

## CÁLCULO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ENTALPIA PARA OS LAGOS DE ITAIPU E FOZ DO AREIA

**Nelson Luís Dias**

Sistema Meteorológico do Paraná e Universidade Federal do Paraná - SIMEPAR/UFPR  
Caixa Postal 318 - CEP 80001-970 Curitiba PR  
[nldias@simepar.br](mailto:nldias@simepar.br)

**Leonardo Silva Rocha**

Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR  
Caixa Postal 318, 80001-970 Curitiba PR  
[lsrocha@simepar.br](mailto:lsrocha@simepar.br)

---

### RESUMO

O balanço de entalpia para os lagos de Itaipu e de Foz do Areia foi calculado a partir dos perfis verticais de temperatura da água. Apesar da taxa de variação da entalpia ser um termo essencial no cálculo do balanço de energia, análises detalhadas desse termo são raras na literatura técnica.

A advecção de entalpia, que é normalmente desprezada nos cálculos, mostrou que é um termo importante para o lago de Itaipu, devido provavelmente à diferença de profundidade em que são realizadas as medições das temperaturas afluentes e defluentes. Foram estimados os períodos mínimos que devem ocorrer entre duas medições. Quando a resolução é relativamente baixa (10 m em Itaipu), é mostrado que é necessário um período mensal para calcular a taxa de variação da entalpia armazenada.

Também foram encontradas taxas de variação mensais que apresentam uma considerável variação interanual, principalmente no reservatório de Foz do Areia.

Isto demonstra a importância de campanhas de medição contínuas ou uma implementação cuidadosa de modelos detalhados dos processos térmicos no lago.

### INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de se produzir energia tem aumentado o número de reservatórios no Brasil, visto que a solução adotada na maioria dos casos é a construção de usinas hidrelétricas. Com o alagamento de grandes áreas para a construção do reservatório, em lugar da evapotranspiração das plantas tem-se a evaporação dos lagos, sendo a diferença entre elas denominada evaporação líquida.

Geralmente a evaporação em lagos não é medida; porém ela pode ser estimada pela equação do balanço de energia:

$$\langle R_I \rangle = \langle H \rangle + \langle LE \rangle + \langle D \rangle \quad (1)$$

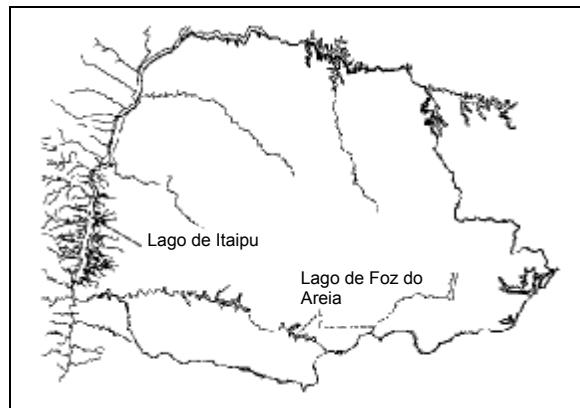
onde:  $\langle R_I \rangle$  é a radiação líquida;  $\langle H \rangle$  é o fluxo de calor sensível no lago;  $\langle LE \rangle$  é o fluxo de calor latente;  $\langle D \rangle$  é a taxa de variação da entalpia. O objetivo deste trabalho é a obtenção do termo  $\langle D \rangle$  da Equação (1). O símbolo  $\langle . \rangle$  indica que os valores são médias mensais.

Formulações parciais do cálculo da advecção e de variação de entalpia em lagos podem ser encontradas, por exemplo, em Brutsaert (1982), cap. 7 e Anderson (1954), p71-73.

Uma dedução sistemática completa, a partir das equações integrais de balanço, utilizando o teorema de transporte de Reynolds (Slattery, 1972, p17; Fox & McDonald, 1982, p97), foi realizada por Dias & Reis (1998).

Neste trabalho serão apresentados os resultados da aplicação dessa metodologia para o cálculo da taxa de variação da entalpia em dois lagos no Estado do Paraná: Itaipu e Foz do Areia (Figura 1). Eles surgiram devido à construção das usinas hidrelétricas de Itaipu e Foz do Areia e ambos existem desde 1982. No lago de Itaipu obtivemos dados de perfis verticais de temperatura, medidos durante os anos de 1986 a 1994. No lago de Foz do Areia foram obtidos dados de perfis dos anos de 1982 a 1987.

O lago de Itaipu tem uma área de aproximadamente 1.350 km<sup>2</sup> e o de Foz do Areia, de 130 km<sup>2</sup>.



**Figura 1. Localização dos lagos de Itaipu e Foz do Areia no Estado do Paraná.**

## FUNDAMENTOS FÍSICOS

A equação para o cálculo da taxa de variação da entalpia, sem considerar a advecção (Dias & Reis, 1998) é:

$$\langle D \rangle = \frac{1}{A_s \Delta t} \times \int_{z_f}^{\bar{z}} [\rho_w c_w] [T_m(z)] [T(z, t + \Delta t) - T(z, t)] A(z) dz \quad (2)$$

onde:  $\langle D \rangle$  é a taxa de variação da entalpia ( $W m^{-2}$ );  $A_s$  é a área da superfície do lago ( $m^2$ );  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre duas medições consecutivas (s);  $z_f$  é a cota do fundo do lago (m);  $\bar{z}$  é a cota mínima entre dois intervalos de medição consecutivos (m);  $\rho_w$  é a massa específica da água ( $kg m^{-3}$ );  $c_w$  é o calor específico da água ( $J kg^{-1} K^{-1}$ );  $T_m(z)$  é a temperatura média entre duas medições consecutivas (K);  $T(z, t + \Delta t)$  é a temperatura no instante  $t + \Delta t$  (K);  $T(z, t)$  é a temperatura no instante  $t$  (K);  $A(z)$  é a área do lago em função da cota ( $m^2$ ).

Se for necessário considerar a advecção de entalpia para o cálculo de (2), é preciso acrescentar um termo  $\Delta H$  ao lado direito desta equação, com:

$$\Delta H = \frac{\rho_w Q c_w \Delta T}{A_s} \quad (3)$$

onde:  $\Delta H$  é a advecção de entalpia ( $W m^{-2}$ );  $Q$  é a vazão defluente do período ( $m^3 s^{-1}$ );  $\rho_w$  é a massa específica da água ( $kg m^{-3}$ );  $c_w$  é o calor específico da água ( $J kg^{-1} K^{-1}$ );  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura defluente e a temperatura afluente (K);  $A_s$  é a área superficial do lago ( $m^2$ ). Essa equação é uma simplificação da apresentada por Dias & Reis (1998) e é possível porque não ocorrem diferenças significativas entre as vazões defluente e afluente no lago de Itaipu (Figura 4).

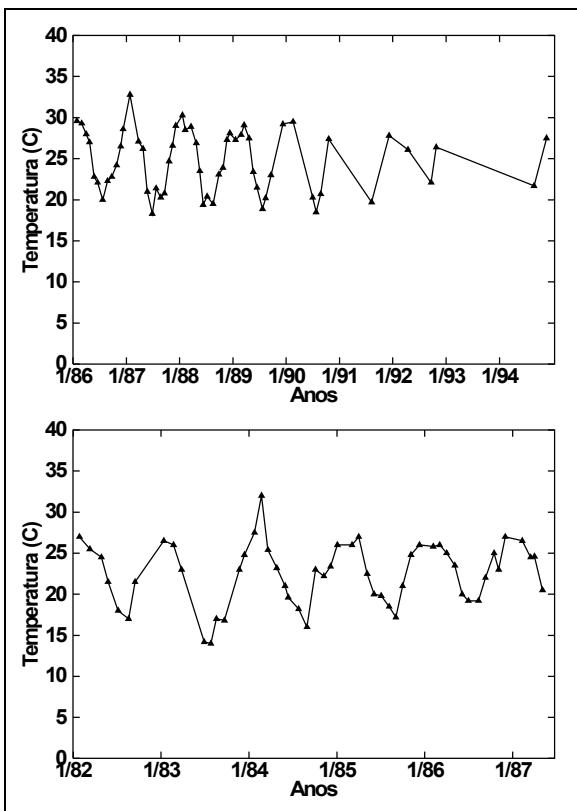
É importante que se façam duas observações sobre o cálculo da taxa de variação da entalpia em lagos.

A primeira é que, a longo prazo, a taxa de variação da entalpia tende a ser próxima de zero. Isso porque normalmente o ganho que é obtido durante o verão, quando há um aquecimento do lago, é perdido durante o inverno, quando há um resfriamento. Além disso, parece razoável supor que a temperatura do lago para o mês de janeiro por exemplo, não vá aumentar gradativa e continuamente ao longo do tempo. Isso pode ser observado através dos gráficos de temperatura da superfície da água para Itaipu e Foz do Areia (Figura 2).

Em Foz do Areia, há um pico em fevereiro de 1984 (32,0 °C). Este porém, é um ponto isolado. O ganho na taxa de variação de entalpia, ocorrido entre janeiro e fevereiro, já que  $\Delta T$  é positivo, é compensado (parcialmente) pela perda entre fevereiro e março. A compensação é parcial porque as temperaturas em janeiro e março não são necessariamente as mesmas, assim como o intervalo de tempo entre as medições de janeiro e fevereiro e o intervalo de tempo entre as medições de fevereiro e março. Mas se forem observadas as temperaturas em janeiro de 1982 e fevereiro de 1987 (já que não há medição em janeiro de 1987) percebe-se que elas são praticamente iguais, 27,0 °C e 26,5 °C, respectivamente.

Em Itaipu ocorre a mesma coisa. Em janeiro de 1987 há um pico da temperatura da superfície da água (32,8 °C), mas ao comparar as temperaturas de janeiro de 1986 e fevereiro de 1990 (a partir desse ano o número de medições é muito reduzido) observa-se que elas tem um valor parecido, 29,6 °C e 29,5 °C, respectivamente.

A segunda observação é com relação à advecção. Normalmente a advecção é um termo desprezado no cálculo da taxa de variação da entalpia. O volume entre  $\underline{z}$  e  $\bar{z}$  (entre a diferença das cotas superficiais de períodos de medição consecutivos) é bem menor que o volume entre  $z_f$  e  $\underline{z}$  (entre a cota do fundo do lago e a menor cota entre as duas medições consideradas).



**Figura 2. Temperatura da superfície da água para os lagos de Itaipu (acima) e Foz do Areia (abaixo).**

Portanto, segundo Dias & Reis (1998), geralmente despreza-se esse termo e o efeito conjunto advecção/armazenamento entre  $\underline{z}$  e  $\bar{z}$  não é considerado.

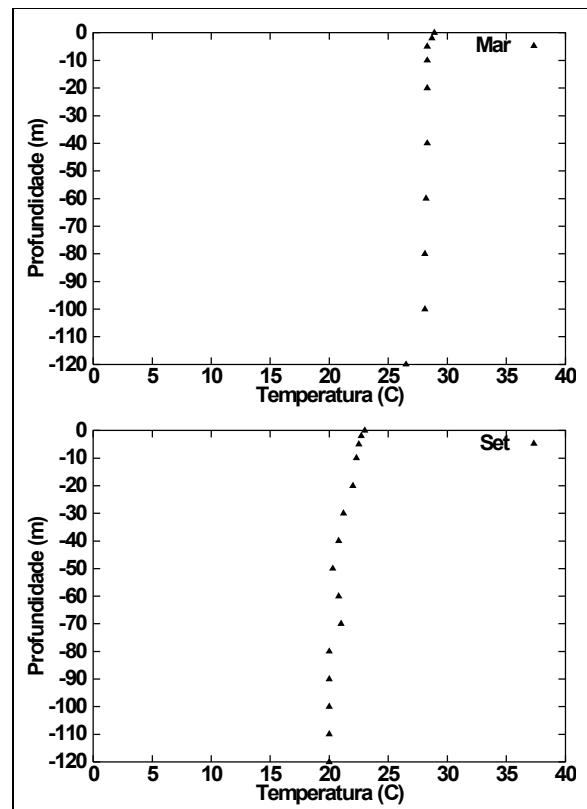
## DADOS DE ITAIPU

Os dados dos perfis de temperatura do lago de Itaipu são provenientes de seis estações denominadas E1, E2, E3, E4, E5 e E6.

Os dados das estações E1, E2, E3 e E6 são apenas da temperatura da superfície da água. Os dados das estações E4 e E5 possuem valores de temperatura medidos até 120 m de profundidade. Para o cálculo da taxa de variação da entalpia foram utilizados os dados das estações E4 e E5 e para o cálculo da advecção de entalpia os dados das estações E1 e E6 (representando as temperaturas afluente e defluente, respectivamente). As medições foram realizadas no período de janeiro de 1986 a dezembro de 1994. Porém, percebe-se

que a partir do ano de 1990 a periodicidade, de mensal, torna-se trimestral.

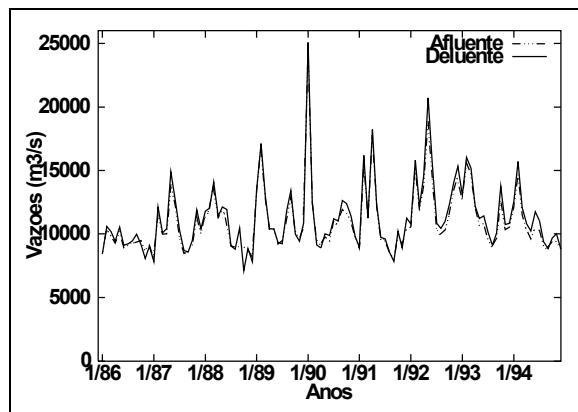
As profundidades em que foram realizadas as medições de temperatura num determinado mês não são necessariamente as mesmas utilizadas para obter o perfil vertical de temperatura em outros meses. Por exemplo, a temperatura da água na profundidade de 50 m foi medida em alguns meses, mas não em todos (Figura 3). Por isso, foi adotado um padrão para que os dados pudessem ser utilizados e comparados.



**Figura 3. Comparação entre dois perfis de temperatura obtidos na estação E4 em setembro de 1986 (acima) e março de 1998 (abaixo) no lago de Itaipu.**

Os valores dos perfis de temperatura foram interpolados e organizados de 10 em 10 metros. Portanto, cada mês apresenta treze valores. Para preencher valores nas profundidades onde não houve medição da temperatura, foi utilizada interpolação linear entre dois valores conhecidos.

Foi calculada a média aritmética da temperatura entre as estações E4 e E5, e o valor obtido foi considerado como sendo o valor da temperatura, representativo de todo o lago.



**Figura 4. Vazões afluente e defluente no lago de Itaipu entre 1986 e 1994.**

Além dos dados de temperatura, também foram obtidas as datas em que foram realizadas as medições de temperatura e as cotas da superfície do lago nessas datas. As datas são necessárias para que se obtenha o intervalo de tempo entre duas medições de temperatura, que é o termo  $\Delta t$  da Equação (2). Com as cotas, através da equação cota-área, é possível obter a área superficial do lago  $A_s$  e a área para cada cota desejada  $A(z)$ .

A curva cota-área para o lago de Itaipu é

$$A = a \cdot b \cdot e^{b \cdot N} \quad (4)$$

onde:  $A$  é a área do reservatório em  $10^3 \text{ km}^2$ ;  $a = 0,001095117$ ;  $b = 0,046291771$ ;  $N$  é o nível do reservatório em metros.

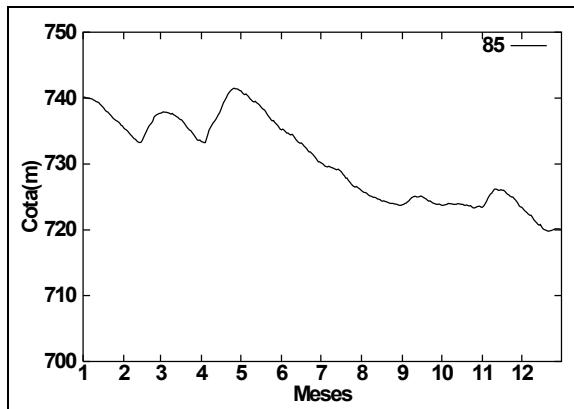
Os dados de vazão, afluente e defluente, são mensais. Os dados de vazão defluente foram utilizados para o cálculo de advecção da entalpia (Equação 3). Na Figura 4, pode-se observar que não ocorrem diferenças significativas entre as vazões afluente e defluente. As vazões normalmente estão na faixa de  $9.000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  a  $15.000 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ , atingindo um pico de  $25.063 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  no mês de janeiro de 1990.

## DADOS DO LAGO DE FOZ DO AREIA

Para se obter o perfil vertical de temperatura do lago de Foz do Areia, o número de medições realizadas varia de 80 a 110, sendo que o intervalo de medição é de 1 m. Ao contrário do que aconteceu para o lago de Itaipu, neste caso não foi necessário interpolar valores intermediários para preencher os perfis. Isso porque as medições foram feitas com um intervalo constante de profundidade, sendo medida a temperatura na superfície, a

1 m de profundidade, 2 m, 3 m e assim por diante, até profundidades variando de 80 a 110 metros. Os perfis foram medidos mensalmente, obedecendo-se este padrão, com algumas exceções, desde o ano de 1982 até 1987.

Quando se observam os gráficos com os níveis do reservatório do lago de Foz do Areia, percebem-se grandes variações nos mesmos, por exemplo para o ano de 1985 (Figura 5). Isso explica porque foram realizadas medições variando de 80 a 110 metros.



**Figura 5. Variação do nível do lago de Foz do Areia durante o ano de 1985.**

A curva cota-área foi obtida a partir de uma tabela cota-área fornecida pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL. A equação obtida foi:

$$A(z) = a z^2 + b z + c \quad (5)$$

onde:  $A(z)$  é a área em função da cota  $z$  ( $\text{m}^2$ );  $a = 8525,07$ ;  $b = -1,05375 \cdot 10^7$  e;  $c = 3,2592 \cdot 10^9$ .

## RESULTADOS

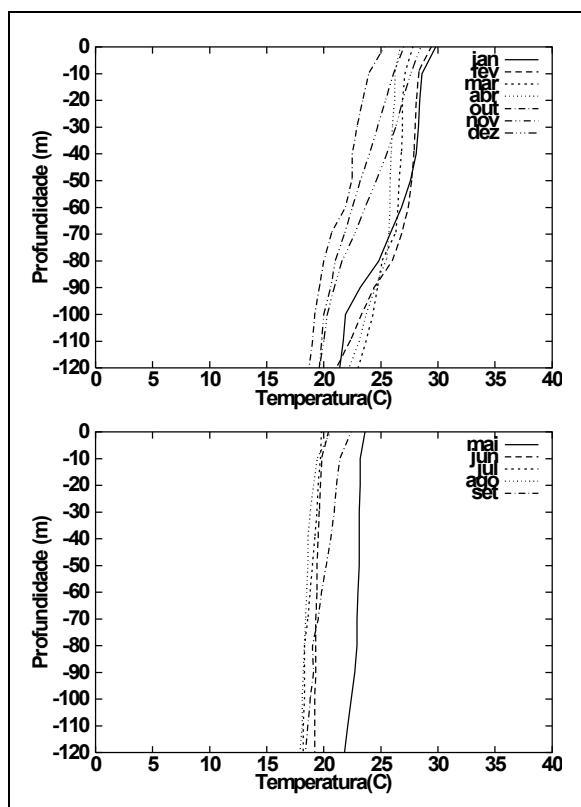
### Perfil vertical de temperatura

O perfil vertical de temperatura apresenta dois padrões distintos em ambos os lagos. O primeiro representa o que ocorre no verão e na primavera e o segundo representa outono e inverno.

Nos meses de verão e primavera, quando a incidência de radiação solar sobre a superfície é maior, fica fácil perceber que a camada superficial do lago recebe maior quantidade de calor e se aquece mais do que a região profunda. No lago de Itaipu, os meses em que esse fato ocorre são os meses de janeiro a abril e de outubro a dezembro.

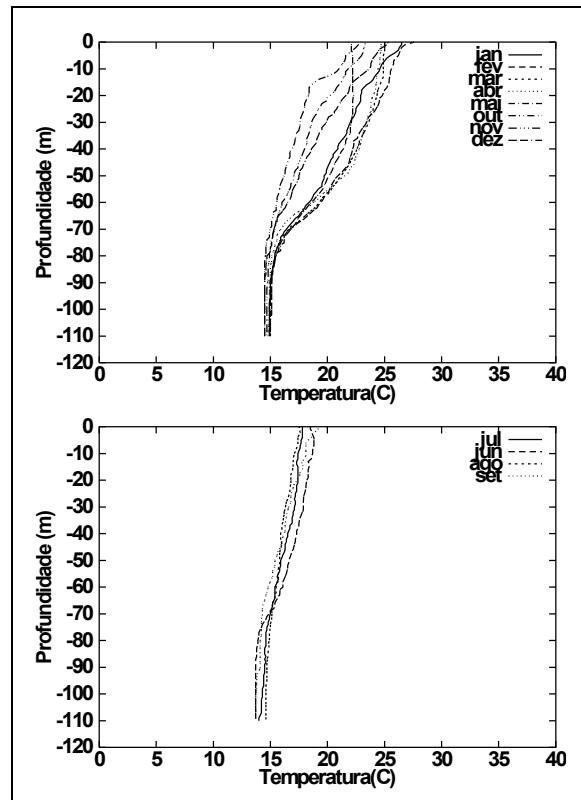
Em Foz do Areia ocorre de janeiro a maio e de outubro a dezembro. Nos outros meses, como a incidência de radiação solar é menor, o aquecimento é praticamente o mesmo para todo o perfil vertical do lago, não havendo diferenças significativas entre a temperatura da água na superfície e a temperatura da água no fundo do lago.

Nas Figuras 6 e 7 são mostrados os perfis médios mensais de longo curso, separados de acordo com as características já especificadas.



**Figura 6. Perfil médio mensal para o lago de Itaipu – primavera e verão (acima) e outono e inverno (abaixo).**

Nos meses com maior incidência de radiação solar, pode-se perceber a existência da termoclinia, que é uma faixa que divide o *epilimnion* (região próxima à superfície até a termoclinia) do *hypolimnion*. Na Figura 11, adaptada de Fischer et al. (1979, p173), observam-se essas três camadas. Nos meses mais frios, o que se observa são perfis praticamente verticais, devido à pouca energia recebida pelo lago nesse período.



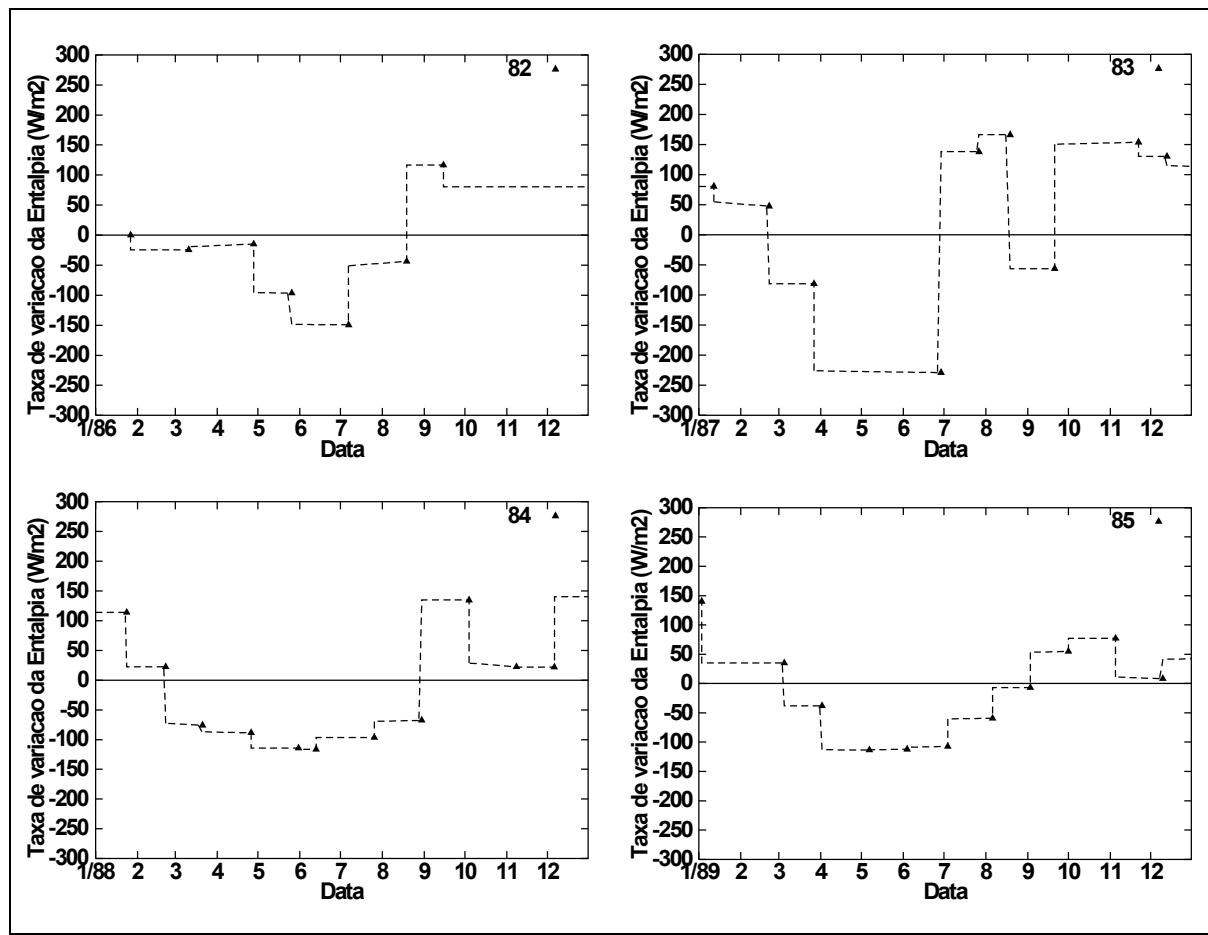
**Figura 7. Perfil médio mensal para o lago de Foz do Areia – primavera e verão (acima) e outono e inverno (abaixo).**

### Entalpia calculada

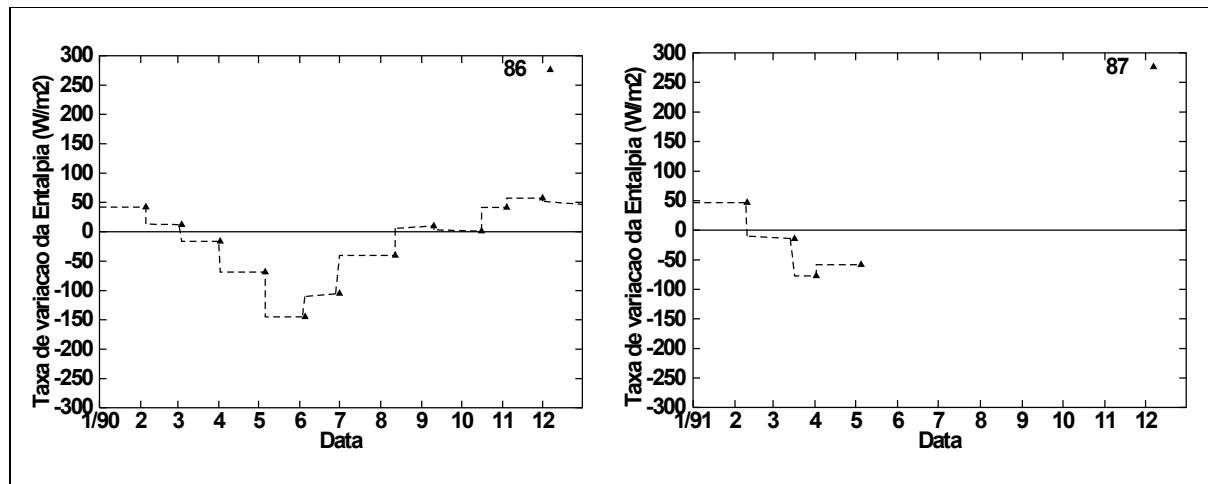
Para o cálculo da taxa de variação da entalpia para os lagos de Itaipu e Foz do Areia, inicialmente foram obtidos os dados necessários à utilização da Equação (2) através da ITAIPU BINACIONAL e da COPEL – Companhia Paranaense de Energia, respectivamente.

Como as medições não ocorreram sempre numa mesma data para cada mês e como não foram realizadas medições em todos os meses, foi necessário o cálculo de uma taxa de variação média da entalpia mensal. Para isso foi considerada uma média ponderada entre duas taxas de variação, que pudessem ocorrer dentro de um mesmo mês. Também foi calculado o número de dias equivalentes. As fórmulas utilizadas são apresentadas a seguir:

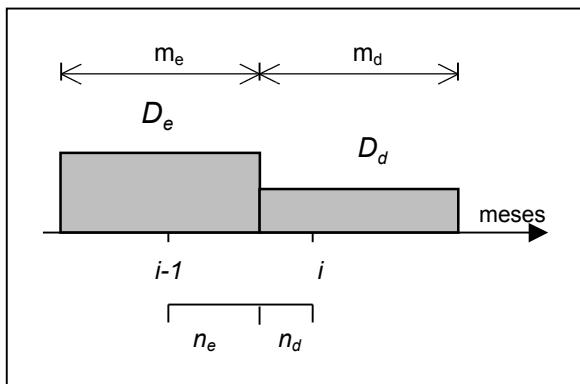
$$D_i = \frac{n_e D_e + n_d D_d}{n_e + n_d} \quad (6)$$



**Figura 8.** Taxas de variação da entalpia para o lago de Foz do Areia durante o período de 1982 a 1985 (os anos a que se referem os gráficos estão indicados no canto superior direito de cada figura).



**Figura 9.** Taxas de variação da entalpia para o lago de Foz do Areia para os anos de 1986 (à esquerda) e 1987 (à direita).



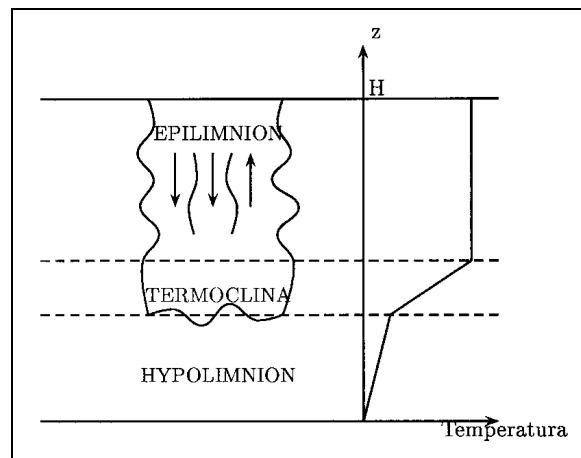
**Figura 10. Determinação da entalpia média mensal e do número equivalente de dias.**

$$n_i = \frac{m_e n_e + m_d n_d}{n_e n_d} \quad (7)$$

sendo:  $D_i$  o valor da taxa de variação da entalpia média mensal;  $D_e$  e  $D_d$  valores da taxa de variação da entalpia que ocorrem no mês em que se deseja conhecer a taxa de variação da entalpia média mensal;  $n_e$  o número de dias em que a taxa de variação  $D_e$  ocorre no mês desejado e;  $n_d$  correspondente à  $D_d$ . O valor  $n_i$  representa o número equivalente de dias e  $m_e$  é o número *total* de dias em que ocorre a taxa  $D_e$ ;  $m_d$  é o número *total* de dias em que ocorre a taxa  $D_d$ .

Os valores de taxa de variação da entalpia média mensal situam-se dentro de uma mesma faixa, tanto para o lago de Itaipu quanto para o lago de Foz do Areia. Isso porque apesar do lago de Itaipu ter uma área superficial 10 vezes maior do que a de Foz do Areia, a taxa de variação da entalpia é medida por unidade de área (ver Equação 2). Percebe-se também, em ambos os casos, um padrão de variação ao longo do ano. Em Foz do Areia normalmente ela é positiva em janeiro, fevereiro e de setembro a dezembro. Em Itaipu normalmente é positiva em janeiro, fevereiro e de agosto a dezembro nos anos de 1986 a 1990; a partir desse ano, o número de medições foi reduzido. Esse padrão já era esperado uma vez que esses são meses de verão e primavera nessas regiões, caracterizando um aumento de temperatura para o mês seguinte, tornando o termo  $\Delta T$  da Equação (2) positivo. Nos outros meses há um resfriamento da temperatura da água, resultando numa taxa de variação da entalpia negativa (Tabelas 1 e 2).

Porém, é importante observar que esse padrão não é sempre seguido. Em fevereiro e agosto, por exemplo, as taxas de variação da entalpia apresentam tanto valores positivos quanto



**Figura 11. Ocorrência da termoclinia (adaptada de Fischer et al. 1979, p173).**

negativos, em ambos os lagos. Isso demonstra que a utilização de valores mensais constantes de  $\langle D \rangle$  no cálculo de balanço de energia (Equação 1) para longos períodos não é uma boa estimativa, tanto em termos de ordem de grandeza, uma vez que as taxas apresentam variações num mesmo mês para anos diferentes, quanto no sentido físico representado pelo sinal da taxa de variação da entalpia (positiva significa um ganho de energia no lago e negativa significa perda de energia devido à diminuição da temperatura da água).

Em termos de ordem de grandeza, para o lago de Itaipu a taxa de variação da entalpia atingiu valores máximos positivos de  $100,0 \text{ Wm}^{-2}$  e negativos de  $-180,0 \text{ Wm}^{-2}$ . Em Foz do Areia, os valores positivos máximos são da ordem de  $150,0 \text{ Wm}^{-2}$  e os negativos de  $-180,0 \text{ Wm}^{-2}$ , exceção feita ao ano de 1983, quando os valores negativos chegaram a  $-240,0 \text{ Wm}^{-2}$ .

### Advecção de entalpia

Para o lago de Itaipu foi calculada a advecção de entalpia, supondo que os valores a serem obtidos seriam baixos se comparados com a taxa de variação da entalpia (ver Fundamentos Físicos). Mas, surpreendentemente, os valores são, em alguns casos, maiores do que a própria taxa de variação da entalpia. Entre as possíveis causas pode-se citar:

- Profundidades diferentes. A estação E1 apresenta pequena profundidade em relação à estação E6, o que facilita um maior aquecimento em E1.

**Tabela 1. Taxas de variação da entalpia média mensal ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o lago de Itaipu durante o período de janeiro de 1986 a novembro de 1994.**

Mês/ano	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
1	1,67	42,16	-16,11	13,34	24,06	-18,77	-7,13	-6,67	-6,67
2	11,49	-71,69	2,22	17,17	-16,35	-18,77	-7,13	-6,67	-6,67
3	-44,27	-52,12	-3,23	-4,01	-74,32	-18,77	-7,13	-6,67	-6,67
4	-60,44	-26,87	-75,68	-73,14	-74,32	-18,77	-20,76	-6,67	-6,67
5	-103,28	-166,67	-163,45	-111,97	-74,32	-18,77	-33,52	-6,67	-6,67
6	-61,80	-58,21	-32,84	-75,56	-74,32	-18,77	-33,52	-6,67	-6,67
7	-12,13	61,77	-21,16	-43,20	-55,56	-18,77	-33,52	-6,67	-6,67
8	28,97	-30,90	12,06	52,40	41,73	46,71	-33,52	-6,67	4,11
9	37,88	69,84	80,45	64,40	90,42	71,44	14,55	-6,67	67,62
10	61,00	89,39	55,42	78,11	48,15	71,44	94,09	-6,67	67,62
11	62,37	100,04	83,71	78,11	-18,77	71,44	-6,67	-6,67	43,95
12	67,97	45,36	28,65	38,88	-18,77	8,08	-6,67	-6,67	-

**Tabela 2. Taxas de variação da entalpia média mensal ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o lago de Foz do Areia durante o período de janeiro de 1982 a maio de 1987.**

Mês/ano	1982	1983	1984	1985	1986	1987
1	-3,96	59,20	90,40	41,93	41,91	46,65
2	-24,56	15,23	-2,10	35,16	16,50	5,24
3	-18,06	-105,32	-80,35	-28,63	-13,35	-44,82
4	-23,12	-229,21	-92,82	-110,79	-66,70	-59,19
5	-106,66	-229,21	-114,27	-112,29	-132,61	-7,56
6	-149,25	-204,72	-104,35	-107,80	-110,59	-
7	-64,15	142,63	-90,84	-63,81	-40,07	-
8	23,50	72,97	-54,54	-15,44	-7,73	-
9	97,34	13,80	134,74	50,52	3,71	-
10	80,51	153,82	33,26	76,89	21,84	-
11	80,51	146,76	22,14	17,27	55,92	-
12	80,51	120,32	121,12	32,09	46,65	-

De qualquer forma, é fácil perceber que a diferença entre as temperaturas defluente e afluente é a variável que mais influencia a taxa de advecção de entalpia.

Analisando-se as principais variáveis que são utilizadas no cálculo da taxa de advecção de entalpia (Equação 3), percebe-se que:

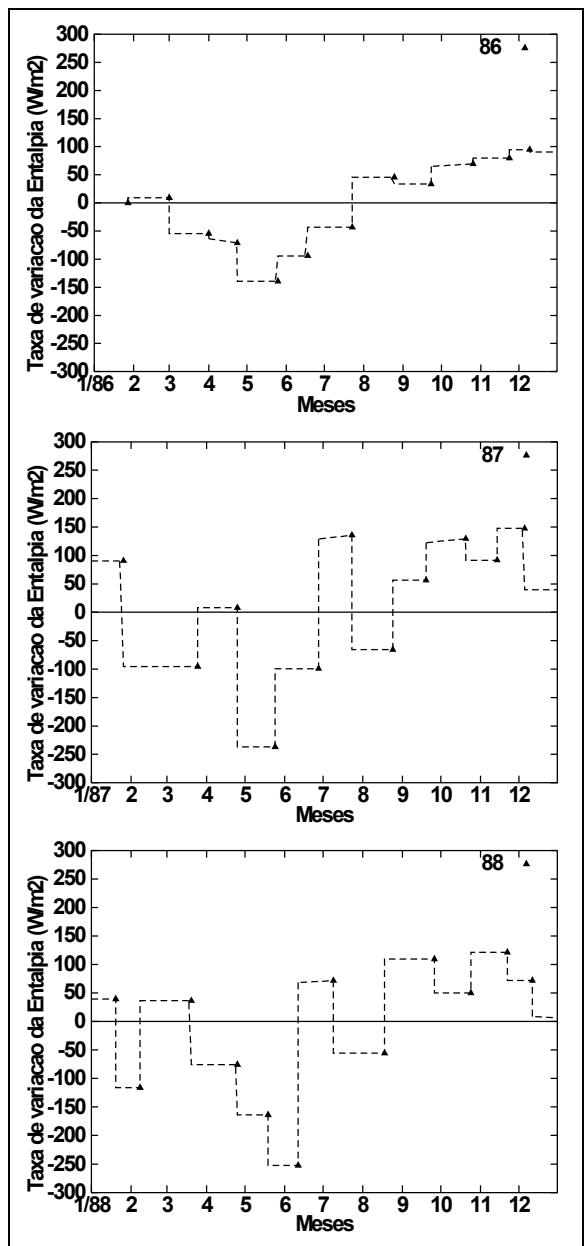
- valor de  $\rho$  utilizado é uma constante ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ );
- o valor de  $c_w$  (calor específico da água) utilizado também é constante ( $4179 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );
- os valores de vazão defluente variam entre  $8.500 \text{ m}^3$  e  $17.000 \text{ m}^3$ . A exceção é o mês de janeiro de 1990 que apresenta uma vazão de  $25.063 \text{ m}^3$ ;

- a área superficial do lago de Itaipu é da ordem de  $1.350 \text{ km}^2$  (valor obtido quando a cota do lago é de 220 m);
- o valor de  $\Delta T$  (diferença entre as temperaturas defluente e afluente) varia entre  $-3,0 \text{ K}$  e  $+2,0 \text{ K}$ .

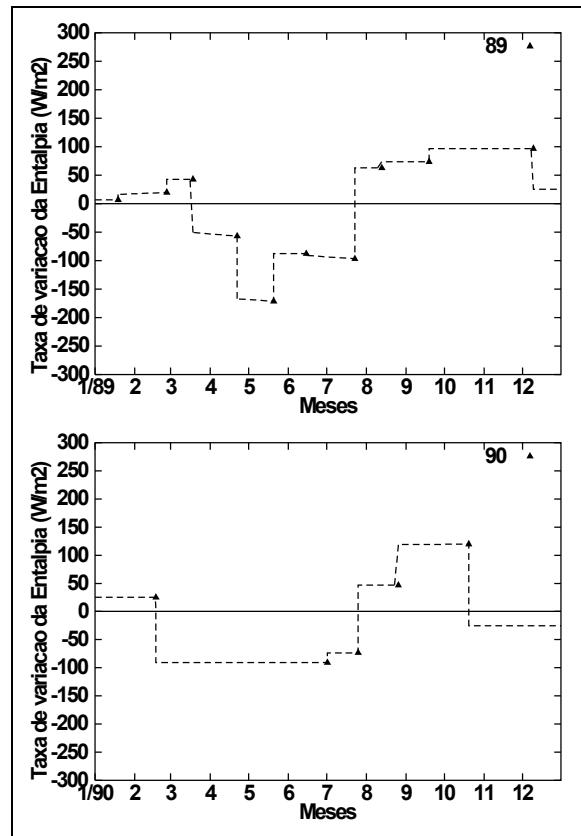
Em primeiro lugar, fica claro que o valor  $\Delta T$  é o responsável pelo sinal da advecção de entalpia, uma vez que é a única variável que pode apresentar tanto valores positivos quanto negativos.

Como  $\Delta T$  é a única variável que pode ser nula, é ela quem determina se a advecção de entalpia terá essa característica. A Tabela 3 apresenta os valores das variáveis utilizadas para calcular a advecção de entalpia durante o ano de 1990, no qual ocorreu a maior vazão defluente registrada no período. Observa-se que apesar do mês de janeiro ser o que apresenta a maior vazão,

não é o que apresenta a maior advecção de entalpia, devido ao fato de que a diferença entre a temperatura defluente e a temperatura afluente não ter sido significativa nesse período (0,3 K). O mês que registrou maior advecção de entalpia foi aquele que apresentou maior diferença de temperatura, evidenciando a preponderância de  $\Delta T$  em relação às outras variáveis.



**Figura 12. Taxas de variação da entalpia para o lago de Itapu durante os anos de 1986 (acima), 1987 (ao centro) e 1988 (abaixo).**



**Figura 13. Taxas de variação da entalpia para o lago de Itapu durante os anos de 1989 (acima) e 1990 (abaixo).**

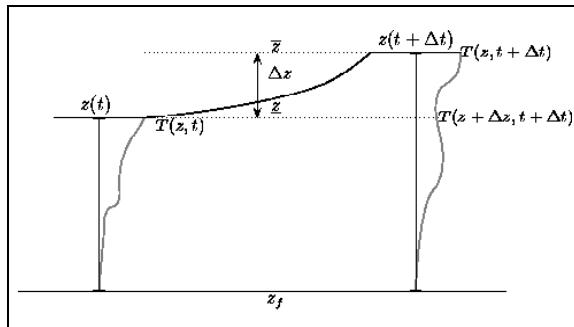
## SENSIBILIDADE DO MÉTODO

A equação utilizada para o cálculo da taxa de variação da entalpia (2), inicia a integração a partir de  $z$ . São comparadas as temperaturas que estão na mesma cota e não as que estão na mesma profundidade (Figura 14, não confundir o  $\Delta z$  da figura que representa a diferença entre  $z$  e  $\bar{z}$  com o  $\Delta z$  da Equação (2) que representa o intervalo em que foram realizadas as medições de temperatura). Pode-se imaginar que essa hipótese estivesse errada, uma vez que o ponto de referência utilizado é a cota do fundo do lago e não a cota da superfície da água (que não é um referencial fixo).

No primeiro caso a comparação é feita a partir da cota do fundo do lago, sendo comparados valores que estão na mesma cota e por isso pode acontecer, principalmente no lago de Foz do Areia, que a temperatura de um ponto de medição que esteja abaixo da superfície da água seja compara-

**Tabela 3. Valores das variáveis utilizadas para o cálculo da advecção de entalpia durante o ano de 1990.**

Mês	$\rho \times C_w$ ( $10^3$ ) $\text{JK}^{-1} \text{m}^{-3}$	Vazão $\text{m}^3$	Área Sup. $\text{Km}^2$	$\Delta T$ K	Advecção $\text{W m}^{-2}$
1	4179	25.132,0	1.338	-0,3	-23,4
2	4179	12.361,0	1.321	-1,0	-33,1
3	4179	9.136,0	1.329	s/med	-
4	4179	8.960,5	1.331	s/med	-
5	4179	10.020,0	1.329	-0,4	-12,6
6	4179	9.852,5	1.327	-1,3	-40,3
7	4179	11.234,5	1.342	-2,6	-91,0
8	4179	11.021,5	1.337	-3,0	-103,4
9	4179	12.645,5	1.330	-0,9	-35,8
10	4179	12.334,5	1.332	-0,9	-34,8
11	4179	11.419,0	1.325	s/med	-
12	4179	9.812,0	1.323	s/med	-



**Figura 14. Comparação esquemática entre os perfis de temperatura.**

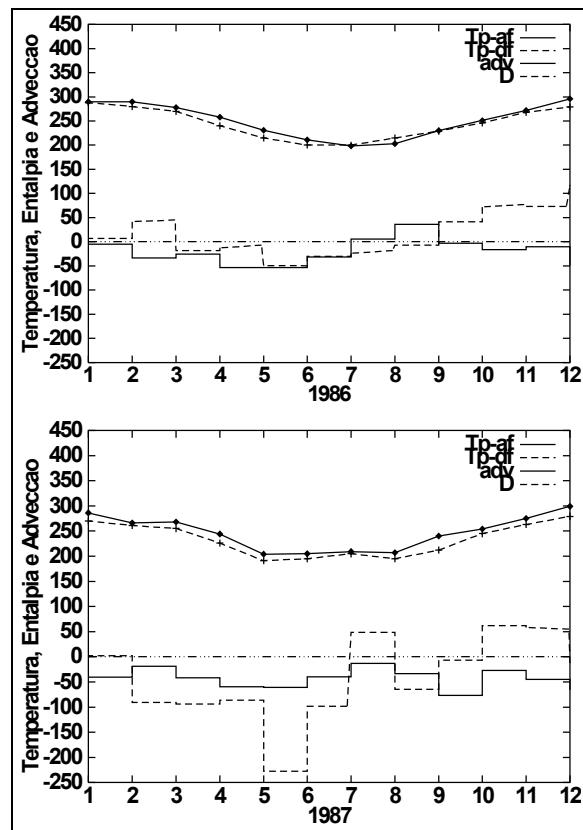
da com a temperatura da superfície da água obtida em uma medição anterior ou posterior. No segundo caso a comparação é feita a partir da superfície da água e são comparados os pontos que apresentam a mesma profundidade. Para efetuar essa verificação foram calculadas as taxas de variação da entalpia, em Foz do Areia, considerando-se uma comparação entre as profundidades dos perfis. Essa mesma análise não foi feita para o lago de Itaipu porque este não apresenta grandes variações de nível no período em que estavam disponíveis os dados.

Os resultados obtidos utilizando-se ambas as metodologias serão apresentados a seguir.

## RESULTADOS

Comparando-se os dados obtidos com os dois métodos percebe-se que eles possuem o mesmo padrão, como era o esperado. Em geral,

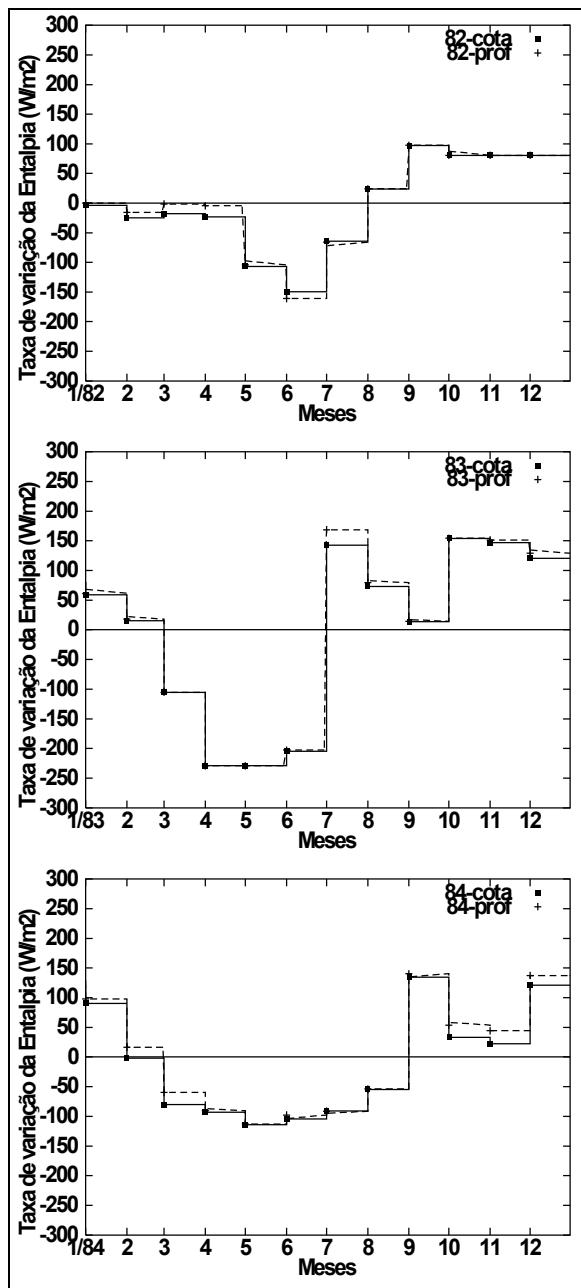
para taxas de variação da entalpia positivas, o método que utiliza profundidades apresenta valores maiores do que aquele que utiliza cotas como padrão de comparação. Para taxas negativas acontece o contrário. Os valores, em módulo, são maiores para o método por cotas. Porém, em termos de ordem de grandeza, eles apresentam valores parecidos. Os gráficos resultantes estão representados nas Figuras 16 e 17.



**Figura 15. Comparação entre as temperaturas afluente e defluente (multiplicadas por 10), advecção de entalpia e taxa da variação da entalpia para os anos de 1986 (acima) e 1987 (abaixo).**

## ANÁLISE DO ERRO DE CÁLCULO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ENTRALPIA

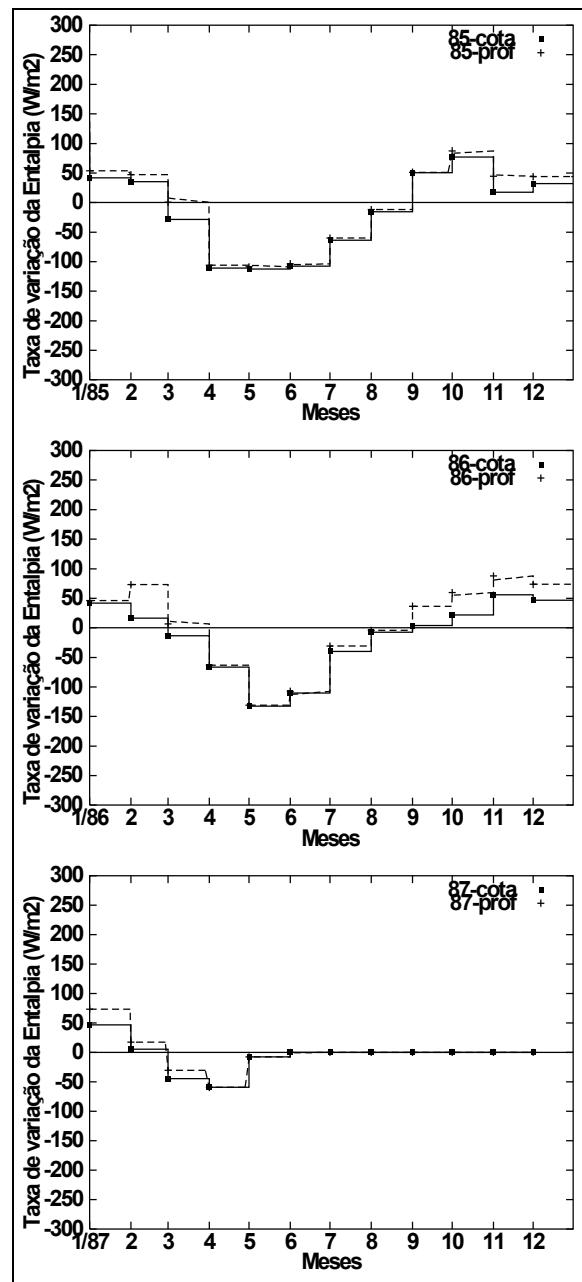
O aspecto principal do cálculo de  $\langle D \rangle$  é a necessidade de intervalos de tempo relativamente longos entre as medições de perfis de temperatura em lagos profundos para garantir a acurácia (Dias & Reis, 1998).



**Figura 16. Comparação entre os dois métodos para os anos de 1982 (acima), 1983 (ao centro) e 1984 (abaixo).**

Neste trabalho, vamos considerar para o cálculo dos erros a Equação (2), que não considera o efeito da advecção.

A partir da formulação proposta por Dias & Reis (1998), a equação para o cálculo do erro total (i.e. acurácia) é:



**Figura 17. Comparação entre os dois métodos para os anos de 1985 (acima), 1986 (ao centro) e 1987 (abaixo).**

$$\text{Err}\langle\langle D \rangle\rangle = \frac{\rho_w C_w}{\Delta t} [2\sqrt{\Delta z Z_2} \sigma_T + \Delta V Z_1] \quad (8)$$

onde:  $\Delta z$  é o intervalo em que foram realizadas as profundidades (resolução), o que representa a

inércia do sensor;  $\overline{\Delta V}$  é o erro médio de viés ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\sigma_T$  representa o desvio-padrão dos erros de medição de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $Z_1$  e  $Z_2$  são escalas de comprimento criadas para facilitar a estimativa do erro de viés (m), definidas respectivamente por:

$$Z_1 = \frac{1}{\langle A_s \rangle} \int_{z_f}^z A(z) dz \quad (9)$$

$$Z_2 = \frac{1}{\langle A_s \rangle^2} \int_{z_f}^z A^2(z) dz \quad (10)$$

A Equação (8) apresenta nove variáveis, das quais duas foram consideradas como constantes  $\rho_w$  e  $c_w$ ;  $\Delta z$  é conhecido tanto para Foz do Areia (1 m) quanto para Itaipu (10 m);  $Z_1$  e  $Z_2$  podem ser calculados porque  $A(z)dz$  é conhecido para ambos os lagos (Equações 4 e 5, respectivamente). Os valores obtidos para o lago de Foz do Areia foram  $Z_1=29,3$  m e  $Z_2=14,8$  m e para o lago de Itaipu foram  $Z_1=21,6$  m e  $Z_2=10,8$  m.

Foi definido como erro aceitável o valor de  $10 \text{ Wm}^{-2}$  e  $\Delta t$  será calculada a partir de (8). As duas variáveis restantes,  $\sigma_T$  e  $\overline{\Delta V}$ , serão utilizadas para se fazer uma análise de sensibilidade. Os valores de  $\sigma_T$  utilizados variam de  $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . E o erro de viés  $\overline{\Delta V}$  pode ser nulo ou  $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

É fácil perceber que, para o lago de Foz do Areia, o intervalo de tempo necessário entre duas medições de perfis de temperatura é menor que para o lago de Itaipu. A maior influência nessa diferença é a resolução na medição dos perfis ( $\Delta z$ ), que é melhor no lago de Foz do Areia.

Porém, a formulação proposta por Dias & Reis (1998) supõe que as medições de temperatura devem ser independentes, o que pode não acontecer em Foz do Areia, uma vez que  $\Delta z$  é pequeno, de apenas 1 m.

De qualquer forma, para um erro de  $10 \text{ Wm}^{-2}$ , campanhas de medições mensais e erro de viés nulo, o desvio-padrão do erro de medição de temperatura requerido em Foz do Areia é de  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e, em Itaipu, de  $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e ambos são valores aceitáveis.

**Tabela 4. Análise de sensibilidade no cálculo de  $\Delta t$  para o lago de Itaipu, considerando um erro de  $10 \text{ Wm}^{-2}$  na estimativa de  $\langle D \rangle$ .**

$\sigma_T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\overline{\Delta V}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t$ Foz do Areia (dias)	$\Delta t$ Itaipu (dias)
0,1	0,0	5,3	14,2
0,1	0,1	19,4	24,7
0,2	0,0	10,5	28,4
0,2	0,1	24,7	38,9
0,3	0,0	15,8	42,7
0,3	0,1	30,0	53,1
0,4	0,0	21,1	56,9
0,4	0,1	35,2	67,3
0,5	0,0	26,3	71,1
0,5	0,1	40,5	81,5
0,6	0,0	31,6	85,3
0,6	0,1	45,7	95,8
0,7	0,0	36,8	99,5
0,7	0,1	51,0	110,0
0,8	0,0	42,1	113,7
0,8	0,1	56,3	124,2
0,9	0,0	47,4	128,0
0,9	0,1	61,5	138,4
1,0	0,0	52,6	142,2
1,0	0,1	66,8	152,6

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foram calculadas as taxas de variação da entalpia para os lagos de Itaipu e Foz do Areia. Para Itaipu os valores obtidos estão entre os anos de 1986 e 1994 e para Foz do Areia entre 1982 e 1987. Os valores encontrados situam-se dentro do esperado, à exceção do ano de 1983 para Foz do Areia. O comportamento ao longo do ano também é o esperado (valores positivos no verão e negativos no inverno).

Porém, nem sempre esse padrão de comportamento é seguido. Os meses de fevereiro e agosto apresentaram tanto valores positivos quanto negativos em ambos. Isso demonstra que quando se for utilizar a equação do balanço de energia deve-se ter cuidado na estimativa do valor da taxa de variação da entalpia, evitando-se a utilização de valores mensais constantes para longos períodos.

Como deveria acontecer, a soma das taxas de variação da entalpia ao longo dos anos tem um valor próximo a zero, tanto para Itaipu quanto para Foz do Areia. Os valores de advecção de entalpia no lago de Itaipu estão muito acima do esperado, demonstrando que, para o lago de Itaipu, os valores de advecção não podem ser desprezados.

Os dois métodos utilizados para o cálculo da taxa de variação da entalpia (na seção "Sensibilidade do Método") não apresentaram diferenças significativas de comportamento ao longo do ano. Os valores apresentaram pequenas diferenças na maioria dos meses, sendo maiores os valores do método por profundidade para taxas positivas e do método por cotas (em módulo) para taxas negativas.

Considerando-se que a soma das taxas de variação da entalpia deve ser próxima de zero ao final de um determinado ano, o melhor método seria o que compara as profundidades. Nessa comparação não está incluída a advecção de entalpia, que não foi calculada por não termos os dados de vazão afluente e defluente do lago de Foz do Areia. No entanto, como foi demonstrado para o caso do lago de Itaipu, a advecção de entalpia pode ser relevante, apresentando valores da mesma ordem de grandeza que a taxa de variação da entalpia.

Através de uma estimativa de erro de  $10 \text{ Wm}^{-2}$  no cálculo da taxa de variação da entalpia percebe-se que, se considerarmos um erro de viés nulo e o desvio-padrão dos erros de medição de temperatura igual a  $0,1^\circ\text{C}$ , as medições em Itaipu devem ser mensais e, em Foz do Areia, semanais, devido a maior resolução na obtenção dos perfis de temperatura do último. Em Foz do Areia considera-se que são necessárias medições mensais para um desvio-padrão igual a  $0,5^\circ\text{C}$ , desde que não ocorra erro de viés.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à ITAIPU BINACIONAL e à COPEL – Companhia Paranaense de Energia por nos terem cedido os dados utilizados para a realização deste trabalho.

Na COPEL, agradecemos à Dra. Sandra Mara Alberti, pesquisadora do LAC/COPEL. Em Itaipu, agradecemos a José Augusto Sava e Ricardo Krauskopf, do Departamento de Operação do Sistema, Luiz Dalmi Marenda, do Departamento de Meio Ambiente Biofísico e Nery Huerta, do Departamento Medio Ambiente Biofísico. Os comentários e sugestões de dois revisores anônimos ajudaram a melhorar a versão original do texto.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, E. R. (1954). Energy-budget studies. In: *Water-loss investigations: Lake Hefner*

*studies, technical report, Geological Survey, prof. Paper 269, p71-19.*

BRUTSAERT, W. (1982). *Evaporation into atmosphere*. D. Reidel, Dordrecht.

DIAS, N. L., REIS, R. J. (1998). Métodos de cálculo do balanço de entalpia em lagos e erros associados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3 n° 3, p45-55.

FISCHER, H. B., LIST, E. J., IMBERGER, J., BROOKS, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. New York: Academic Press, p173.

FOX, R. W. & McDONALD, A. T. (1982). *Introdução à mecânica dos fluidos*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.

SLATTERY, J. C. (1972). *Momentum, energy and mass transfer in continua*. McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo.

## Rate of Change Calculation of Enthalpy for Itaipu and Foz do Areia Lakes

### ABSTRACT

An enthalpy budget for two lakes, Foz do Areia and Itaipu, was calculated from water temperature profiles and topographical data.

Although enthalpy storage in deep lakes is an essential part of their energy budget, detailed analyses of this term are not common in the technical literature.

Energy advection, a term often neglected in calculations, was found to be very important in the case of Itaipu lake, probably due to the different depths at which inflows and outflows occur. Minimum time periods between measurements were estimated for both lakes. When relatively low-resolution water profiles (10 m) are available, it is shown that periods on the order of one month are necessary for reliable estimates of the rate of change of stored enthalpy. Significantly shorter periods were found for 1-m resolution profiles, but care must be taken to avoid measurements correlated in space.

We have also found that monthly rates of change exhibit a rather large interannual variability, particularly at Foz do Areia reservoir. This points to the importance of continuous measurement campaigns or a careful implementation of detailed modeling of thermal processes in lake water.