

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO TORQUE RESISTIVO MAGNÉTICO DE UMA TURBINA DE MEDIÇÃO

Ferreira, V.C.S e Favaretto, C.F.F.
Depto. Engenharia Mecânica- UFRGS
Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre, RS
CEP 90050-170

RESUMO

A determinação do torque resistivo devido ao sensor magnético, utilizado em medidores de fluxo do tipo turbinados foi realizada experimentalmente. Uma bancada para ensaios composta de uma célula de carga a base de extensômetros de resistência elétrica, um dispositivo de movimentação contínua da célula e um sistema de aquisição de dados via microcomputador foram empregados. O rotor de uma turbina de medição foi submetido ao campo magnético produzido pelo captador de sinal e o registro da variação do torque em relação a posição das pás foi feito para diversas situações de testes. A análise da variação da curva de calibração da turbina com e sem atuação do sensor magnético é também apresentada.

Palavres Chaves: Turbina de Medição, Torque Magnético, Medição de Fluxo

1. INTRODUÇÃO

Um medidor turbinado, quando gira em rotação constante, está em equilíbrio dinâmico [1] ou seja, o somatório dos torques resistivos se iguala ao torque motor. Os torques resistivos [2] são devido ao arrasto fluidodinâmico nas superfícies das pás (T_s) e no cubo do rotor (T_h), devido ao atrito de escorregamento entre o cubo do rotor e a face fixa do suporte (T_f), ao atrito devido ao escoamento nas pontas das pás (T_{bt}), devido ainda ao atrito mecânico de rolamento do rotor (T_{brl}) e a força resistiva produzida pelo sensor (T_p) quando este for magnético. O torque motor, que proporciona o movimento da turbina, é proveniente da energia do escoamento médio retirada pelas pás do rotor. Este torque pode ser calculado pelo do balanço da quantidade de movimento angular ou com o auxílio da teoria do aerofólio aplicada a uma turbomáquina, [3], [4] e [5]. A Fig. 1, ref. [6] apresenta simbolicamente os torques envolvidos numa turbina de medição. A equação abaixo representa o equilíbrio dinâmico acima referido:

$$T_d = \sum T_R = T_s + T_h + T_f + T_{bt} + T_{brl} + T_p \quad (1)$$

O presente trabalho é dedicado a determinação da influência do torque magnético em turbinas de medição. Na primeira parte do trabalho é apresentada a medição experimental do torque resistivo devido ao campo magnético exercido pelo sensor. Na segunda parte o desempenho da turbina de medição operando com e sem o sensor magnético é analisado. Duas curvas de calibração foram obtidas e a influência do sensor magnético pode ser estabelecida. Os ensaios de calibração foram realizados em uma

bancada de calibração para medidores de fluxo para líquidos do tipo gravimétrica intermitente descrita nas refs. [7] e [8].

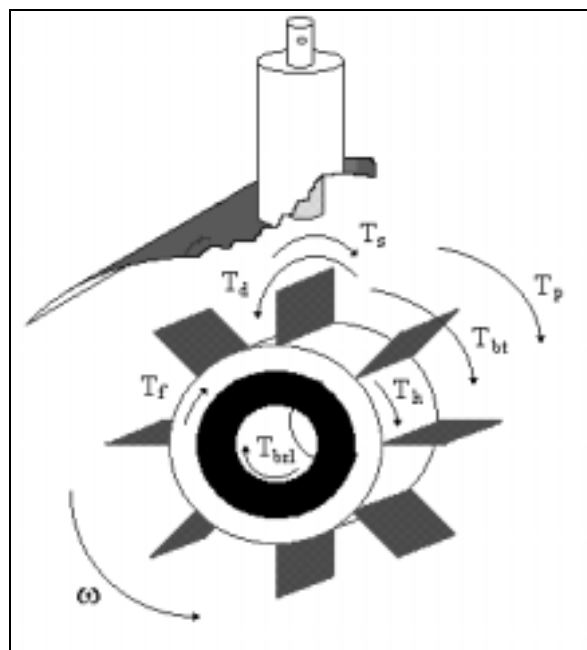


Figura 1: Torques de uma turbina de medição.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As medições do torque resistivo devido ao sensor magnético foram realizadas utilizando-se o dispositivo esquematizado na Fig. 2. O rotor da turbina de medição em teste é posicionado na parte central de um eixo horizontal passando pelos mancais de rolamentos empregados neste protótipo de turbina (rolamentos com pistas de teflon e esferas de vidro).

Um suporte de PVC é fixado de tal modo a suportar o sensor magnético na mesma distância das pás do rotor que na condição real. O rotor da turbina está livre para girar sobre seus rolamentos sendo impedido somente pela força magnética. O contato entre a pá e a lâmina da célula de carga, descrita na ref. [6], é pontual através de uma agulha colada numa face da pá.

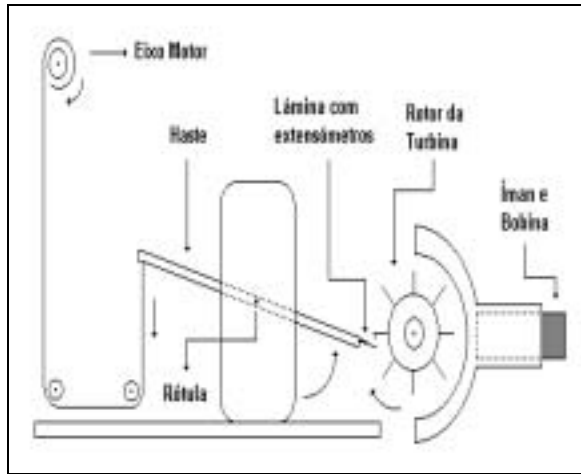


Figura 2: Dispositivo para medição do torque magnético.

O captador de sinal magnético é composto de uma bobina helicoidal, contendo no seu centro um íman cilíndrico permanente. O íman exerce uma força resistiva sobre o rotor (de aço inox magnetizável) que é máxima quando está alinhado com uma das pás do rotor. Na extremidade oposta outra pá está em contato (pontual) com a célula de carga. A haste que suporta a célula de carga tem um movimento circulatorio ascendente para induzir o giro do rotor. O movimento da haste é feito com auxílio de um motor elétrico, um redutor de rotação, polias e fio de nylon. Tão logo iniciado o movimento da haste, a lâmina que compõe a célula de carga, transmite um esforço crescente ao rotor da turbina. O giro do rotor só acontece quando este esforço é superior a força magnética. Nos instantes precedentes ao giro do rotor a lâmina se deforma continuamente transmitindo a variação de sua deformação. O movimento da haste da célula de carga é lento e em velocidade constante.

Os valores da deformação da célula de carga são registrados na ponte amplificadora dinâmica HBM, modelo MGC e transformados em força (magnética) através de um software apropriado e posteriormente gravados no disco rígido de um PC AT-386. A frequência de aquisição de dados é de 15 Hz. Cada ensaio é composto em média de um número de dados que variou entre 200 e 500.

Antes de serem iniciadas as medições, a célula de carga foi calibrada utilizando-se pesos padrões de uma balança de precisão.

Outros dispositivos de acionamento do movimento ascendente da haste, comentados na ref. [6],

foram também empregados mas o descrito acima forneceu melhores resultados.

3. RESULTADOS

A figura 3 apresenta um registro da força obtida em um ensaio. Nesta figura pode-se notar três regiões distintas. A primeira região registra um esforço resistivo nulo. Ele corresponde ao movimento ascendente da haste até início do contato da célula de carga com a pá. Na segunda região o aumento da força resistiva sobre a célula é verificado. Este registro atinge um valor máximo quando então se desfaz o contato *célula da carga x pá*. A terceira região registra o alívio da deformação da lâmina da célula de carga após o giro do rotor. A terceira região é caracterizada por uma descontinuidade devido ao movimento sem resistência da haste.

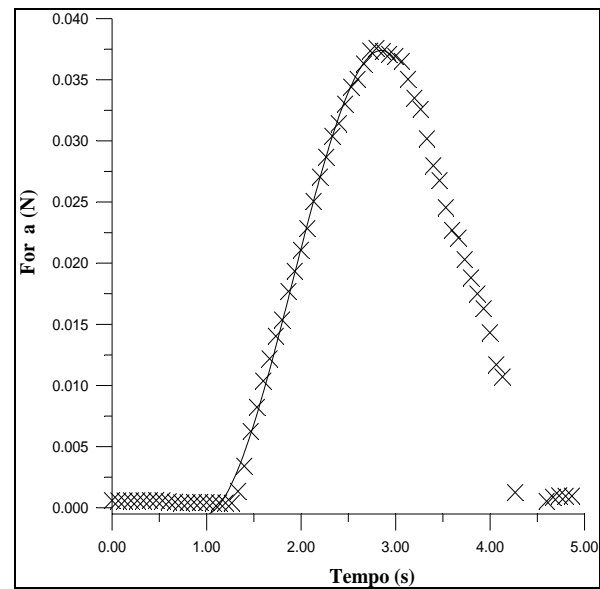


Figura 3: Força resistiva devido ao sensor magnético.

Na verdade o registro apresentado na Fig. 3 contém informações adicionais de resistência. O atrito estático de rolamento do rotor da turbina está também incluído neste registro. Para uma análise em separado dos efeitos resistivos este atrito foi medido separadamente. A medição do atrito estático de rolamento foi realizada utilizando-se o mesmo procedimento empregado sem no entanto a presença do sensor magnético. Os valores obtidos foram então descontados dos valores medidos anteriormente, obtendo-se assim, a força resistiva somente devido ao sensor magnético.

As figuras seguintes (Figs. 4 e 5) apresentam resultados de ensaios realizados com dispositivos diferentes de movimentação da haste da célula de carga.

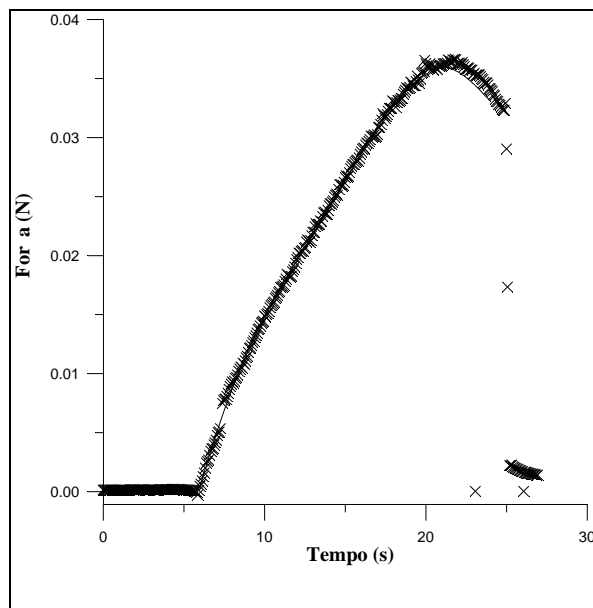


Figura 4: Força resistiva devido ao sensor magnético. (Acionamento hidráulico)

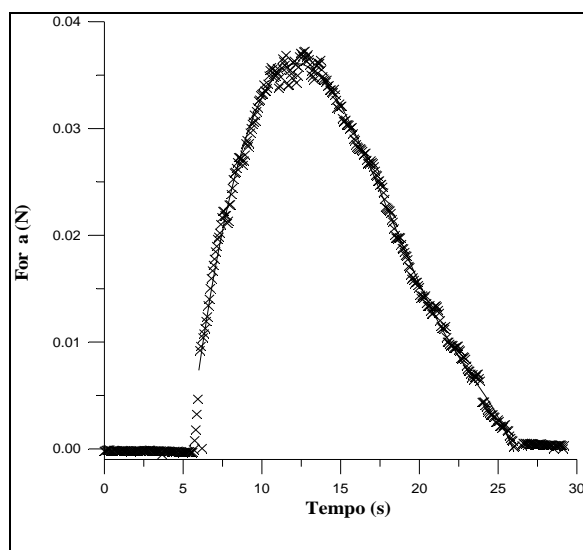


Figura 5: Força resistiva devido ao sensor magnético. (Acionamento manual)

Os dois últimos registros diferem, naturalmente, do registro da figura 3 pois o movimento da haste não é uniforme, no entanto apresentam o mesmo valor máximo que corresponde a máxima força resistiva proporcionada pelo ímã ao rotor da turbina. Devido a simetria obtida no primeiro ensaio os resultados da Fig. 3 foram considerados os mais próximos do caso real.

A força máxima total resistiva medida sobre o rotor da turbina foi de $0,03794 \text{ N} \pm 0,0015 \text{ N}$. A força de atrito estático de rolamento ficou em $0,003893 \text{ N} \pm 0,000641 \text{ N}$. Sendo assim o valor obtido para a máxima força devido somente ao sensor magnético, ficou em $0,03405 \text{ N} \pm 0,0016 \text{ N}$ e a incerteza dos resultados foi avaliada em $\pm 4\%$. Por sua vez o torque resistivo será obtido multiplicando o

valor da força pelo do “braço de alavanca” (30,9 mm) da célula de carga.

A influência desta resistência sobre o rotor da turbina é diferente das anteriormente identificadas na Eq. 1. Dada uma condição de equilíbrio, as demais resistências atuam de modo contínuo. A resistência devido ao efeito magnético depende da posição da pá em relação a posição do sensor. Ela varia, a cada setor angular de $2\pi/Z$ radianos (Z é o número de pás da turbina) com uma característica oscilatória do tipo senoidal conforme mostra um período de influência na figura 3. A figura 6 apresenta a variação do torque devido ao sensor magnético para diferentes rotações da turbina.

Para a análise de equilíbrio da Eq. 1, no entanto, importa o efeito médio. Assim, como a posição das pás é fixa em relação ao sensor magnético o efeito médio da resistência magnética \bar{T}_p pode ser calculado pela média quadrática, T_{RMS} , de qualquer uma das curvas representadas na figura 6. Este valor mostrou-se constante, independente da rotação da turbina, e igual a:

$$\bar{T}_p = 0,0003231743 \text{ Nm}$$

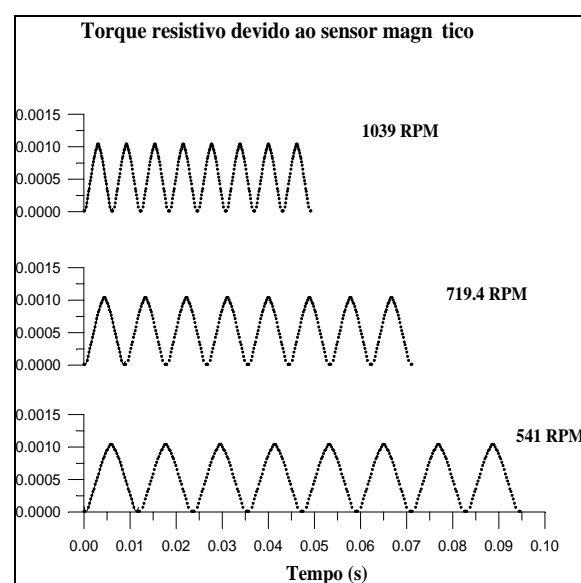


Figura 6: Variação do torque magnético para diferentes rotações da turbina.

4. ANÁLISE DE EQUILÍBRIO

A Eq. 1 é válida para cada diferente situação de equilíbrio determinada por uma rotação constante da turbina. A cada rotação, portanto, os termos do lado direito, torques resistivos, se alteram de tal sorte a somarem um valor, igual ao termo do lado esquerdo, identificado como torque motor. Os termos da Eq. 1 estão assim definidos:

- O torque motor infinitesimal (dT_d), apresentado na ref. [6], pode ser calculado segundo a teoria da conservação da quantidade de momento angular, dada pela Eq 2:

$$dT_d = 2\pi\rho V_z^2 \left[\tan\beta_2 - \frac{\omega_a r}{V_z} \right] r^2 \quad (2)$$

ou pela teoria do aerofólio:

$$dT_d = \frac{1}{2}\rho V_z^2 cZ \left[\frac{2\pi K_0 \sin\delta}{\cos\beta_\infty} \right] r dr \quad (3)$$

Os torques resistivos são calculados segundo expressões próprias desenvolvidas nas refs. [2], [3], [4] e [5]:

- O arrasto nas superfícies das pás é dado por:

$$T_s = \int dT_d = \frac{1}{2} \int \rho V_z^2 cZ \left[\frac{C_D \sin\beta_\infty}{\cos^2\beta_\infty} \right] r dr \quad (4)$$

- O torque hidrodinâmico no cubo, dado por:

$$T_h = \frac{1}{2} Z \rho V_z^2 C_D c s \cos\gamma \left[\left(\frac{q}{1+q} \right) \tan\gamma + \left(\frac{1}{1+q} \right) \tan\beta_1 \right] \times \left\{ 1 + \left[\left(\frac{q}{1+q} \right) \tan\gamma + \left(\frac{1}{1+q} \right) \tan\beta_1 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} r_h \quad (5)$$

- O torque devido ao escorregamento *cubo x suporte* é dado pela Eq. 6,

$$T_f = 30N\mu(r_c - r_e) \left[\frac{2}{3}(r_c - r_e) + r_e \right] \quad (6)$$

- O torque resistivo devido ao efeito das pontas, pela Eq. 6:

$$T_{bt} = \frac{0,078}{2 \text{Re}^{0,43}} \rho \omega_a^2 r_t^3 c t N \quad (7)$$

- O torque devido ao mancal de rolamento (medido experimentalmente, apresentado na ref. [6]) dado pela Eq. 8:

$$T_{brl} = 4,19956 \times 10^{-8} N \quad (8)$$

- O torque devido ao sensor magnético, constante, independente da rotação, dado pela equação:

$$T_p = \bar{T}_p = 3,23174 \times 10^{-4} \quad (9)$$

Com as expressões acima é possível se calcular o somatório dos torques resistivos e compará-lo com o torque motor segundo as duas teorias

mencionadas. Este estudo, em desenvolvimento, será apresentado oportunamente.

5. ANÁLISE DO DESEMPENHO

O desempenho da turbina de medição pode ser analisado com base nas curvas de calibração obtidas operando nas duas situações: (a) com a influência do sensor magnético e (b) sem a sua influência. As curvas foram levantadas numa bancada de calibração de medidores de fluxo líquido (água) tipo gravimétrica, intermitente e descrita nas refs. [7] e [8]. A figura seguinte apresenta as duas curvas de calibração. Para a medição da rotação da turbina da segunda situação foi desenvolvido um "pick up" especial empregando um sensor de emissão de radiação infravermelha, ref. [6], denominado de sensor óptico. Este sensor não produz arrasto detectável sobre o rotor da turbina.

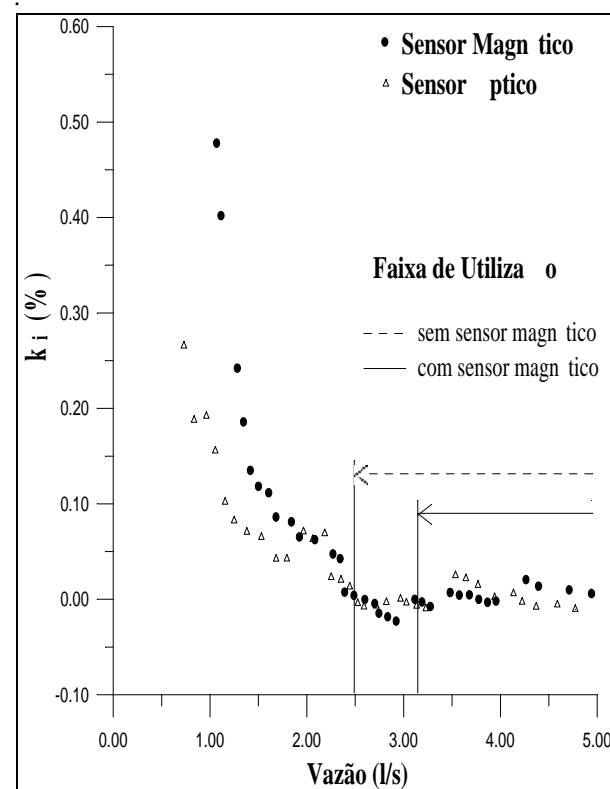


Figura 7: Curvas de Calibração.

A ordenada da figura 7 é representada pelo coeficiente percentual k_i (%) função da constante de calibração \bar{K} (litros/pulsos) do medidor, definido como:

$$k_i = \frac{K_i - \bar{K}}{\bar{K}} \quad (10)$$

onde K_i são valores de \bar{K} calculados para cada vazão.

Da figura 7 pode-se perceber que o atrito provocado pelo efeito magnético é importante na região inicial da curva de calibração da turbina. A presença do sensor magnético provocou um atraso

significativo no início do movimento da turbina. Assim, para a situação sem torque magnético, o início do giro da turbina aconteceu quando a vazão de água foi de 0,73 l/s enquanto que com o sensor magnético este início foi para a vazão de 1,067 l/s.

A faixa de utilização da turbina ficou ampliada para a situação sem o emprego do sensor magnético. O início da faixa de utilização que era de 3,2 l/s, com o sensor magnético, passou para 2,5 l/s, correspondendo uma variação de 28%, em favor da solução com o emprego do sensor óptico.

A linearidade da curva de calibração, na faixa de utilização, demonstrou não ser sensível à presença ou não do sensor magnético. Embora não se tenha ainda analisado toda a extensão da faixa de utilização da curva de calibração, acredita-se que esta conclusão seja verdadeira pois o torque resistivo magnético é constante e os demais torques resistivos dependentes da rotação (N) ou/e da vazão. Assim para vazões cada vez maiores o efeito magnético é cada vez menos significativo.

6. CONCLUSÕES

A presença do captador de sinal do tipo magnético altera o desempenho de uma turbina de medição apenas na região inicial da curva de calibração.

A alteração é notadamente importante pois afeta a sua faixa de utilização. A substituição do sensor magnético por um sensor óptico ou mesmo do tipo ultra-som provocará uma ampliação na faixa de utilização permitindo ser empregada em vazões mais baixas. A ampliação da faixa de utilização de 28% é válida apenas para o caso particular aqui analisado. Esta faixa poderá ser, na prática, ainda maior caso o sensor magnético empregado adote um núcleo de grande intensidade magnética.

No contexto geral as resistências que atuam em uma turbina de medição tem um comportamento diferenciado entre si. Duas resistências, a devida ao atrito de rolamento e a devida ao arrasto magnético (Eqs. 8 e 9) variam de forma menos acentuada do que as demais. A primeira tem uma variação linear e a segunda é constante. Isto justifica a influência das duas apenas na região inicial da curva de calibração.

O perfeito conhecimento da atuação das resistências em uma turbina de medição permitirá prever-se adequadamente o seu desempenho e proporá um projeto mais apurado.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração dos integrantes do Laboratório de Turbomáquinas e Medição de Fluxo pelas valiosas contribuições recebidas. Agradecem também ao CNPq pelo suporte financeiro ao presente projeto.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, V. C. S., - "Estudo Experimental do Atrito mecânico em Turbinas de Medição", 10^o Seminário de Instrumentação do IBP, Anais do Seminário, pp 216-225, Porto Alegre, Out/94.
- [2] Blows, L.G. - "Towards a better Turbine Flowmeter- International Conference on Advances in Flow Measurements Techniques" - paper L3, University of Warwick, UK, England, Sept/81.
- [3] Rubin, M. Miller, R.W. and Fox, R.W. - "Driving Torques in Theoretical Model of a Turbine Meter"- Journal of Basic Eng. - Trans. ASME. pp 413-420, Jun/65
- [4] Thompson, R.E. and Grey, J. - "Turbine Flowmeter Performance Model"- Journal of Basic Eng., Trans. ASME, pp 713-722, Dec/70
- [5] Tsukamoto, H. and Hutton, S.P. - "Theoretical Prediction of Meter Factor for a Helical Turbine Flowmeter", Fluid Control and Measurements - Meiji University, Tokyo, Sept/85
- [6] Favaretto, C. F. F. - "Medição do Torque Resistivo em Turbinas de Medição", Caderno Técnico DEMEC, e Relatório Interno CNPq. LTMF - UFRGS, Porto Alegre, Dez/95.
- [7] Ferreira, V. C.S., Souto, S.L.L. e Schuller, M.B.- "Medidores de Fluxo: Obtenção da Curva de Calibração via Terminal Inteligente", XI COBEM, Anais, pp 49-52, S.Paulo, Dez/91
- [8] Ferreira, V.C.S. e Venzon, M.C. P. - "Orifice Plate Behavior in Two Phase Flow (Air-Water)". COBEM-CIDIM/95, UFMG, Anais do Congresso (CD), Belo Horizonte, Dez /95.