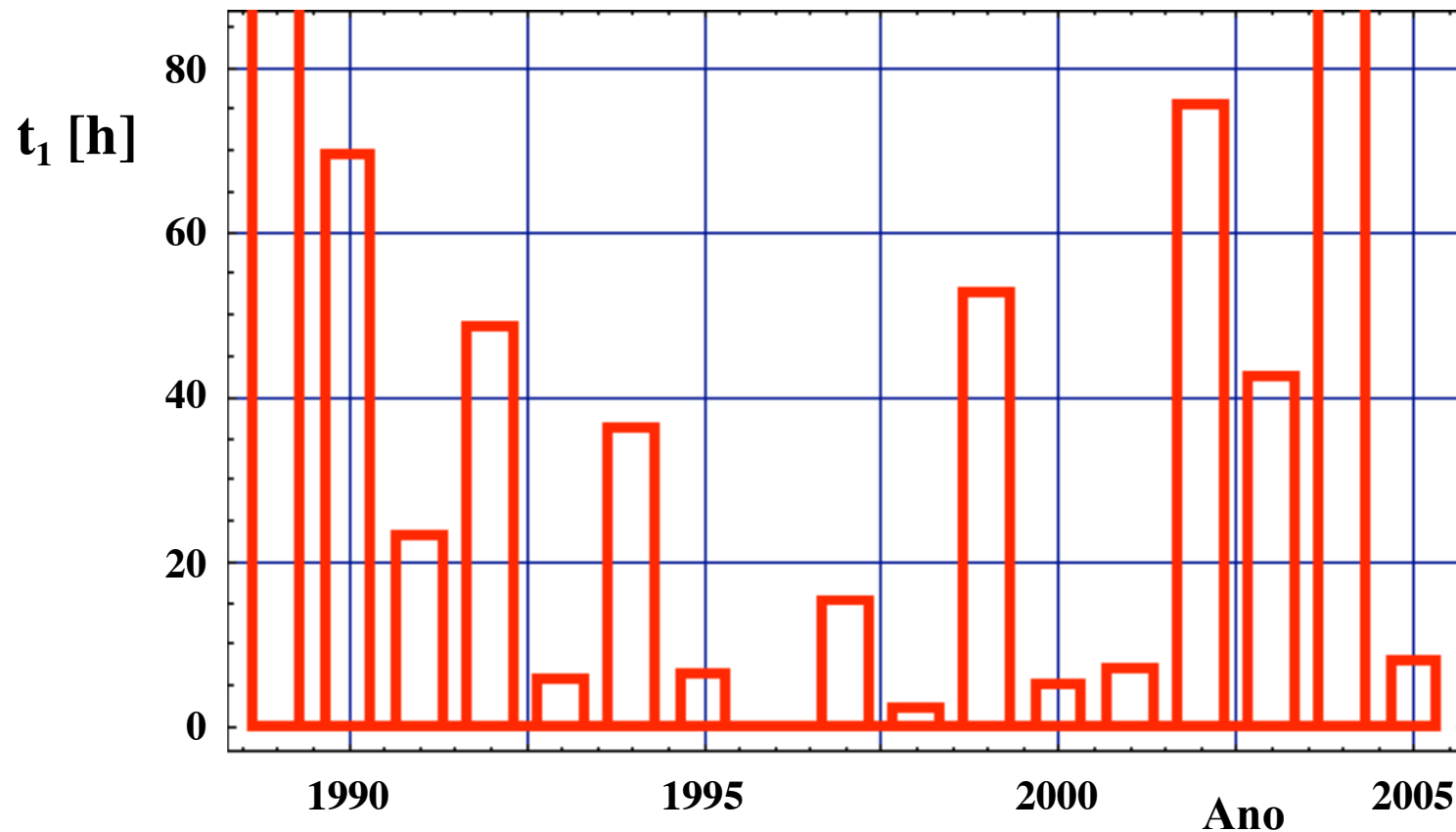


Fig. 4-3 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_1 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “corrente alternada” e de “serviços auxiliares” das estações conversoras. O parâmetro t_1 variou de 0,09 h a 890 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 93,3 h . Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

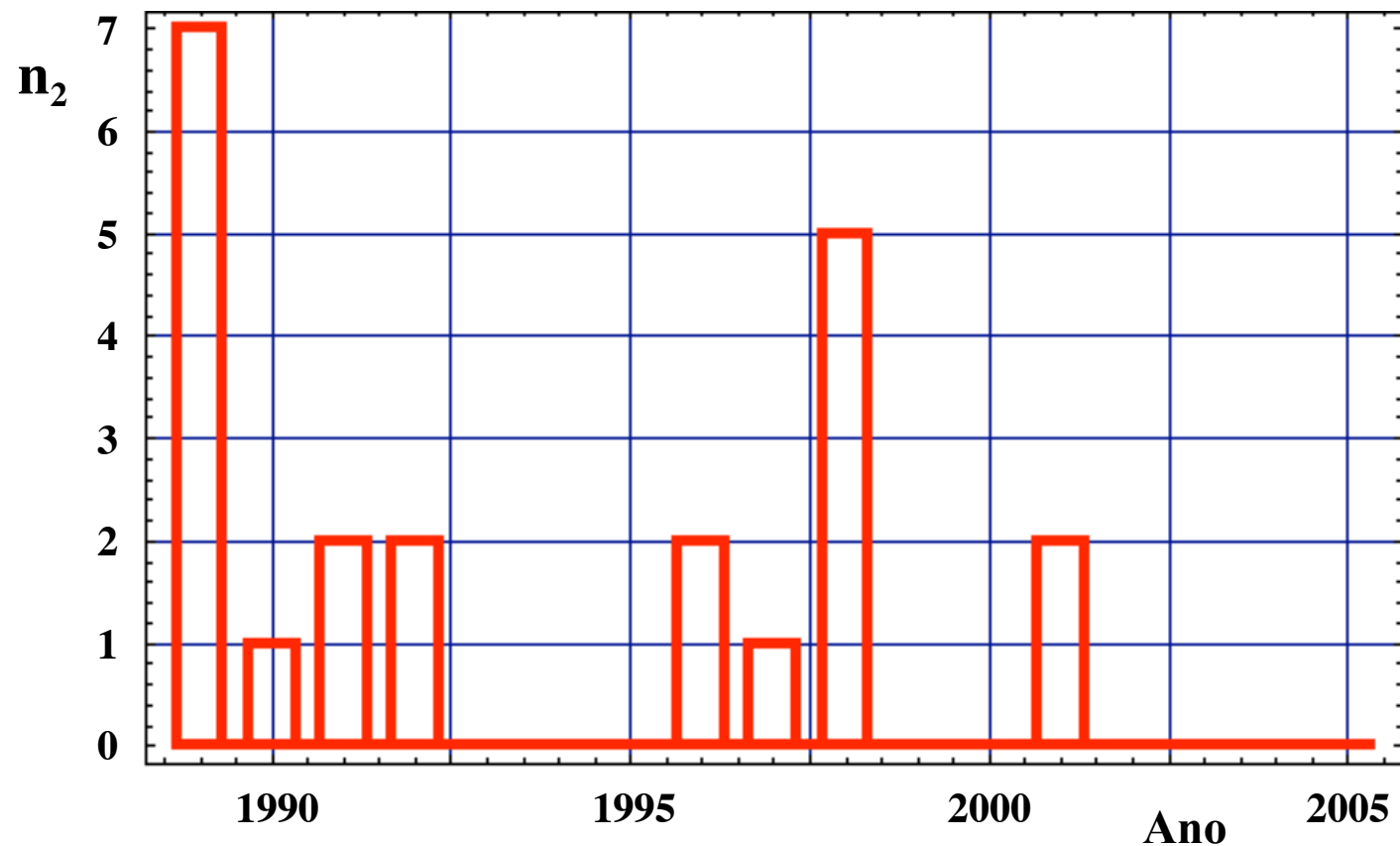


Fig. 4-4 – Variação, de 1989 a 2005, do número, n_2 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelas “válvulas” das estações conversoras. O parâmetro n_2 variou de 0 a 7 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 1,29 .

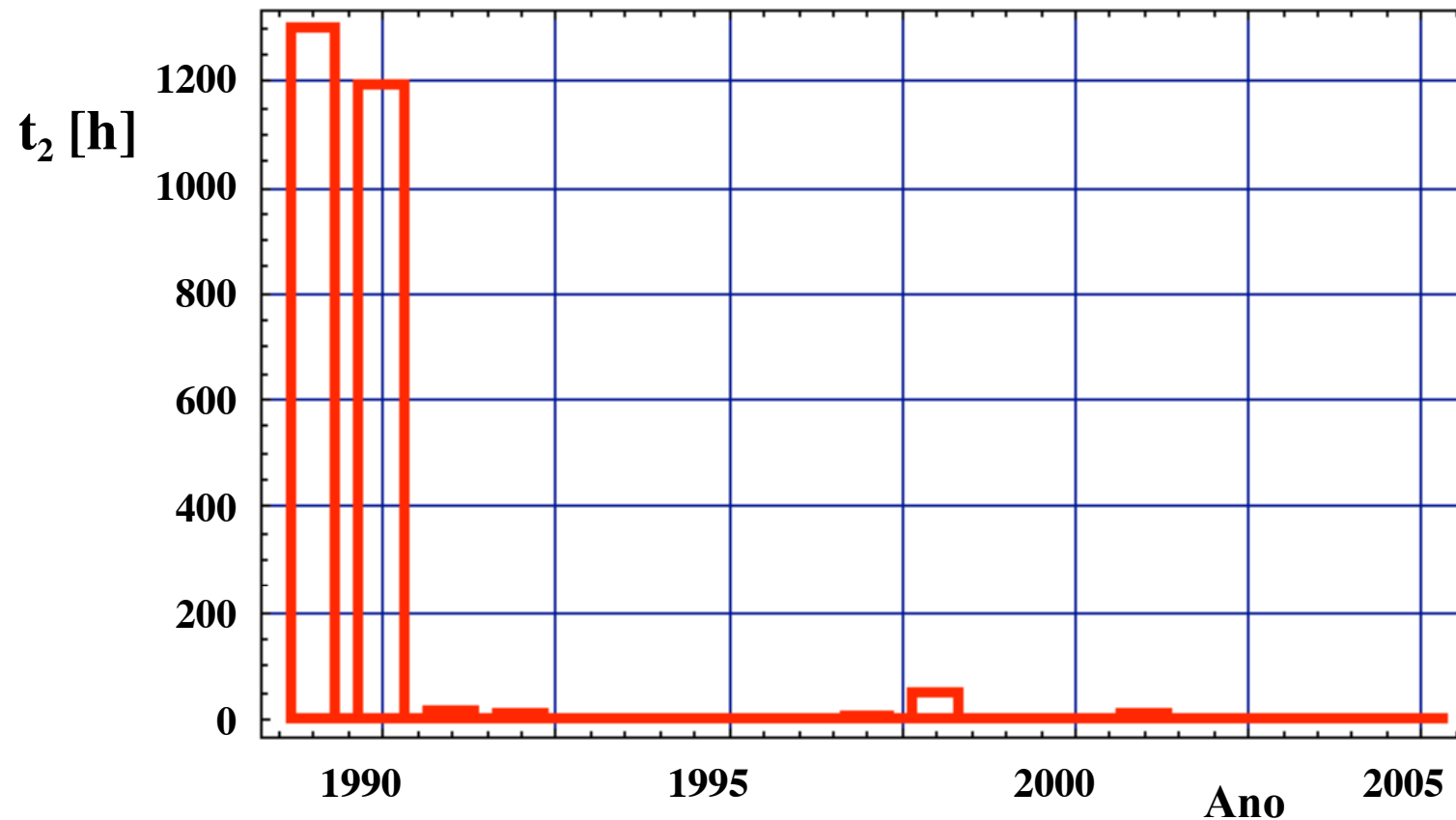


Fig. 4-5 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_2 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelas “válvulas” das estações conversoras. O parâmetro t_2 variou de 0,0 h a 1300 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 151,7 h .

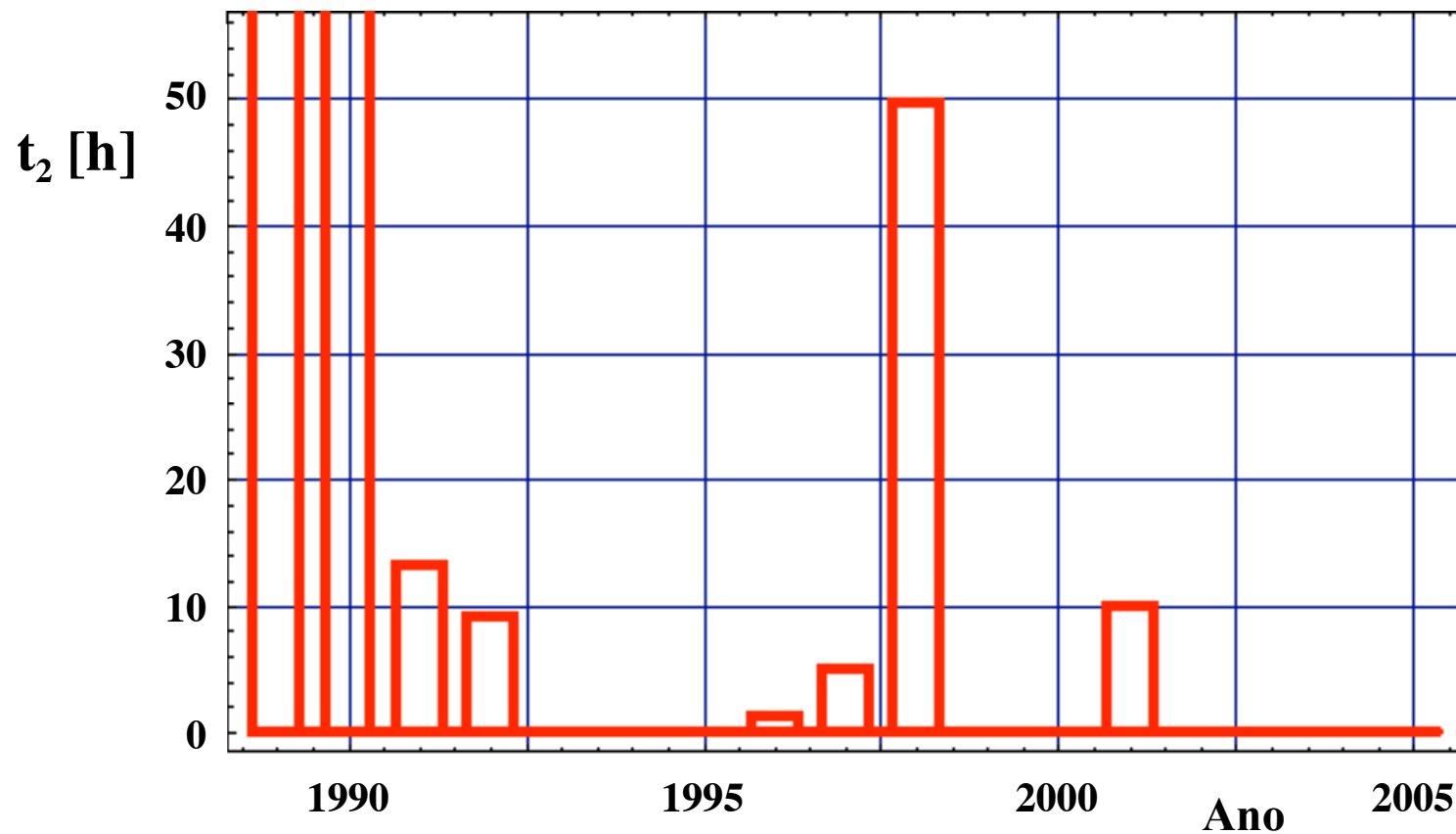


Fig. 4-6 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_2 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelas “válvulas” das estações conversoras. O parâmetro t_2 variou de 0,0 h a 1300 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 151,7 h. Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

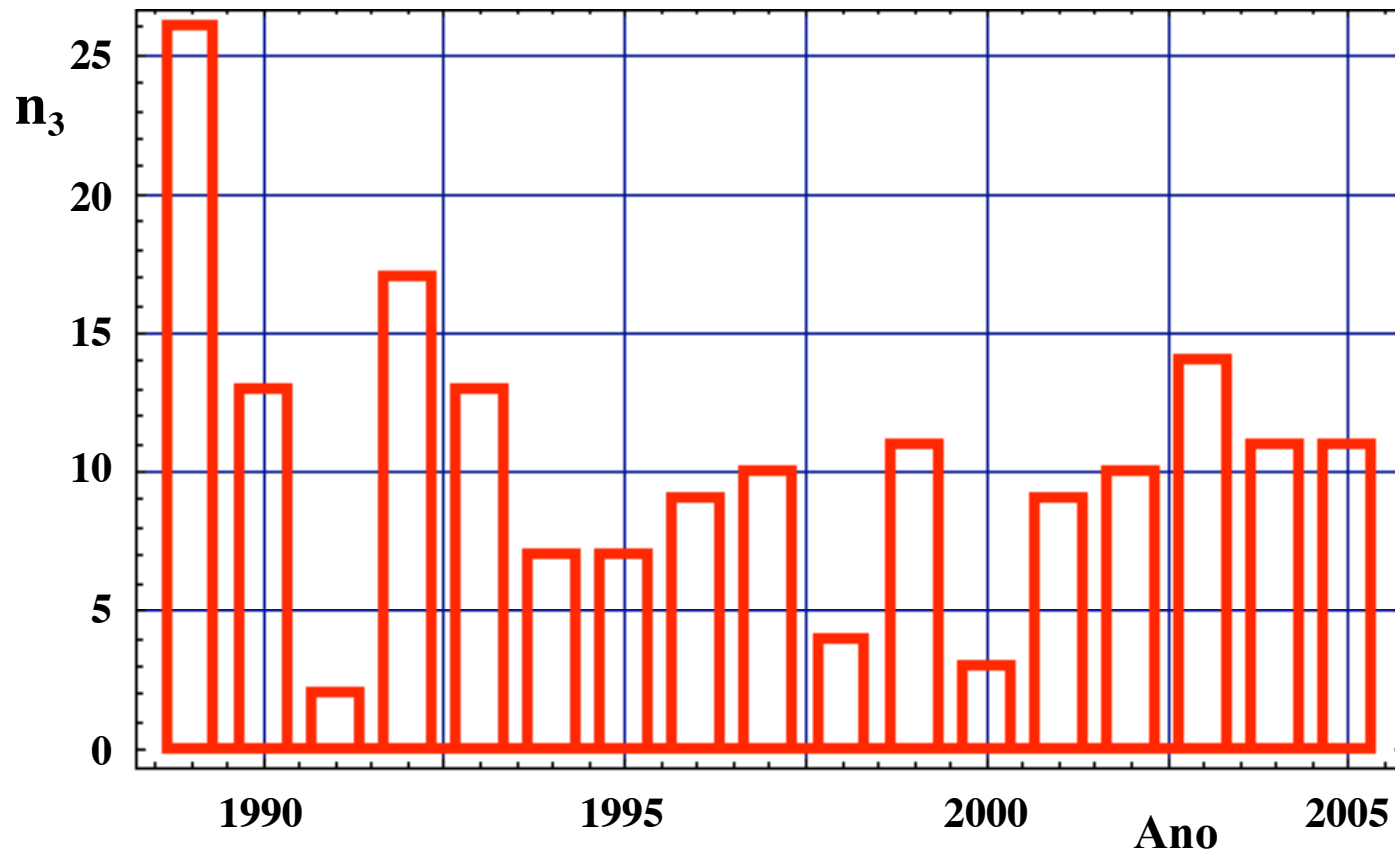


Fig. 4-7 – Variação, de 1989 a 2005, do número, n_3 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “proteção e controle” das estações conversoras. O parâmetro n_3 variou de 2 a 26 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 10,4 .

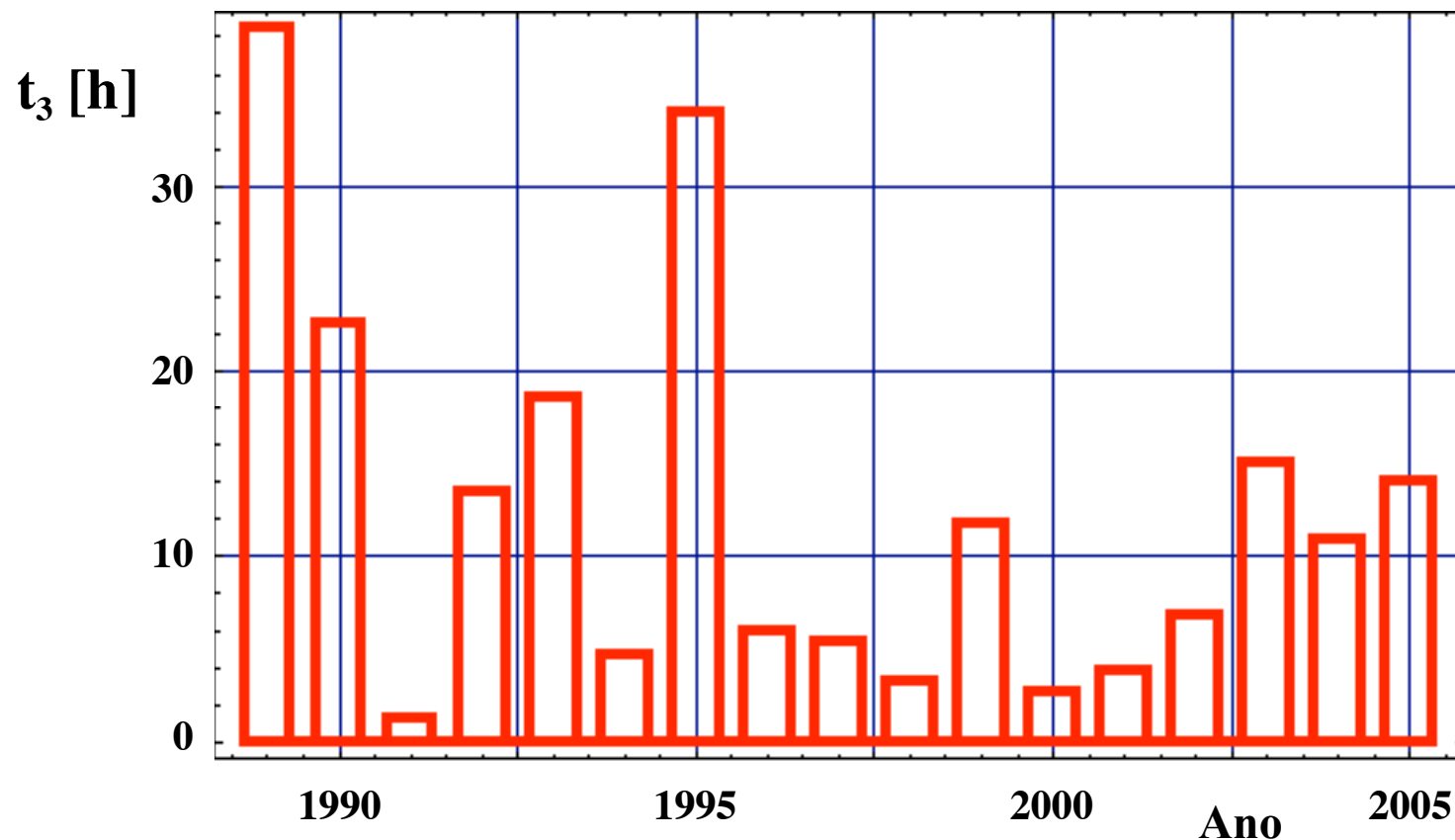


Fig. 4-8 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_3 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “proteção e controle” das estações conversoras. O parâmetro t_3 variou de 1,3 h a 38,5 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 12,5 h .

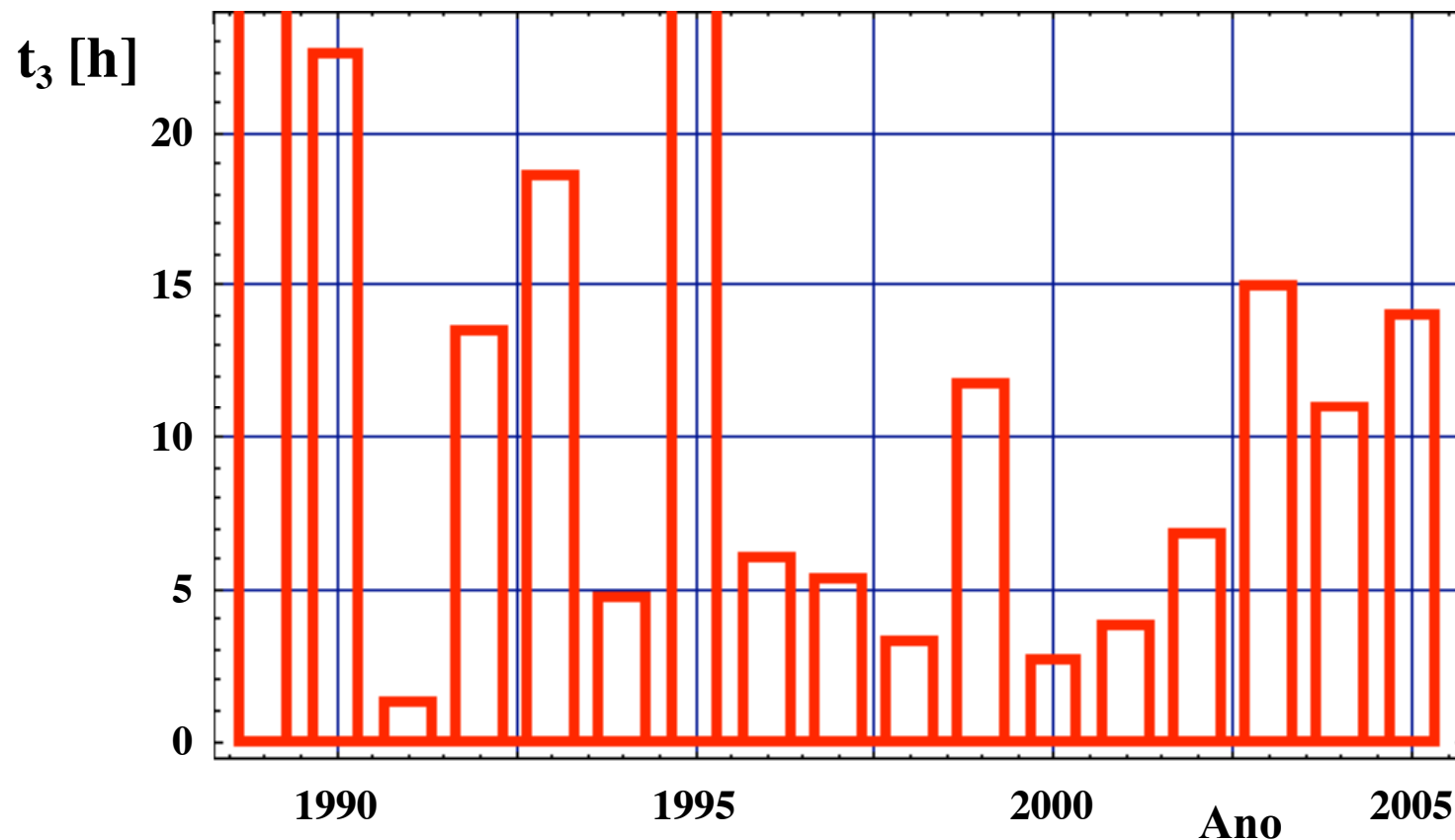


Fig. 4-9 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_3 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “proteção e controle” das estações conversoras. O parâmetro t_3 variou de 1,3 h a 38,5 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 12,5 h. Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

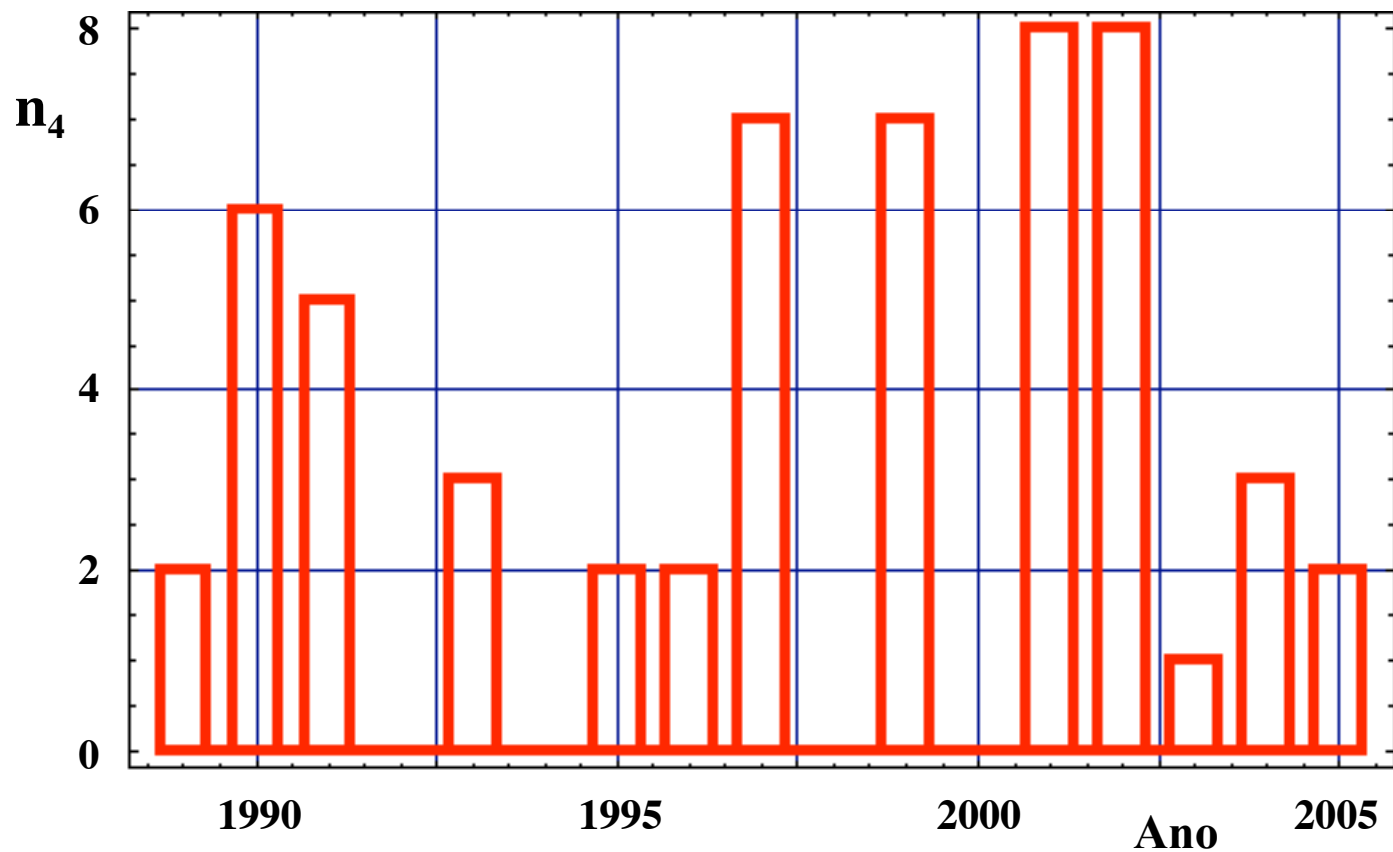


Fig. 4-10 – Variação, de 1989 a 2005, do número, n_4 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “corrente contínua” das estações conversoras. O parâmetro n_4 variou de 0 a 8 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 3,29 .

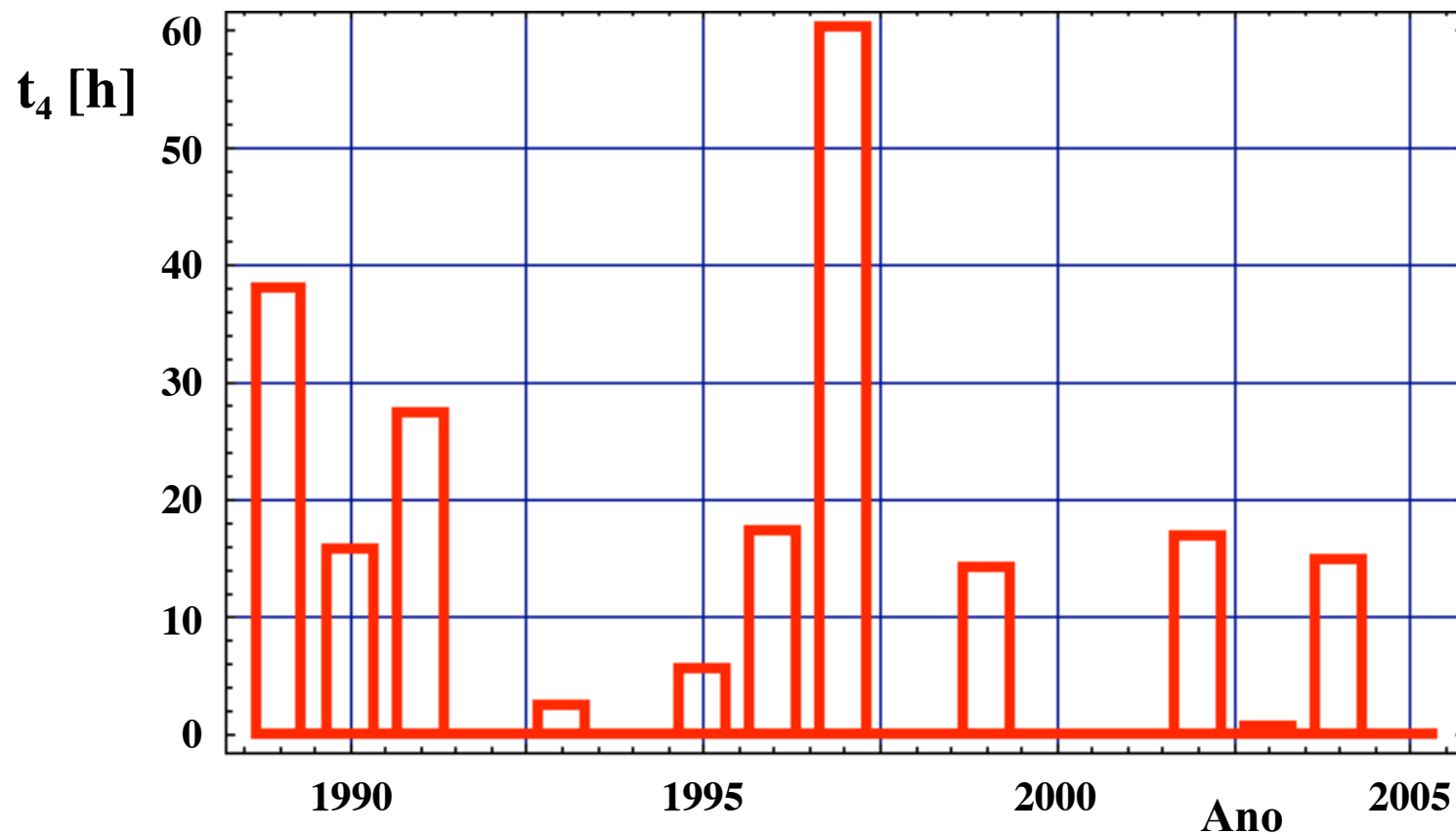


Fig. 4-11 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_4 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “corrente contínua” das estações conversoras. O parâmetro t_4 variou de 0,0 h a 60,0 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 12,6 h .

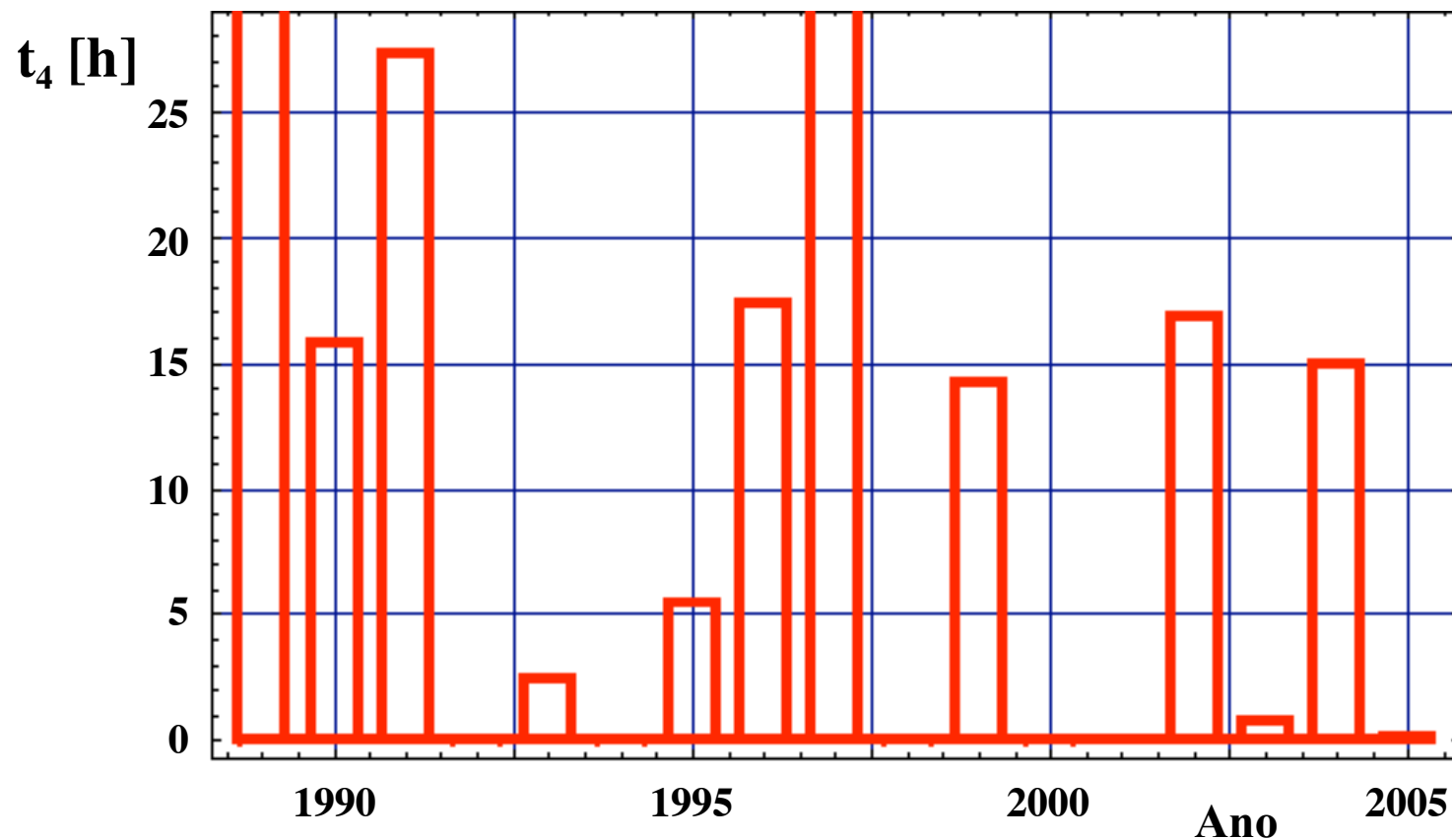


Fig. 4-12 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_4 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas pelo equipamento de “corrente contínua” das estações conversoras. O parâmetro t_4 variou de 0,0 h a 60,0 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 12,6 h. Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

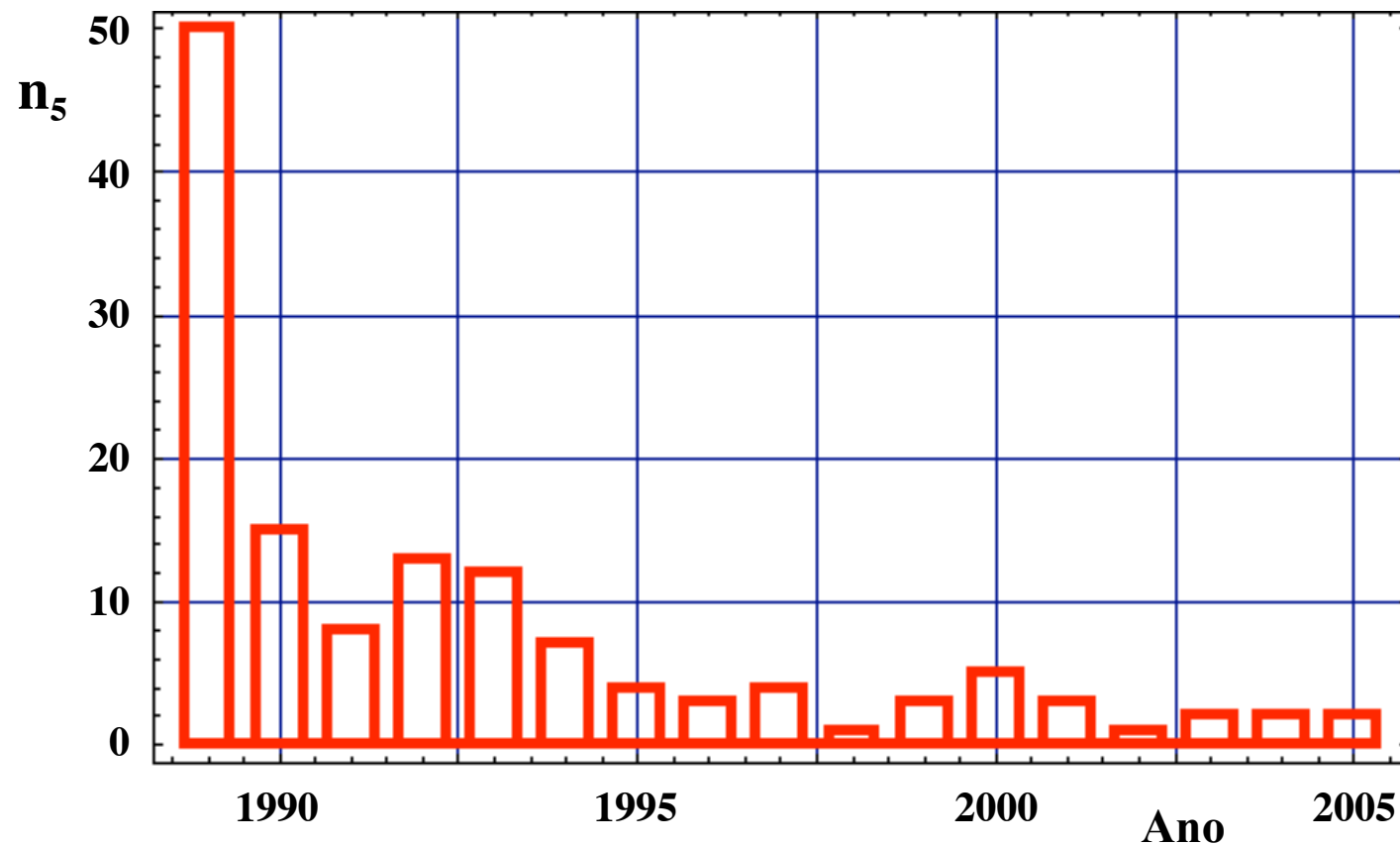


Fig. 4-13 – Variação, de 1989 a 2005, do número, n_5 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por equipamento classificado como “outros” das estações conversoras. O parâmetro n_5 variou de 1 a 50 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 7,94 .

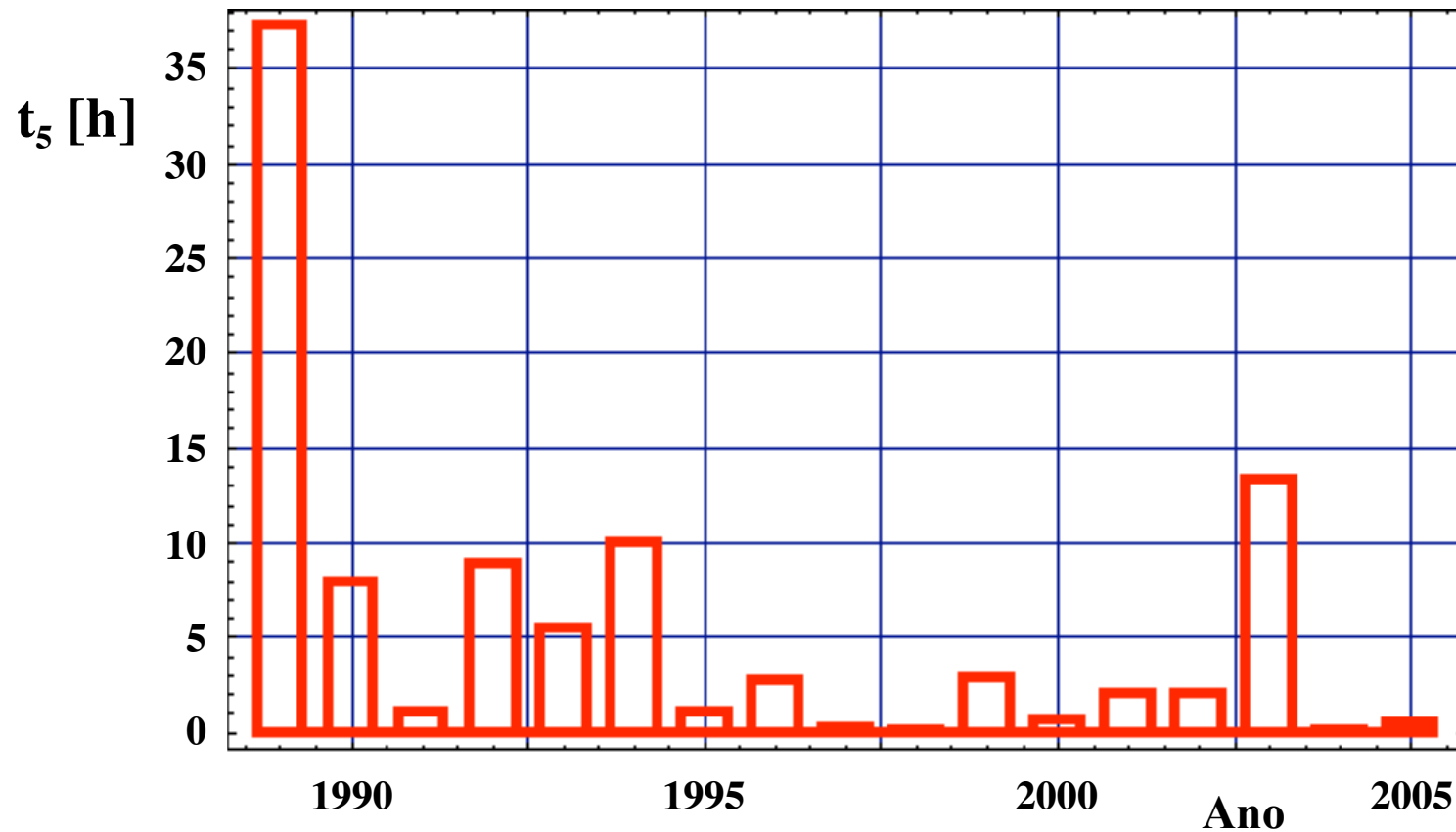


Fig. 4-14 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_5 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por equipamento classificado como “outros” das estações conversoras. O parâmetro t_5 variou de 0,04 h a 37,2 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 5,65 h .

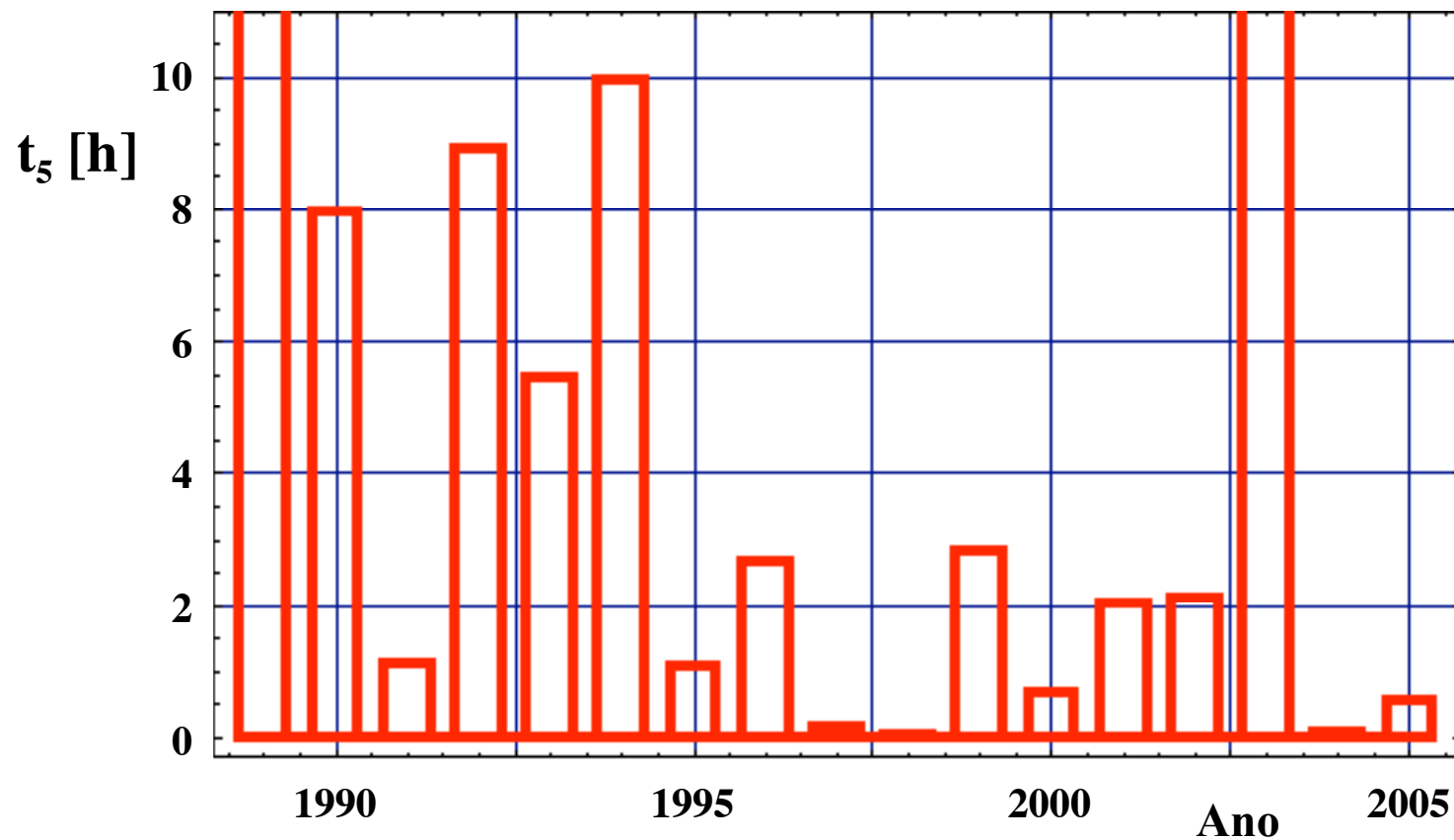


Fig. 4-15 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_5 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por equipamento classificado como “outros” das estações conversoras. O parâmetro t_5 variou de 0,04 h a 37,2 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 5,65 h. Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

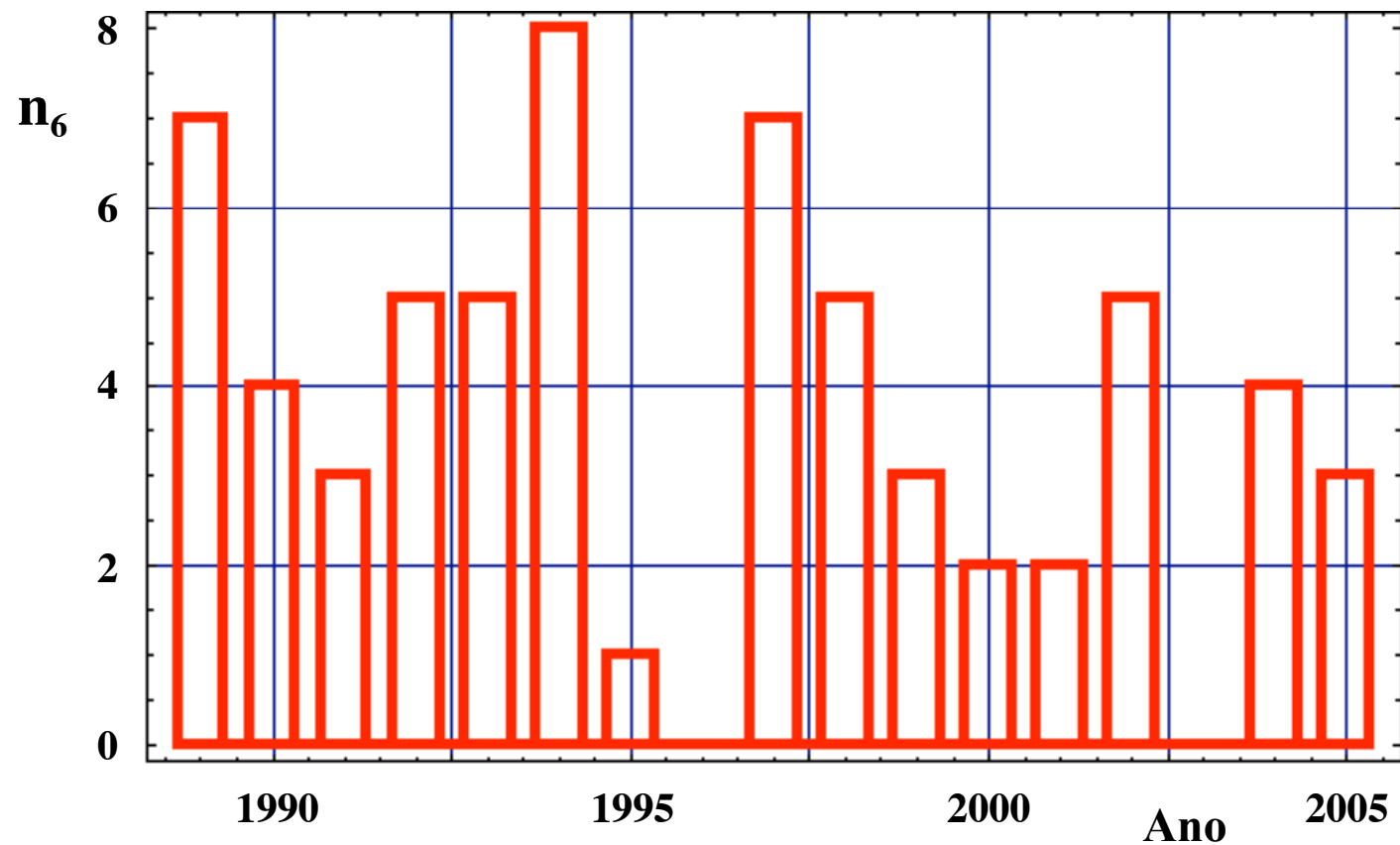


Fig. 4-16 – Variação, de 1989 a 2005, do número, n_6 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por “linha de transmissão”. O parâmetro n_6 variou de 0 a 8 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 3,76 .

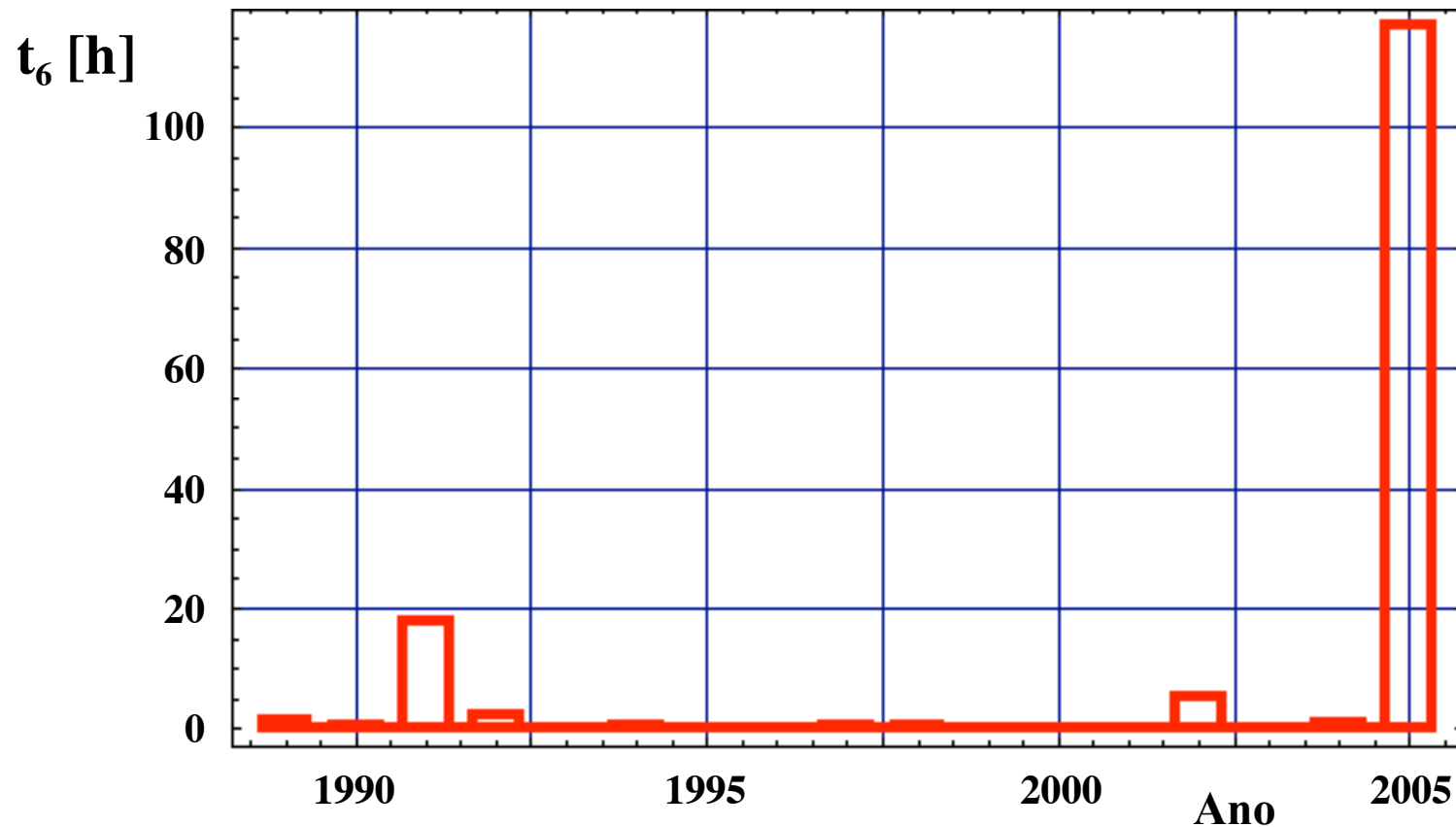


Fig. 4-17 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_6 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por “linha de transmissão”. O parâmetro t_6 variou de 0,0 h a 116,9 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 8,68 h .

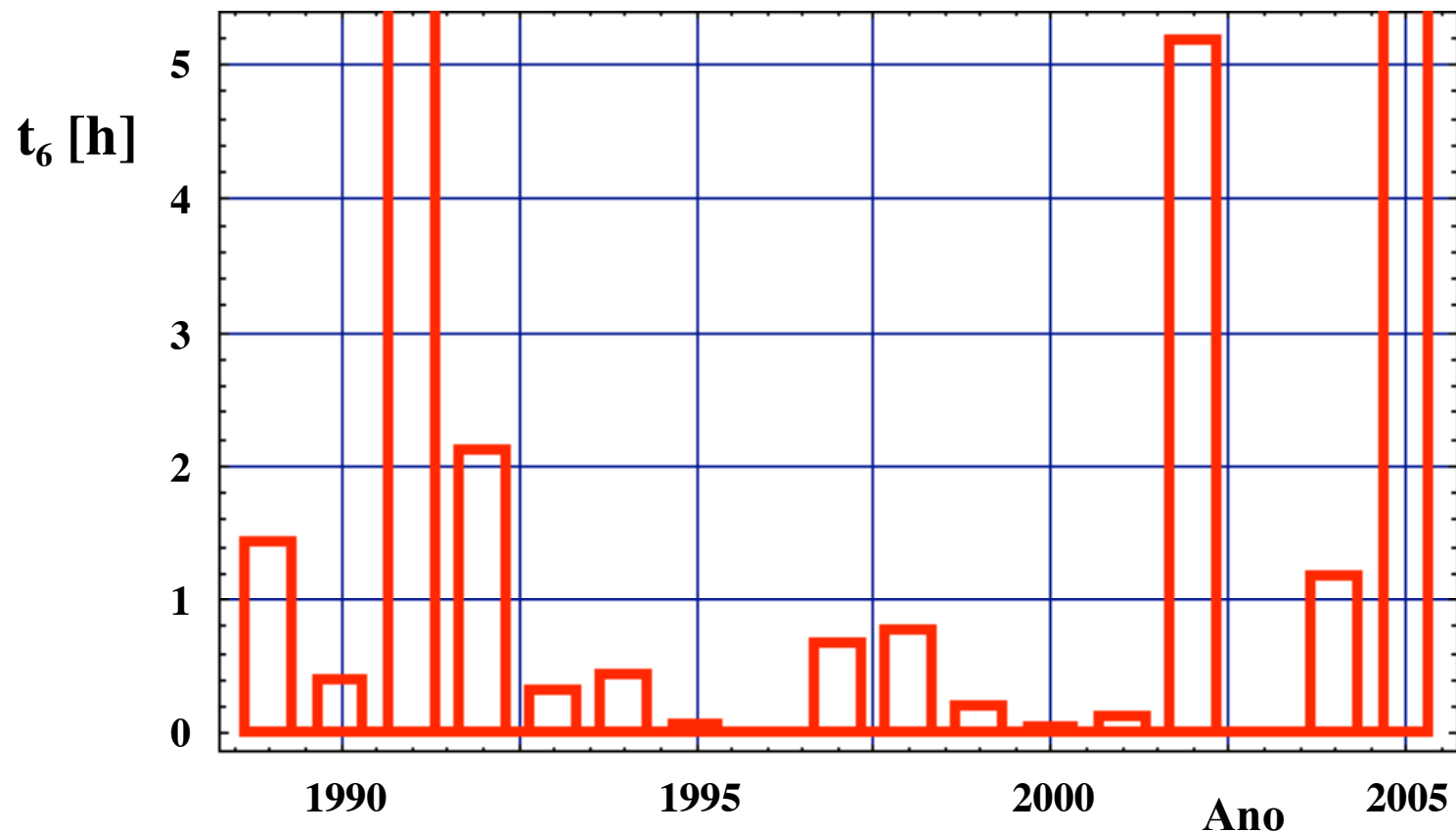


Fig. 4-18 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_6 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por “linha de transmissão”. O parâmetro t_6 variou de 0,0 h a 116,9 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 8,68 h . Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

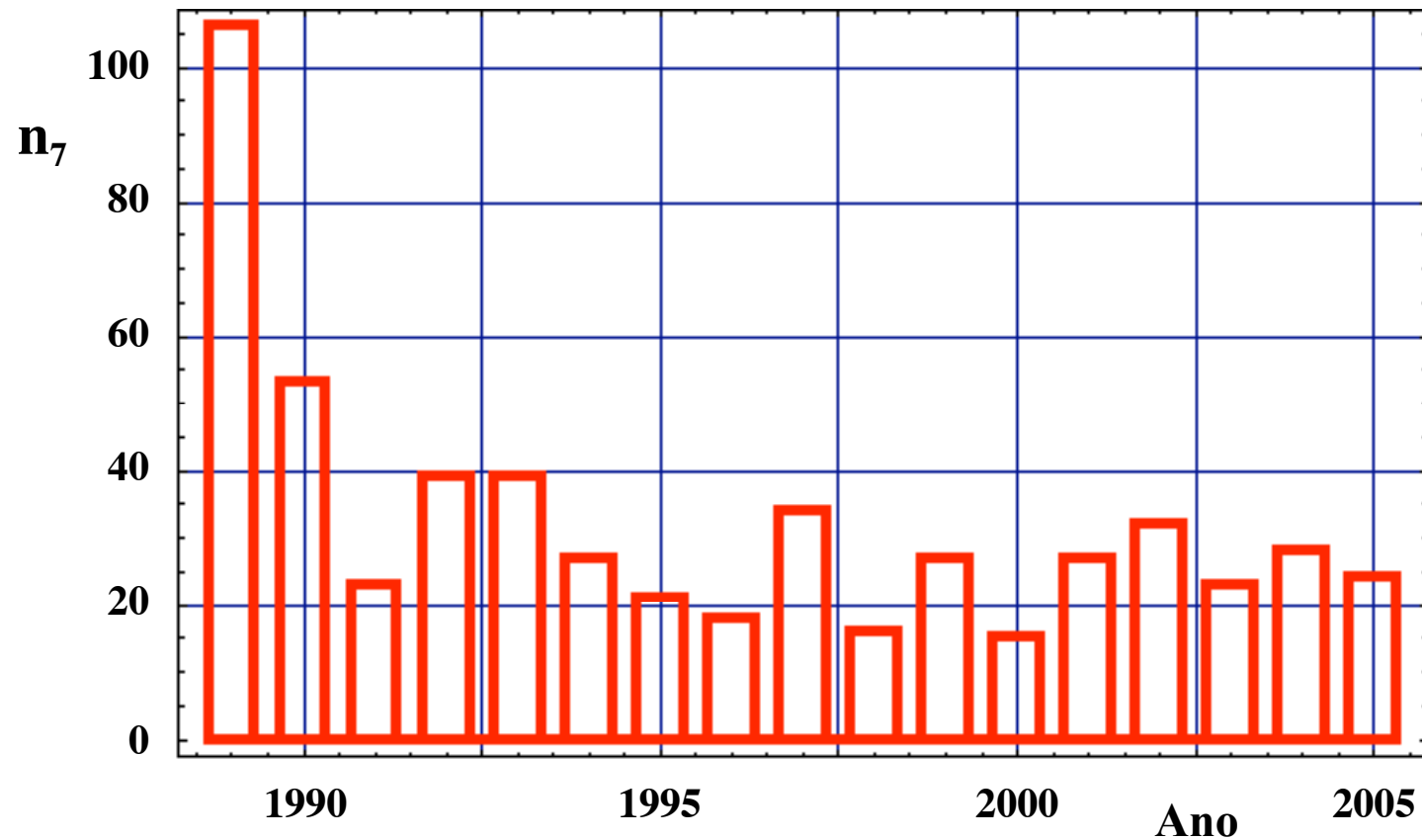


Fig. 4-19 – Variação, de 1989 a 2005, do número total, n_7 , de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por qualquer causa. O parâmetro n_7 variou de 15 a 106 e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 32,5 .

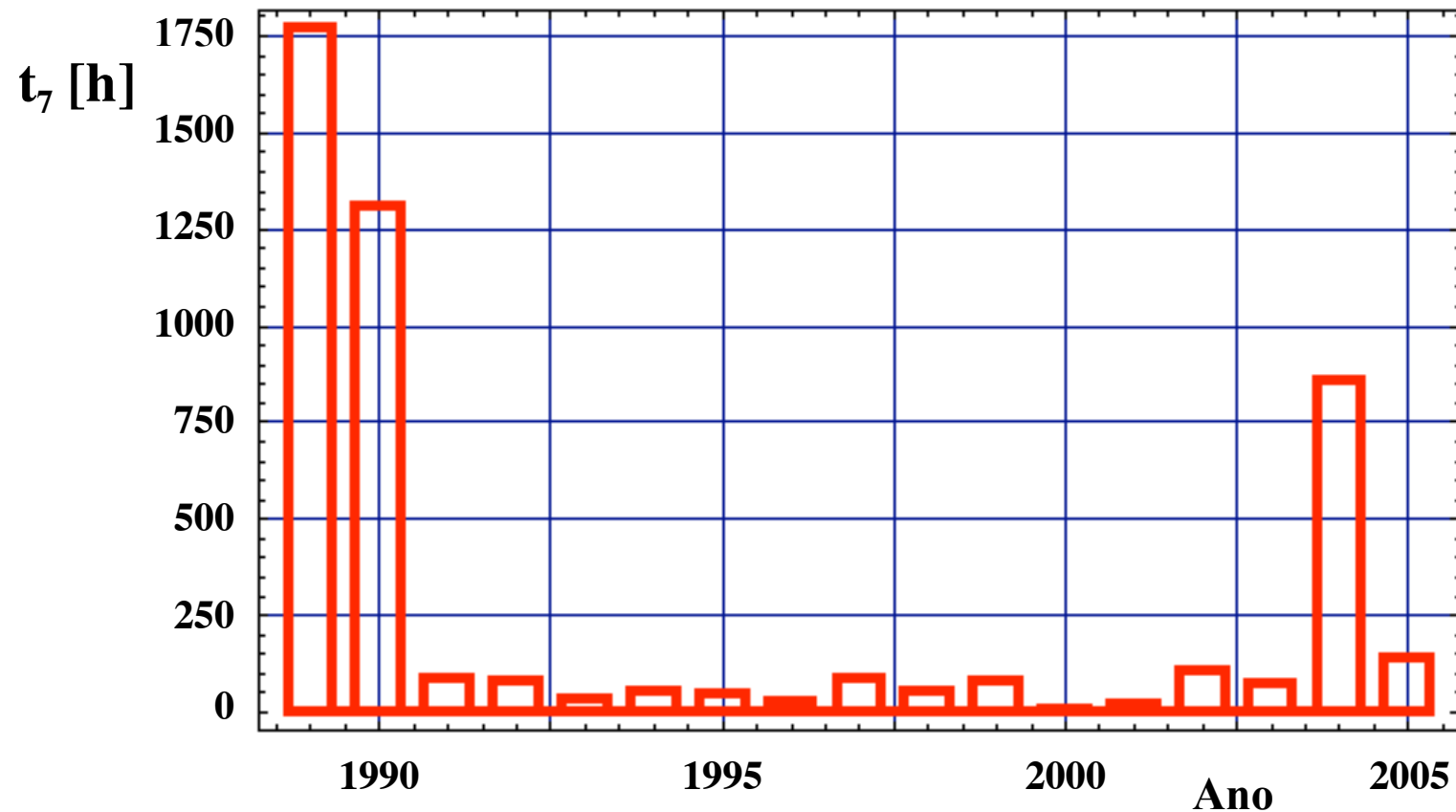


Fig. 4-20 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_7 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por qualquer causa. O parâmetro t_7 variou de 8,4 h a 1773 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 284 h.

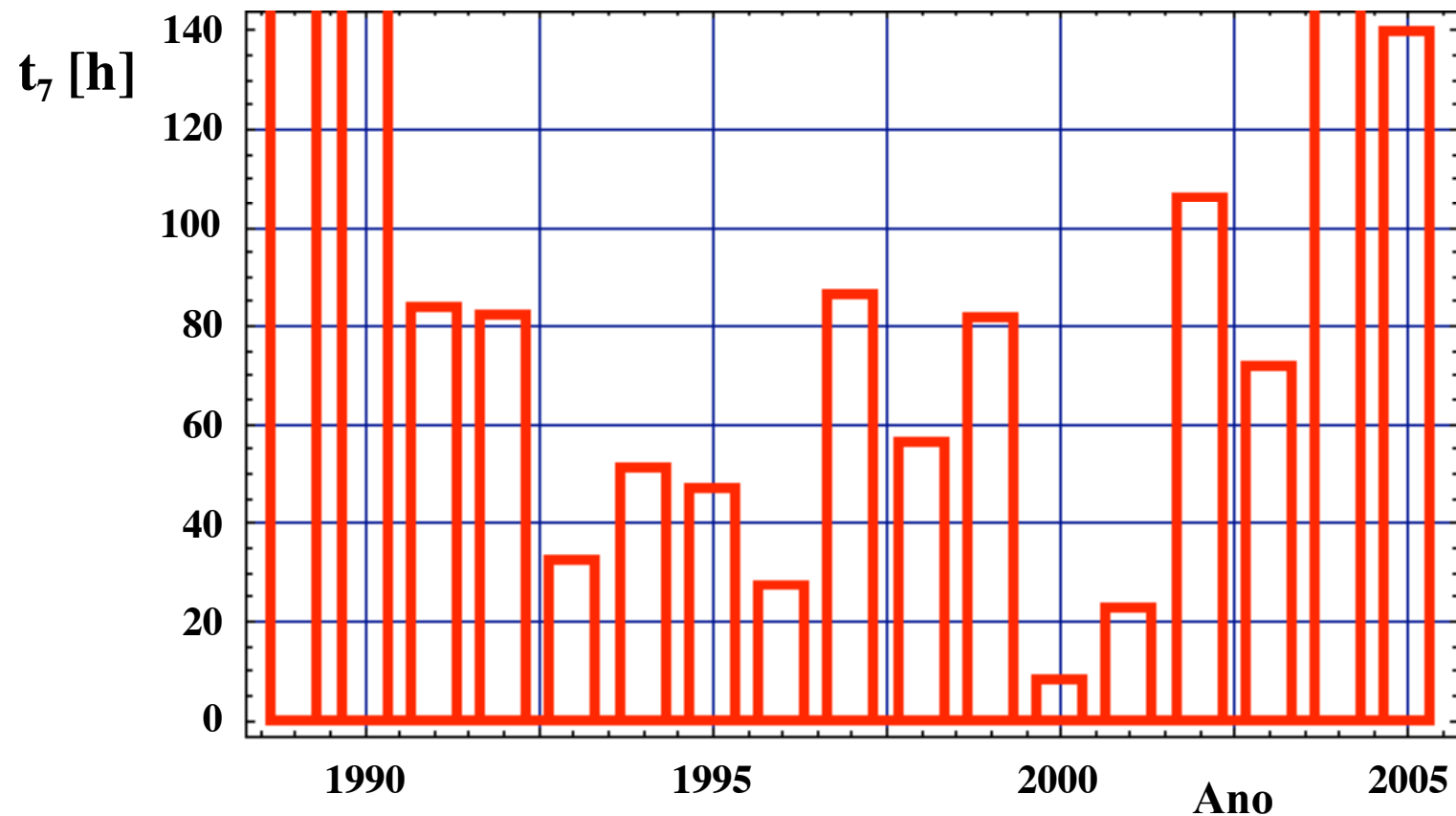


Fig. 4-21 – Variação, de 1989 a 2005, da duração, t_7 , expressa em hora, de saídas forçadas, por ano, em qualquer dos dois bipolos, do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, originadas por qualquer causa. O parâmetro t_7 variou de 8,4 h a 1773 h e o valor médio, de 1989 a 2005, foi 284 h. Esta figura difere da anterior em ter a escala de ordenadas truncada.

RESUMO DOS ELEMENTOS ESTATÍSTICOS DO ITEM 4.

Tabela 4-1

Saídas forçadas (excluindo os curto-circuitos eliminados com abertura e religamento do pólo afetado), de qualquer dos dois bipolos do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC

Número anual médio, n_k , e duração anual média, t_k , de 1989 a 2005

Parâmetros, n_k e t_k , segundo o tipo de “causa” e “totais”

k	Tipo de causa	n_k médio [/ano]	t_k médio [hora/ano]
1	Equipamento de “corrente alternada” e de “serv. aux.” das estações conv.	5,8	93,3
2	“Válvulas” das estações conversoras	1,3	151,7
3	Equipamento de “proteção e controle” das estações conversoras	10,4	12,5
4	Equipamento de “corrente contínua” das estações conversoras	3,3	12,6
5	Equipamento classificado como “outros” das estações conversoras	7,9	5,7
	Total parcial relativo a causas em estações conversoras (k de 1 a 5)	28,7	275,6
6	“Linha de transmissão”	3,8	8,7
7	Total (k de 1 a 6)	32,5	284,3

5. – Análise de alguns aspectos dos critérios de projeto e de condicionamentos de desempenho operacional das várias alternativas a considerar para a transmissão da energia das usinas de Santo Antônio e Jirau para o Sudeste

5.1 – Introdução

Para a análise da importância de alguns aspectos dos critérios de projeto e de diferenças de condicionamentos de desempenho operacional das várias alternativas a considerar para a transmissão da energia das usinas de Santo Antônio e Jirau para o Sudeste, tomo como base:

- A análise de alguns aspectos estatísticos do comportamento operacional dos Sistemas de Transmissão de Itaipu, quer em corrente alternada (apresentada no item 2.), quer em corrente contínua (apresentada nos itens 3. e 4.).**
- Informações relativas aos critérios e opções usados no Sistema de Transmissão de Itaipu e, para algumas das alternativas, informações constantes de [2] , [3] e [5] .**

Nos itens 5.2 , 5.3 , 5.4 , apresenta-se a análise em causa para, respectivamente, os seguintes tipos de alternativas:

- Alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com pouco mais de meia onda (*meia onda +*) com linhas de transmissão não convencionais (*LNCs*).**
- Alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com subestações intermediárias e compensação reativa elevada, quer em derivação, quer em série.**
- Alternativas em corrente contínua.**

5.2 – Alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com pouco mais de meia onda (*meia onda* +) com linhas de transmissão não convencionais (*LNCs*)

Começo por reproduzir, na página seguinte, o resumo dos elementos estatísticos do item 2. :

RESUMO DOS ELEMENTOS ESTATÍSTICOS DO ITEM 2.

Tabela 2-1

Número médio, por 100 km de linha e por ano, de curto-circuitos, nas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA, de 1984 a 2005

Número médio, total e segundo o tipo de “causa”

n	Tipo de causa	n médio [/100 km/ano]
n_d	Descargas atmosféricas	0,251 [¹]
n_q	Queimadas	0,097 [¹]
n_v	Queda de estruturas	0,038 [²]
n_t	Total (incluindo todos os tipos de “causas”)	0,386 [¹] [²]

[¹] As linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA não operam com religamento monofásico. A adoção de religamento monofásico rápido, adequado, permitiria eliminar cerca de 80 % dos curto-circuitos originados por descargas atmosféricas e uma parte importante dos curto-circuitos originados por queimadas, apenas com atuação de abertura e religamento monofásico. Seria possível, dessa forma, que esses curto-circuitos tivessem efeitos perturbadores bastante reduzidos.

[²] Uma informação, com pequena margem de erro, sobre as características estatísticas dos ventos e uma análise estatística cuidadosa do risco de queda de torres, em função dos critérios de projeto, permitem, em projetos futuros, reduzir significativamente a probabilidade de queda de torres.

Tem interesse, para situar a importância e a necessidade de selecionar adequadamente os critérios de projeto, notar o seguinte”:

- **O desempenho das linhas de CA do Sistema de Transmissão de Itaipu, em CA, quanto a descargas atmosféricas, tem sido muito bom e, inclusivamente, bastante melhor que o “limite” estabelecido (1 curto-circuito por 100 km e por ano). Todavia, esse resultado:**
 - **Foi consequência de alterações importantes, em relação aos critérios “usuais”, na época, e às recomendações do “livro vermelho”, no que respeita a modelagem física dos efeitos das descargas atmosféricas e ao tipo e qualidade das informações a usar no projeto. Essas alterações só foram conseguidas, por pressão do signatário, após discussões, comparações de critérios e metodologias, e contestações, bastante demoradas. Se se tivesse seguido os critérios “usuais”, sem análise crítica, o desempenho seria muito pior que o “limite” estabelecido. Infelizmente, alguns projetos recentes, adotando “tecnologias do primeiro mundo”, conduziram a resultados péssimos, evitáveis se não se tivesse perdido a “cultura” resultante do esforço do Brasil no projeto de Itaipu.**
 - **Implicou em alterações significativas (mas praticamente sem aumento de custo) em relação a uma primeira versão do projeto das linhas feito com base nos “critérios” usuais.**
- **O número de curto-circuitos originados por queimadas, embora, em média, sensivelmente menor que o número de curto-circuitos originados por descargas atmosféricas, é importante. Aparentemente, está associado a queimadas para limpeza de vegetação para plantação de cana, na região atravessada pelas linhas. Aconselha precauções a nível “cultural” e “regulamentar”, no sentido de disciplinar o uso de queimadas.**

- **As linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA não operam com abertura e religamento monofásico. A adoção de abertura e religamento monofásico rápido, adequado, permitiria eliminar cerca de 80 % dos curto-circuitos originados por descargas atmosféricas e uma parte importante dos curto-circuitos originados por queimadas, apenas com atuação de abertura e religamento monofásico. Seria possível, dessa forma, que esses curto-circuitos tivessem efeitos perturbadores bastante reduzidos.**
- **Embora o número de curto-circuitos originados por queda de torres (no caso provocada por ventos muito fortes) seja bastante menor que o originado por descargas atmosféricas, e, até, menor que o originado por queimadas, o seu impacto é importante, pelos seguintes motivos:**
 - **A queda de torres provoca uma indisponibilidade da linha com elevada duração e custo de reparação apreciável.**
 - **O curto-circuito não pode ser eliminado com abertura e religamento monofásico.**
 - **No caso de linhas de transmissão próximas, há probabilidade apreciável de ocorrer queda de torres com intervalo de tempo curto em duas ou mais linhas, com indisponibilidade simultânea e prolongada em mais de uma linha, o que ocorreu no Sistema de Transmissão de Itaipu em CA.**
- **Nota-se que, em termos de projeto das linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu, no que respeita a ventos:**
 - **Segundo a norma brasileira aplicável, o projeto deveria considerar um vento com velocidade máxima de referência 110 km/h . Este valor afigurou-se reduzido, e, não se dispondo de informações pormenorizadas, optou-se por considerar 150 km/h , o que implicou num aumento de 86 % das forças originadas pelo vento nos cabos e estruturas.**

- **A experiência de operação mostrou que, para os ventos em parte da região atravessada pelas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu, seria adequado considerar velocidade máxima de referência mais elevada.**

Em termos de projetos futuros de linhas de transmissão em corrente alternada, considero importante:

- a – Ter informações confiáveis sobre os condicionamentos, ao longo do traçado das linhas, relativos a:**
 - a.1 – Ventos, em aspectos importantes para solicitações mecânicas desfavoráveis.**
 - a.2 – Ventos, temperatura do ar e radiação solar direta e difusa, em aspectos importantes para aquecimento e envelhecimento de condutores e perdas.**
 - a.3 – Chuva, nevoeiro e poluição do ar (incluindo efeito de queimadas), em aspectos importantes para coordenação de isolamento e poluição de isoladores.**
 - a.4 – Densidade de descargas atmosféricas.**
 - a.5 – Características do solo, em aspectos importantes para fundações.**
 - a.6 – Características do solo, em aspectos importantes para parâmetros elétricos das linhas, nomeadamente medições efetuadas de parâmetros elétricos do solo ao longo do traçado.**
 - a.7 – Características do solo, em aspectos importantes para corrosão de fundações.**
 - a.8 – Condicionamentos relativos a probabilidade e severidade de queimadas.**
- b – Considerar metodologias de cálculo e simulação fisicamente robustas e adequadamente validadas, o que, infelizmente, não é o caso de parte das metodologias de uso mais freqüente.**

c – Adotar procedimentos que assegurem elevada probabilidade de extinção de arco secundário, para curto-circuitos monofásicos, usando abertura e religamento monofásico.

No caso de alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com pouco mais de meia onda (*meia onda* +) com linhas de transmissão não convencionais (*LNCs*), as perturbações do sistema de transmissão estão associadas, essencialmente, a curto-circuitos nas linhas. Por este motivo, e com um projeto adequado, e consoante os requisitos de otimização do projeto, é possível obter um número de curto-circuitos similar, ou inferior, ao número de curto-circuitos originados por descargas atmosféricas no Sistema de Transmissão de Itaipu em CA, que é da ordem de 0,25 curto-circuitos por 100 km e por ano, dos quais cerca de 80 % podem ser eliminados com abertura e religamento monofásico, e parte dos 20 % restantes pode ser eliminada com abertura e religamento trifásico rápido.

5.3 – Alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com subestações intermediárias e compensação reativa elevada, quer em derivação, quer em série

No caso de alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com subestações intermediárias e compensação reativa elevada, quer em derivação, quer em série, similares a alguns troncos de transmissão recentes:

- **Estritamente no que respeita às linhas de transmissão propriamente ditas, tem-se condicionamentos similares aos indicados no item 5.2 , exceto no que respeita a abertura e religamento monofásico que, eventualmente, é inviabilizado por condicionamentos dos sistemas de compensação, e, eventualmente, também no que respeita a abertura e religamento trifásico rápido, por motivo semelhante.**
- **As subestações intermediárias e os sistemas de compensação originam, frequentemente, perturbações de diversos tipos, em grande parte dos casos associadas a diversos tipos de ressonâncias relacionadas com níveis de compensação elevados. Não está no escopo deste documento uma análise pormenorizada dos diferentes tipos de potenciais ressonâncias e seus efeitos. Transcrevo, apenas, para situar a importância do assunto, a seguinte passagem de [3], que apresenta uma análise de “*Ressonâncias na Interligação Norte-Sul*”:**

Início da transcrição

...

Desde a entrada em operação do segundo circuito, em 2004, a Interligação Norte-Sul vem sofrendo desligamentos sucessivos e danos a equipamentos como queima de bancos de capacitores, explosões de MOV's (Metal Oxide Varistors) e conseqüente perda significativa da confiabilidade.

Na tabela 1 é apresentado o número de desligamentos ocorridos por tipos de defeitos entre janeiro e dezembro de 2005 (fonte: ONS) considerando o trecho Imperatriz – Serra da Mesa.

Desses desligamentos, 84,6 % ocorreram entre os ciclos de carga média e leve.

Tabela 1 – desligamentos na Norte-Sul

Tipos de defeito	Quantidade
Curtos-circuitos	84
TCSC's (by pass) – sem curto	24
Aquecimento (óleo) – Lajeado	10
Total	118

Admitindo cada circuito com 1031 km, temos 5,72 defeitos/100 km/ano. O que configura, em média, 1 desligamento a cada 3 dias. Considerando que para LT's desse tipo é recomendável uma taxa da ordem de 0,5 defeitos/100km/ano, temos, nesse caso, uma taxa 11,44 vezes maior.

Os defeitos indicados caracterizam-se por crescimento súbito da corrente em regime podendo atingir valores muito elevados, ou moderadamente altos provocando curtos, conseqüentes de sobretensões, ou aquecimentos.

...

Fim da transcrição

- Além dos condicionamentos de desempenho acima exemplificados, no caso dos sistemas de transmissão a que se refere este item 5.3 (alternativas, em corrente alternada, baseadas em troncos com subestações intermediárias e compensação reativa elevada, quer em derivação, quer em série), além do custo da linha, tem-se o custo das subestações intermediárias e do equipamento de compensação, que agravam, e muito, o custo do sistema de transmissão, em comparação com as alternativas tratadas no item 5.2 (alternativas em corrente alternada, baseadas em troncos com pouco mais de meia onda (*meia onda* +) com linhas de transmissão não convencionais (*LNCs*)).

5.4 – Alternativas em corrente contínua

Começo por reproduzir, nas páginas seguintes, o resumo dos elementos estatísticos dos itens 3. e 4. ,

RESUMO DOS ELEMENTOS ESTATÍSTICOS DO ITEM 3.

Tabela 3-1

Número médio, de 1993 a 2005, por 100 km de linha e por ano, de curto-circuitos (num pólo), do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, excluindo os curto-circuitos originados por queda de torres

Número médio, total, e segundo o tipo de “consequência” quanto a eliminação do curto-circuito

n	Tipo de “consequência” quanto a eliminação do curto-circuito	n médio [/100 km/ano]
n_t	Total (incluindo todos os tipos de “consequências”)	0,811
n_{e1}	Eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 1 x 600 kV	0,544
n_{e2}	Eliminados com abertura e religamento do pólo com tensão 0,75 x 600 kV (mas não com 1 x 600 kV)	0,0716
n_{e3}	Eliminados com abertura e religamento do pólo (com tensão 1 x 600 kV ou 0,75 x 600 kV)	0,616
n_{ne}	Não eliminados com abertura e religamento do pólo (com tensão, quer 1 x 600 kV , quer 0,75 x 600 kV)	0,196

Tabela 3-2

Número médio, n_v , de 1993 a 2005, por 100 km de linha e por ano, de curto-circuitos (referidos a pólos afetados), originados por queda de torres, provocando curto-circuito, simultâneo, nos dois pólos de um mesmo bipolo, nas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC

n	Tipo de “ocorrência”	$n_{\text{médio}}$ [/100 km/ano]
n_v	Curto-circuitos originados por queda de torres	0,0286

RESUMO DOS ELEMENTOS ESTATÍSTICOS DO ITEM 4.

Tabela 4-1

Saídas forçadas (excluindo os curto-circuitos eliminados com abertura e religamento do pólo afetado), de qualquer dos dois bipolos do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC

Número anual médio, n_k , e duração anual média, t_k , de 1989 a 2005

Parâmetros, n_k e t_k , segundo o tipo de “causa” e “totais”

k	Tipo de causa	n_k médio [/ano]	t_k médio [hora/ano]
1	Equipamento de “corrente alternada” e de “serv. aux.” das estações conv.	5,8	93,3
2	“Válvulas” das estações conversoras	1,3	151,7
3	Equipamento de “proteção e controle” das estações conversoras	10,4	12,5
4	Equipamento de “corrente contínua” das estações conversoras	3,3	12,6
5	Equipamento classificado como “outros” das estações conversoras	7,9	5,7
	Total parcial relativo a causas em estações conversoras (k de 1 a 5)	28,7	275,6
6	“Linha de transmissão”	3,8	8,7
7	Total (k de 1 a 6)	32,5	284,3

Preliminarmente, cabe notar que as estatísticas dos itens 3. e 4. (relativas ao Sistema de Transmissão de Itaipu em CC) não são diretamente comparáveis com a estatística do item 2. (relativas ao Sistema de Transmissão de Itaipu em CA), nomeadamente devido aos seguintes aspectos:

- A estatística de 2. cobre o período 1984-2005, a de 3. , 1993-2005, e, a de 4. , 1989-2005.**
- A estatística do item 2. está discriminada segundo as “causas” dos curto-circuitos na linha, a do item 3. , segundo as “conseqüências” (exceto quanto a queda de estruturas) e, provavelmente, engloba, sem identificação, alguns casos, não quantificados, em que a causa foi externa à linha, e, a do item 4. , considera apenas, as saídas forçadas da linha, não incluindo os curto-circuitos eliminados com abertura e religamento de um pólo.**

As diferenças em causa, todavia, são relativamente secundárias, para os objetivos essenciais da análise aqui apresentada.

Tem interesse, para situar a importância e a necessidade de selecionar adequadamente os critérios de projeto, notar o seguinte:

- No desempenho das linhas de CC do Sistema de Transmissão de Itaipu, em CC, não está discriminado o número de curto-circuitos originados por descargas atmosféricas, por queimadas, por causas associadas às estações conversoras, por causas associadas a poluição e qualidade de parte dos isoladores quanto a condicionamentos específicos de corrente contínua, por exemplo:**
 - Grande influência da poluição, de orvalho e de chuva fraca na distribuição de tensão ao longo das cadeias.**

- Migração lenta de compostos de sódio para a superfície e deterioração superficial dos isoladores.
- Influência da carga espacial na distribuição de tensão ao longo das cadeias, especialmente com vento muito reduzido.
- De qualquer forma, o comportamento das linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, quanto a descargas atmosféricas, tem sido bastante bom e, inclusivamente, muito melhor que o “limite” estabelecido (1 curto-circuito por 100 km e por ano). Todavia, esse resultado, semelhantemente ao que aconteceu com as linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CA, embora com aspectos um tanto diferentes:
 - Foi consequência de alterações importantes, em relação aos critérios indicados e defendidos veementemente por *especialistas do Primeiro Mundo*, no que respeita a modelagem física dos efeitos das descargas atmosféricas e ao tipo e qualidade das informações a usar no projeto. Essas alterações só foram conseguidas, por pressão do signatário, após discussões, comparações de critérios e metodologias, e contestações, bastante demoradas. Se se tivesse seguido os critérios propostos pelos *especialistas*, sem análise crítica, o desempenho seria muito pior que o “limite” estabelecido.
 - Implicou em alterações significativas (mas praticamente sem aumento de custo) em relação a uma primeira versão do projeto das linhas baseada nos critérios indicados pelos *especialistas*.
- O comportamento das linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, quanto a número de curto-circuitos nas linhas de transmissão originados, quer por descargas atmosféricas, quer por queimadas, quer por causas associadas às estações conversoras, quer por causas associadas a poluição e qualidade de parte dos isoladores quanto a condicionamentos específicos de corrente

contínua, tem sido bastante bom e, inclusivamente, melhor que o “limite” estabelecido (1 curto-circuito por 100 km e por ano) como critério de projeto, para curto-circuitos originados, apenas, por descargas atmosféricas. Esse resultado é consequência do comportamento quanto a descargas atmosféricas comentado acima e de diversas outras cautelas tomadas no projeto das linhas.

- No que respeita a queda de estruturas, originadas por ventos fortes, em termos de comportamento, quanto a incidência estatística, causas e efeitos, e em termos de precauções relativas a eventuais projetos futuros, são aplicáveis comentários análogos ou semelhantes aos apresentados no item 5.2 .
- Diferentemente do que sucede no Sistema de Transmissão de Itaipu em CA, no Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, a grande maioria das saídas forçadas dos bipolos (88 % em número e 97% em duração) resultou das estações conversoras. Portanto, o problema básico das perturbações forçadas da transmissão em CC e do número e consequências dessas perturbações, quer em termos de confiabilidade de transmissão, quer em termos de eventual impacto desfavorável no equipamentos de consumidores, usinas, sistemas de transmissão, incluindo risco de desencadear disparos em cascata e “apagões”, está associado às estações conversoras.
- No início de operação do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, surgiu um elevado número de problemas que evidenciaram grande número de erros e deficiências de projeto. A história do assunto é triste e não considero imprescindível discuti-la aqui. Alguns erros de identificação e eliminação simples foram corrigidos. Todavia, em minha opinião, permaneceram problemas importantes, resultantes de condicionamentos físicos básicos, cuja correção implicaria em alterações conceituais de projeto e que, intermitentemente [5], originam defeitos graves em equipamento das estações conversoras. Cabe notar que os elementos estatísticos das análises

apresentadas no itens 3. e 4. excluem os primeiros anos de operação do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, durante os quais os erros de identificação e eliminação simples foram corrigidos. Portanto, os erros que foram corrigidos não afetam as análises dos itens 3. e 4. .

- Passou-se entretanto um quarto de século. Seria de esperar que os problemas resultantes de concepção de projeto de equipamento das estações conversoras do Sistema Transmissão de Itaipu em CC tivessem sido corretamente identificados e corrigidos, e não houvesse motivo para considerá-los em projetos futuros. A esperança pode ser ledó engano. Pouco depois da entrada em operação dos primeiros sistemas de transmissão em CC instalados recentemente na China, segundo [2] foram encontrados problemas semelhantes aos problemas que, em minha opinião, não foram adequadamente corrigidos no Sistema Transmissão de Itaipu em CC.

Em suma, quanto a alternativas em CC para a ligação das usinas de Santo Antônio e Jirau ao Sudeste:

- No que respeita estritamente a curto-circuitos originados pelas linhas de transmissão, com um projeto adequado, e consoante os requisitos de otimização do projeto, é possível obter, numa eventual futura linha de transmissão em CC, um número de curto-circuitos, por unidade de comprimento, similar, ou inferior, ao número de curto-circuitos originados pelas linhas do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC. Os requisitos e cautelas de projeto adequado são similares aos indicados no item 5.2 , naturalmente com complementações referentes a alguns problemas específicos de linhas de corrente contínua.

- Há um problema técnico básico das alternativas em CC para a ligação das usinas de Santo Antônio e Jirau ao Sudeste, relacionado com as saídas forçadas dos bipolos e perturbações da transmissão em CC originadas pelas estações conversoras e com o número e conseqüências dessas perturbações, quer em termos de confiabilidade de transmissão, quer em termos de eventual impacto desfavorável no equipamentos de consumidores, usinas, sistemas de transmissão, incluindo risco de desencadear disparos em cascata e “apagões”. No caso do Sistema de Transmissão de Itaipu em CC, este problema origina a grande maioria das saídas forçadas dos bipolos (88 % em número e 97% em duração), e há indícios fortes de que o problema se pode repetir se não forem tomadas precauções adequadas de projeto e especificação.
- Há diversos outros problemas técnicos que não são triviais e que, em minha opinião, carecem de precauções cuidadosas de projeto e especificação. Não cabe listar aqui esses problemas. Apenas como exemplo, cito os eletrodos de terra, os condicionamentos de eventual retorno metálico, os condicionamentos de gama (algébrica) de potência transmitida, incluindo eventual passagem por zero e mudança de sentido, diversos aspectos de coordenação de isolamento.

6. – Publicações citadas expressamente

- [1] P. C. Esmeraldo – Brazilian Experience on HVDC \pm 600 kV & HVAC 765 kV Transmission Systems – International Workshop on UHV Transmission Systems 2006, November 28-29th 2006 – Beijing, China**
- [2] Licheng Lu – Research on the UHVDC converter transformer – P 17 – IEC/CIGRE UHV Symposium - July 18-21th 2007 – Beijing, China**
- [3] P. C. Fernandes – Ressonâncias na Interligação Norte-Sul – SP-043 – X SEPOPE Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 21-25th 2006 – Florianópolis (SC), Brasil**
- [4] M. Tolmasquim, J. Farias, A. Guerreiro, S. Cunha – Desafios da EPE no Planejamento Energético Nacional – IP-034 – X SEPOPE Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, May 21-25th 2006 – Florianópolis (SC), Brasil**
- [5] G. M. Bastos, J. C. Brandão, J. Santelli, R. Albuquerque, S. Arenare, J. C. Mendes, J. Hajek – HVDC Converter Transformer Performance on Itaipu System – B4-201 – CIGRE 2006, August 27th - September 1th 2006 – Paris, França**