



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GIA/11

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS - GIA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AMPLIAÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS DISPONÍVEIS, E AS POSSÍVEIS
ALTERAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO DE VERTEDORES**

**Marcos Vinicius Andriolo (*)
COPEL GeT**

RESUMO

Nos últimos anos uma série de trabalhos científicos veem apresentando o impacto que as possíveis mudanças climáticas podem provocar no meio terrestre. Entre vários fatores o IPCC alerta em seu relatório o possível impacto destas variações nos eventos extremos, estes podendo ser: temperaturas mínimas e máximas, precipitações máximas, secas, entre outros.

O sistema elétrico brasileiro conta como principal fonte de suprimento o sistema hidroenergético, que podem ser diretamente afetado por alterações na dinâmica dos eventos extremos. Quando se avalia a segurança hídrica dos reservatórios, a capacidade dos vertedores e o amortecimento das ondas de cheia nos mesmos são de suma importância.

PALAVRAS-CHAVE

Mudanças Climáticas, vazões de dimensionamento de vertedores.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos uma série de trabalhos científicos vem apresentando o impacto que as possíveis mudanças climáticas podem provocar no meio terrestre. Entre vários fatores o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) alerta em seu relatório publicado em 2013 o possível impacto destas variações nos eventos extremos, estes podendo ser: temperaturas mínimas e máximas, precipitações máximas, secas, entre outros.

O sistema elétrico brasileiro conta como principal fonte de suprimento o sistema hidroenergético, que podem ser diretamente afetado por alterações na dinâmica dos eventos extremos. Quando se avalia a segurança hídrica dos reservatórios, a capacidade dos vertedores e o amortecimento das ondas de cheia nos mesmos são de suma importância.

Estudos que consideram como dado de entrada o aumento de precipitação indicado pelo IPCC em determinadas regiões, demonstram um aumento na vazão extrema (Adam K., et al. (2015), Wu et al. (2015)), vazões estas utilizadas no dimensionamento de vertedores.

2.0 - VAZÃO DE DIMENSIONAMENTO DE VERTEDORES

O Critério de Projeto Civil da Eletrobras (2003) recomenda a utilização da cheia máxima provável para o dimensionamento de vertedores de barragens maiores que 30 m ou cujo colapso envolva risco de perdas de vidas

(*) Rua José Izidoro Biazzetto, 158 – CEP 81.200-240 Curitiba, PR – Brasil
Tel: (+55 41) 3331– Email: mvandriolo@yahoo.com.br

humanas (existência de habitações permanentes a jusante), sendo esta metodologia empregada nos mais recentes projetos de usinas hidroelétricas.

Outro método muito utilizado é o método direto, adotando como critério o tempo de recorrência de 10.000 anos (Eletrobras, 1987). Entre os métodos de análise de frequência de cheias, dois métodos muito utilizados são a distribuição exponencial e a distribuição de Gumbel, sendo o critério de escolha a assimetria da população. Normalmente para assimetria inferior a 1,5 se escolhe a distribuição de Gumbel e superior a exponencial.

As séries de vazões diárias, utilizadas no cálculo de vazões para determinado tempo de recorrência, são constantemente atualizadas, aumentando assim o tamanho da amostra. Entretanto, séries com 30, 40, 50 anos de dados, são relativamente curtas para se estimar uma vazão com recorrência de 10.000 anos (Da Costa et al., 1981). Quando se incorpora novos dados e se recalcula a vazão decamilenar a mesma sofre alterações, em alguns casos alterações relevantes.

Para avaliar a influência da incorporação de novos dados as séries de vazões máximas diárias existentes até determinada data, utilizou-se a série de vazões máximas diárias naturalizadas disponibilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), em aproximadamente 150 locais.

Simulando a vazão decamilenar conforme os critérios normalmente utilizados (Eletrobrás, 2003) e adotando como critério de cálculo séries com no mínimo 30 anos de dados, calculou-se a vazão decamilenar utilizando os dados entre os anos de 1931 até 1970 (40 anos), 1931 até 1980 (50 anos), e assim sucessivamente até os anos 1990, 2000, 2010 e 2014. Com a vazão decamilenar calculada para cada período parcial (1931-1970, 1931-1980, e assim sucessivamente), comparou-se esta vazão decamilenar (série parcial) com a vazão decamilenar utilizando todos os dados disponíveis, ou seja, desde o ano de 1931 até o ano de 2014. A Tabela 1 apresenta o número de locais que foi possível calcular a vazão decamilenar conforme a disponibilidade de dados, sendo verificado se esta vazão decamilenar resultante da série parcial era maior ou menor que a vazão decamilenar calculada utilizando a série completa (1931-2014). Sendo: “aumentou” significa que a decamilenar calculada com a série completa (1931-2014) é maior que a decamilenar calculada com a série parcial e “diminuiu” significa que a vazão decamilenar calculada com a série completa é menor que a decamilenar calculada com a série parcial de dados.

Tabela 1 – Número de locais disponíveis para cálculo da vazão decamilenar

Período de cálculo da vazão decamilenar	Número total de locais	nº onde aumentou	nº onde diminuiu
1931 até 1970	76	34	42
1931 até 1980	90	55	35
1931 até 1990	103	32	71
1931 até 2000	123	32	91
1931 até 2010	143	32	111
1931 até 2014	147	-	-

A Figura 1 apresenta a relação entre a vazão decamilenar calculada utilizando a série parcial, e a vazão decamilenar utilizando a série completa. É possível verificar uma grande variabilidade entre esta relação, sendo verificadas relações mínimas entre 0,59 e máxima de 3,25. Ou seja, em determinado local a vazão decamilenar é 225% maior (3,25) quando se compara a vazão decamilenar calculada utilizando os dados de 1931 até 1970 e com os dados de 1931 até 2014.

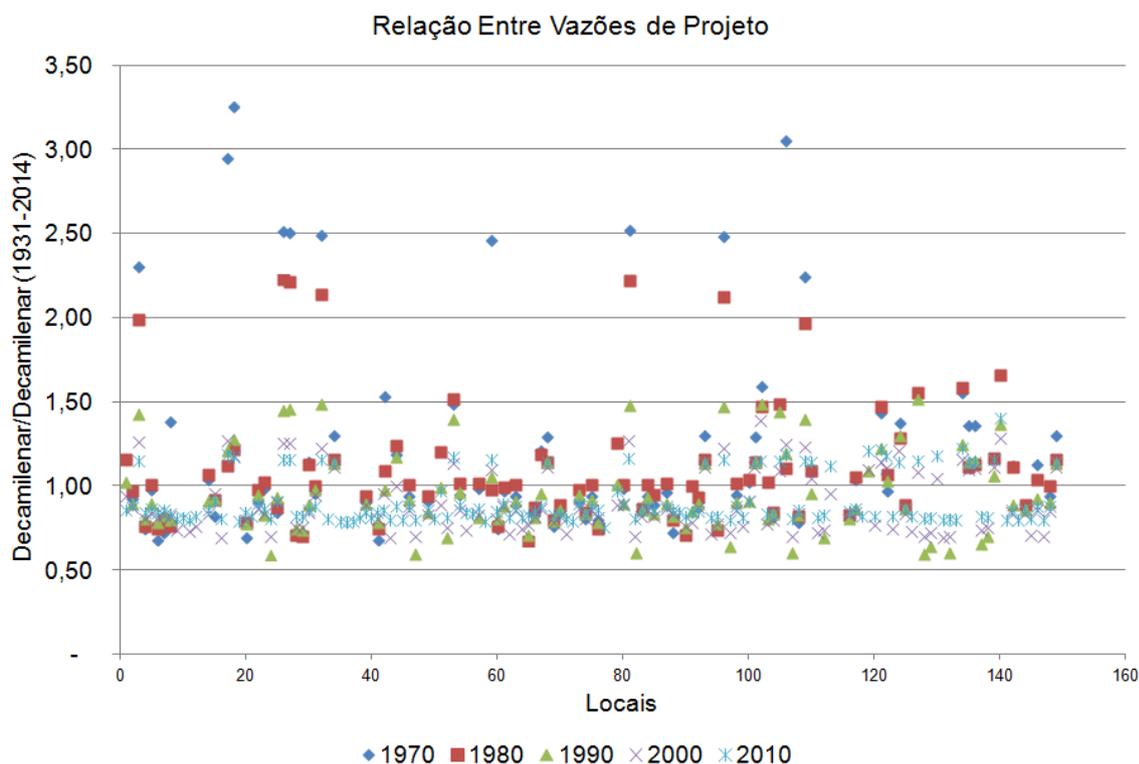


Figura 1 – Relação entre vazões decamilenar parcial (1931 – x) e completa (1931-2014)

Considerando séries com no mínimo 30 anos de dados, verificou-se que a vazão decamilenar aumentou em 34 locais e reduziu em 42 locais, quando se compara a vazão decamilenar calculada utilizando dados de 1931 até 1970 (parcial) e 1931 até 2014 (completa).

Considerando vazão decamilenar calculada utilizando dados de 1931 até 1980, 1931 até 1990, 1931 até 2000 e comparando os resultados com a série completa (1931 até 2014), verifica-se que a vazão decamilenar aumentou em 55 locais e reduziu em 35 locais; aumentou em 32 locais e reduziu em 71 locais; aumentou em 32 locais e reduziu em 91 locais, respectivamente.

Quando se compara usinas localizadas no sul do país, se verifica que a vazão decamilenar aumentou em 7 locais e reduziu em 10 locais, neste comparativo.

Quando se avalia as 5 maiores cheias registradas nos aproximadamente 150 locais com dados disponíveis, verifica-se que o maior número de vazões máximas ocorreram entre os anos de 1981 a 1990 e 1991 a 2000, como é possível verificar na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição das vazões máximas

Ano	Número de vazões máximas	Locais com dados	Percentual	Ano	Número de vazões máximas	Locais com dados	Percentual
1931 até 1940	11	55	4%	1971 até 1980	97	134	14%
1941 até 1950	48	81	11%	1981 até 1990	190	145	25%
1951 até 1960	14	92	3%	1991 até 2000	162	146	21%
1961 até 1970	51	107	9%	2001 até 2010	102	146	13%

A Figura 2 ilustra o comportamento da média relativa das vazões máximas anuais com dados disponíveis entre os anos de 1931 a 2014, utilizando a seguinte equação:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{V_{i,j}}{\bar{V}}$$

Sendo Q_i = Média das vazões absolutas disponíveis no ano i ; j – usina com vazão máxima anual disponível; \bar{V} = Média das vazões máximas anuais da usina j ; $V_{i,j}$ = Vazão máxima anual no ano i da usina j .

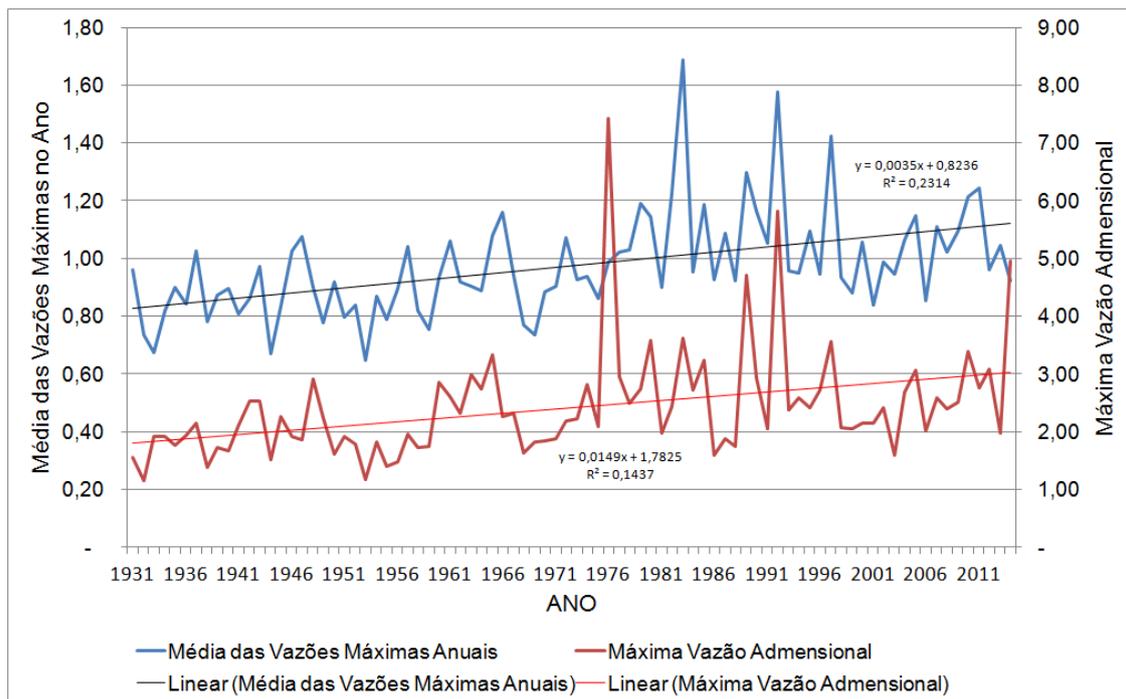


Figura 2 – Vazões médias e máximas adimensionalizadas (1931-2014)

Quando se insere uma linha de tendência nos dados da Figura 2 é possível visualizar um incremento ao longo do tempo, entretanto, o coeficiente de correlação desta suposta tendência é pequeno e fortemente influenciada pelas cheias dos anos de 1983, 1992 e 1997, quando se analisa a média das vazões adimensionais.

Quando se analisa a máxima vazão adimensionalizada, maior vazão adimensional de uma usina em relação a todas as outras usinas daquele ano, também se observa uma ligeira tendência de aumento. Entretanto, esta linha de tendência é influenciada pelas menores vazões máximas das décadas de 1930 a 1960, e também apresenta uma pequena correlação.

A Figura 3 apresenta a mesma série adimensionalizada que a contida na Figura 2 excluindo-se os anos de 1931 a 1959. A mesma linha de tendência inserida apresenta uma ascensão muito inferior daquelas linhas de tendência apresentadas na Figura 2. Isso, em princípio, demonstra que a suposta tendência é muito mais influenciada pela extensão da série do que pela série propriamente dita.

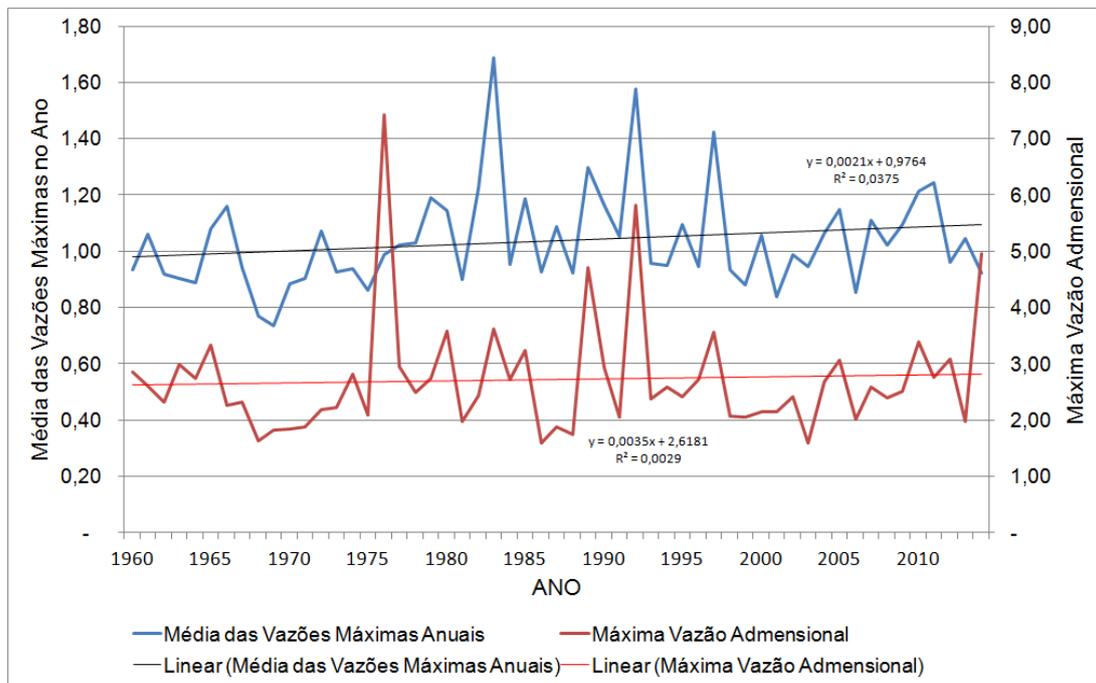


Figura 3 – Vazões médias e máximas adimensionalizadas (1931-2014)

Quando se estima as vazões decamilenares, ou extremas, a disponibilidade de dados (inferior a 100 anos) impõe uma incerteza muito grande na estimativa, visto que se tenta com as diversas técnicas “extender” a série em 100 vezes. Por exemplo, Kelman e Damázio (1985) propõe um coeficiente de segurança para a estimativa da vazão decamilenar conforme a disponibilidade dos dados.

2.1 Estacionariedade da série e teste de hipótese

O termo “estacionariedade” refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias, as observações são invariantes, com relação à cronologia de suas ocorrências. Uma tendência temporal, eventualmente presente em uma série hidrológica X_t , ao longo do tempo t , pode ser detectada pela correlação entre série e o índice de tempo. Essa é a ideia essencial do teste não-paramétrico de Spearman (Naghetini, 2007).

O coeficiente de correlação de Spearman obtém a estatística correspondente do teste trabalhando com toda a amostra. Para se verificar se uma série é estacionária ou não, é possível fazer um teste de hipótese.

Os testes de hipóteses são procedimentos usuais da inferência estatística, úteis na tomada de decisões que concernem à forma, ou ao valor de certo parâmetro, de uma distribuição de probabilidades, da qual se conhece apenas uma amostra de observações. Por tratar-se de uma inferência a respeito de uma variável aleatória, a decisão de rejeitar ou não uma hipótese, é tomada com base em certa probabilidade ou nível de significância α (Naghetini, 2007).

2.1.1 Teste de Spearman

A estatística do teste de Spearman tem, como base, o seguinte coeficiente:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N}$$

Sendo: m_T = ordem de classificação; T_t = índice de tempo; N = número de elementos.

Se a hipótese nula é H_0 : (a amostra não apresenta tendência temporal), a estatística do teste não paramétrico de Spearman pode ser formulado como:

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{\text{Var}[r_s]}}$$

A qual segue uma distribuição normal padrão. Por tratar-se de um teste bilateral, a um nível de significância α , a decisão deve ser a de rejeitar a hipótese nula se $|T| > Z_{1-\alpha/2}$.

Aplicando o teste de estacionariedade de Spearman nos dados disponíveis das séries de máxima vazão média diária, entre os anos de 1931 até 2014, se verifica que em 95 locais a série pode ser considerada estacionária e em 53 locais não.

3.0 - CONCLUSÃO

Os dados analisados compreendem as vazões máximas diárias anuais, entre os anos de 1931 até 2014, em 149 locais com dados disponíveis, totalizando aproximadamente 10.000 valores de vazões máximas diárias no ano disponíveis nestes locais.

Os resultados obtidos indicam que até o presente não se pode afirmar que houve impacto das mudanças climáticas no cálculo das vazões decamilenares (eventos extremos), sendo que as diferenças encontradas de aumento ou redução das vazões extremas (decamilenar) podem ter origem na pequena série de dados disponíveis e, com a incorporação de novos dados a estimativa da vazão decamilenar se altera. Cabe destacar, que o período crítico do sistema hidroelétrico brasileiro, compreendido entre junho de 1949 a novembro de 1956, caracterizado por menores médias de vazões, influencia o cálculo das vazões decamilenares principalmente quando se calcula a vazão decamilenar utilizando os dados até os anos de 1980, visto que as séries até então eram muito reduzidas, com no máximo 50 anos de dados disponíveis.

O IPCC cita que após o ano de 1950 o número de eventos com precipitações extremas sobre a superfície terrestre, aumentou em um número maior de regiões do que diminuiu em outras regiões. Os diversos trabalhos técnicos que estudam o efeito das mudanças climáticas nas vazões extremas, aplicados no território brasileiro, adotam um modelo chuva-vazão utilizando como premissa o aumento das precipitações extremas, sendo que o resultado de aumento das vazões extremas em função da adoção deste conceito é natural.

Entretanto, quando se utiliza os dados estatísticos disponíveis até o momento e se calcula a vazão decamilenar, não é possível confirmar o possível impacto das variações climáticas na estimativa das vazões limites (decamilenar). Por outro lado, analisando a série de máxima vazão diária no ano (desde 1931 até 2014), e aplicando o teste de Hipótese de Estacionariedade de Spearman, se observa que em 95 locais pode-se considerar a série estacionária e em 53 locais não.

Com estes resultados, que no presente não demonstram claramente se existe impacto das variações climáticas nas vazões de dimensionamento dos vertedores, conclui-se que talvez, mais importante que considerar os possíveis impactos do aumento das precipitações extremas no dimensionamento, seja o de considerar o impacto do aumento da série de vazões máximas disponíveis na revisão da vazão de dimensionamento, principalmente quando os vertedores foram dimensionados com séries muito reduzidas.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ADAM, K. N., FAN, F. M., PONTES, P. R., 2015 – Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH, vol. 20 nº4, Porto Alegre, out/dez. 2015.
- (2) DA COSTA, J. P., DAMAZIO, J. M., PEREIRA, M. V. F. , KELMAN, J. - Confiabilidade na Estimação de Vazões Extremas. IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia, Fortaleza/CE. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia. Vol. 1. 1981.
- (3) ELETROBRÁS, 2003 – Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidroelétricas.
- (4) ELETROBRÁS, 1987 – Guia para Cálculo de Cheia de Projetos de Vertedores.
- (5) INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) – Climate Change 2013, The physical Science Basis.
- (6) KELMAN, J., DAMÁZIO, J. M. Fator de Segurança para Cheia Decamilenar. In: VI Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos e Simpósio Internacional de Recursos Hídricos em Regiões Metropolitanas. São Paulo, ABRH, 1985.
- (7) NAGHETTINI, M., PINTO, E. J. A. (2007). Hidrologia estatística. CPRM.
- (8) WU, C. H., HUANG, G. R., YU, H. J., 2015 – Prediction os extrema floods based on CMIP5 climate models: a case study in the Beijiang River basin, South China. Hydrologu and Earth System Sciences, 19.

5.0 - DADOS BIBLIOGRÁFICOS



Marcos Vinicius Andriolo nasceu em Curitiba, PR, em 1979. Engenheiro Civil (2002), Administrador de Empresas (2008), Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (2006), pela Universidade Federal do Paraná. Especialista (MBA, 2012) em Gerenciamento de Projetos pela FGV e especialista (MBA, 2014) em Liderança com Ênfase em Gestão pela EBS. Atualmente é engenheiro civil da Companhia Paranaense de Energia. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Hidrologia, Hidráulica e Estudos Energéticos, atuando principalmente nos seguintes temas: Análise de Pleitos, Plano de Ação de Emergência, Avaliação de Aproveitamentos Hidrelétricos, Engenharia do Proprietário, Estudo de Remanso, Dimensionamento de Vertedores, Estudos Energéticos, Reconstituições de Vazões Naturais e Consistência de Dados Operativos. Coordenador do Projeto Civil da Engenharia do Proprietário da UHE Mauá (361 MW), UHE Colíder (300 MW) e UHE Baixo Iguaçu (350 MW).