

Utilização de Algoritmos Genéticos para Interpolação de Valores de Medição de Termoresistências (RTD)

Marcos A. A. de Oliveira ¹, José F. M. do Amaral ², Jorge L. M. do Amaral ³

¹ UERJ / Laboratórios B.Braun S.A., Rio de Janeiro, Brasil, marcos.oliveira@bbraun.com

² UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, franco@uerj.br

³ UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, jamaral@uerj.br

Resumo: Este trabalho propõe o uso de Algoritmos Genéticos para gerar a curva de ajuste de termoresistências de Platina.

Palavras chave: Termoresistências, Algoritmos Genéticos, Calibração, Ajuste.

1. INTRODUÇÃO

Um dos problemas clássicos encontrados na área de metrologia é o mapeamento entre o valor indicado pelo elemento sensor e o valor real da grandeza medida (V.V.C., ou seja, valor verdadeiro convencional). Um destes elementos é a termoresistência. Os “termômetros de resistência” funcionam baseados no fato de que a resistência elétrica de uma grande gama de materiais varia com a temperatura. De um modo geral, os metais aumentam a resistência com a temperatura [1], sempre de forma não-linear, ao passo que os semicondutores diminuem a resistência com a temperatura, conforme mostrado na figura 1.

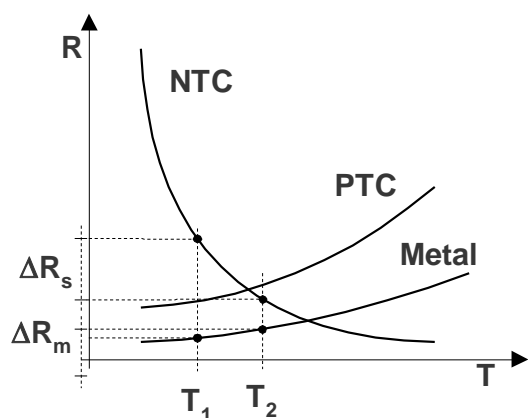


Figura 1

Os termômetros de resistência (termoresistências) são considerados sensores de alta exatidão e boa repetibilidade de leitura, também são conhecidos como RTD que é abreviação inglesa de “Resistance Temperature Detector”. Vários metais podem ser utilizados, como:

- Cobre (Cu), faixa: -200 a 260 °C;

- Molibdênio (Mo), faixa: -200 a 200 °C;
- Níquel (Ni), faixa: -80 a 260 °C;
- Níquel-ferro (Ni-Fe), faixa: -200 a 200 °C;
- Platina (Pt), faixa: -200 a 650 °C.

O elemento sensor mais utilizado é a platina, preferencialmente com o mais alto grau de pureza e encapsulados em bulbos de cerâmica ou vidro [3]. O primeiro a usar o termômetro de platina foi *William Siemens* em 1871. No entanto, a termometria de precisão com platina só foi iniciada com a publicação do trabalho de *Hugh Callendar* em 1887.

As termoresistências de platina também são conhecidas como PRT que é abreviação inglesa de “Platinum Resistance Thermometers”, ou ainda TRP que seria a abreviação de Termômetro de Resistência de Platina.

Atualmente a termoresistência de Platina mais utilizada na indústria é do tipo Pt-100, cujo sufixo numérico corresponde a sua resistência elétrica quando submetida a uma temperatura de 0°C. Mas existem outros tipos:

- Pt-0,25;
- Pt-2,5;
- Pt-25;
- Pt-200;
- Pt-1000.

Outro aspecto importante das termoresistências é o seu coeficiente de variação térmica, alfa (α), que é definido pela equação 1:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (1)$$

Onde:

R₁₀₀ = resistência na temperatura de 100 °C;

R₀ = resistência na temperatura de 0°C.

Os alfas mais comuns são:

- 0,00385 °C⁻¹;
- 0,00375 °C⁻¹;
- 0,00392 °C⁻¹.

Até mesmo no caso da platina a sua não-linearidade deve ser considerada. Os erros podem ser de até 53 °C na faixa de -200 a 650 °C, para um Pt-100 com um alfa de 0,00385 °C⁻¹,

embora na faixa de 0 a 100°C seu comportamento seja muito próximo a um comportamento linear, ver figura 2.

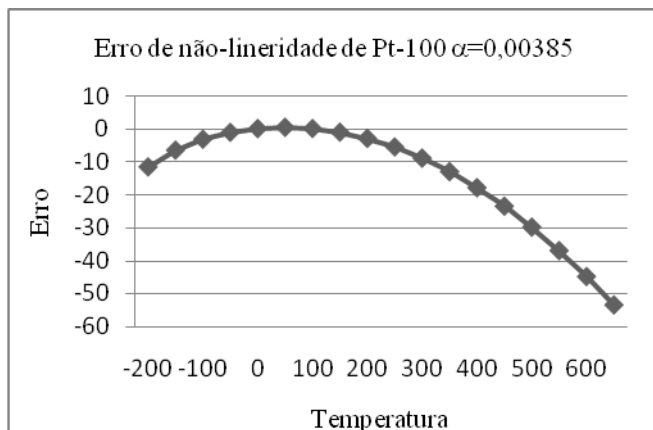


Figura 2

Normalmente, o bulbo de resistência é montado em uma bainha de aço inox, totalmente preenchida com óxido de magnésio, de tal maneira que haja uma ótima condução térmica e proteção do bulbo contra choques mecânicos. A isolamento elétrica entre o bulbo e a bainha obedece à mesma norma IEC 751.

Os valores especificados de temperatura estão definidos na ITS-90 (“*International Temperature Scale of 1990*”), escala internacional de temperatura do ano de 1990, ou ainda a EIT-90. E segundo a ASTM E 1137 – 97, para as variações de temperatura a serem medidas são válidas as equações (2) e (3), conhecidas como *Callendar-Van Dusen*, que seria a união da equação original de *Callendar* para a faixa positiva de temperatura (2), mais a contribuição posterior de *Van Dunsen* para a faixa negativa (3):

De 0 a 650 °C;

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2] \quad (2)$$

De -200 a 0 °C;

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t-100) \cdot t^3] \quad (3)$$

Onde:

t = temperatura (ITS-90) °C;

R_t = resistência na temperatura (t);

R_0 = resistência à 0°C;

Valores típicos para $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [4]

$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$;

$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$;

Valores típicos para $\alpha = 0,00375 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [5]

$A = 3,81 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

$B = -6,02 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$;

$C = -6,0 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$;

Valores típicos para $\alpha = 0,00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [6]

$A = 3,97869 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

$B = -5,86863 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$;

$C = -4,16696 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$.

A equação *Callendar-Van Dunsen* e os seus coeficientes padronizados para cada tipo de Pt-100 é utilizada para gerar as tabelas padrão dos sensores. Os instrumentos que são utilizados para obter as leituras das termoresistências

geralmente indicam em ohms, porém a grandeza de interesse é a temperatura e normalmente a unidade é grau Celsius. Desta maneira, necessitamos de equações onde o termo independente seja resistência elétrica e o termo dependente seja temperatura, ou seja, a partir de uma dada resistência saibamos a temperatura que o sensor esteja submetida.

A equação de *Van Dunsen* (utilizada na faixa negativa) não permite facilmente a sua dedução inversa, por esse motivo à norma ASTM E 1137, sugere as seguintes equações inversas, para a parte negativa (4) e para a parte positiva (5):

De -200 a 0 °C;

$$t = \sum_{i=0}^4 D_i \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right)^i \quad (4)$$

De 0 a 650 °C;

$$t = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R_t}{R_0})} - A}{2B} \quad (5)$$

Onde:

t = temperatura (ITS-90) °C;

R_t = resistência na temperatura (t);

R_0 = resistência à 0°C;

Valores típicos para $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [4]

$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$;

$D_1 = 255,819 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$D_2 = 9,14550 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$D_3 = -2,92363 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$D_4 = 1,79090 \text{ } ^\circ\text{C}$;

A equação (4) é uma aproximação da *Van Dusen*, por isso um erro de até 0,002 °C é esperado [4], contudo esses coeficientes podem ser ajustados.

Existem diversas técnicas para gerar a curva de ajuste para as termoresistências, sendo que o método mais utilizado é o estatístico para se encontrar os coeficientes A e B reais.

Este trabalho propõe o uso de Algoritmos genéticos para encontrar os valores dos coeficientes A, B, D_1 , D_2 , D_3 e D_4 de uma termoresistência a partir de valores obtidos em uma calibração e está dividido na seguinte forma: na seção 2, faz-se uma breve apresentação dos Algoritmos Genéticos; na seção 3 são apresentados os resultados obtidos nos experimentos e a seção 4, com as conclusões, encerra este trabalho.

2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Um algoritmo genético (AG), ou ainda em inglês *Genetic Algorithm* (GA), é uma técnica de procura utilizada na ciência da computação para achar soluções aproximadas em problemas de otimização e busca. Algoritmos genéticos é uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como: hereditariedade, mutação, seleção natural e cruzamento.

Algoritmos genéticos são implementados como uma simulação de computador em que uma população de representações abstratas de possíveis soluções é selecionada em busca de melhores soluções. A evolução geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções criado aleatoriamente e é realizada por meio de gerações. A cada geração, a adaptação de cada solução na população é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinação ou que sofreram mutação para formar uma nova população. A nova população então é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo.

Algoritmos genéticos diferem dos algoritmos tradicionais de otimização em basicamente quatro aspectos:

- Baseiam-se em uma codificação do conjunto das soluções possíveis, e não nos parâmetros da otimização em si;
- Os resultados são apresentados como uma população de soluções e não como uma solução única;
- Não necessitam de nenhum conhecimento derivado do problema, apenas de uma forma de avaliação do resultado;
- Usam transições probabilísticas e não regras determinísticas.[7]

A função de avaliação é o objeto de nossa otimização. Pode ser um problema de otimização, um conjunto de teste para identificar os indivíduos mais aptos, ou mesmo uma "caixa preta" onde sabemos apenas o formato das entradas e nos retorna um valor que queremos otimizar, no nosso caso é minimizar os erros da equação *Callendar-Van Dunsen*. A grande vantagem dos algoritmos genéticos está no fato de não precisarmos saber como funciona esta função de avaliação, apenas tê-la disponível para ser aplicada aos indivíduos e comparar os resultados.

O indivíduo é meramente um portador do seu código genético. O código genético é uma representação do espaço de busca do problema a ser resolvido, em geral, na forma de seqüências de bits. Por exemplo, para otimizações em problemas cujos valores de entrada são inteiros positivos de valor menor que 255, podemos usar 8 bits, com a representação binária normal, ou ainda uma forma de código *Gray*. Problemas com múltiplas entradas podem combinar as entradas em uma única seqüência de bits, ou trabalhar com mais de um "cromossomo", cada um representando uma das entradas. O código genético deve ser uma representação capaz de representar todo o conjunto dos valores no espaço de busca, e precisa ter tamanho finito [7].

A seleção também é outra parte chave do algoritmo. Em geral, usa-se o algoritmo de seleção por "roleta", onde os

indivíduos são ordenados de acordo com a função-objetivo e lhes são atribuídas probabilidades decrescentes de serem escolhidos. A escolha é feita então aleatoriamente de acordo com essas probabilidades. Dessa forma conseguimos escolher como pais os mais bem adaptados, sem deixar de lado a diversidade dos menos adaptados. Outras formas de seleção podem ser aplicadas dependendo do problema a ser tratado [7].

A reprodução, tradicionalmente é dividida em três etapas: acasalamento, recombinação e mutação. O acasalamento é a escolha de dois indivíduos para se reproduzirem (geralmente gerando dois descendentes para manter o tamanho populacional). O cruzamento, ou *crossing over* é um processo que imita o processo biológico homônimo na reprodução sexual: os descendentes recebem em seu código genético parte do código genético do pai e parte do código da mãe. Esta recombinação garante que os melhores indivíduos sejam capazes de trocar entre si as informações que os levam a ser mais aptos a sobreviver, e assim gerar descendentes ainda mais aptos. Por último vem as mutações, que são feitas com probabilidade a mais baixa possível, e tem como objetivo permitir maior variabilidade genética na população, impedindo que a busca fique estagnada em um mínimo local [7].

3. EXPERIMENTOS

O primeiro passo é definir o espaço de busca para os coeficientes A, B, D₁, D₂, D₃ e D₄ das equações. Por motivos acadêmicos escolhemos uma representação binária para o nosso cromossomo, então o passo seguinte foi definir a resolução da representação binária, uma resolução mais alta pode permitir um refinamento na busca, contudo exige um esforço computacional adicional, ver tabela 1.

Tabela 1. Representação binária

Variável Real	Código Binário
A, B, D ₁ , D ₂ , D ₃ e D _{4min}	00000000
A, B, D ₁ , D ₂ , D ₃ e D _{4max}	11111111

Nos GAs cada cromossomo representa uma variável. Em problemas multivariáveis, deve-se avaliar a ação conjunta do grupo de cromossomos que constituem o indivíduo. Por exemplo, seja um problema multivariável, cuja solução é um vetor $X = [x_1 \ x_2]$. Cada x_i é um cromossomo e seu agrupamento representa um indivíduo.

Para ilustrá-lo, suponha que cada cromossomo tenha uma resolução de 20 bits. Dessa forma, um possível indivíduo para um problema de n variáveis poderia ser visto na tabela 2, podemos ver às variáveis, seus limites inferiores (LI) e superiores (LS), tanto na sua representação Real como na Binária.

Tabela 2. Resolução da representação binária

Variável	LI _{real}	LS _{real}	LI _{binário}	LS _{binário}
A	2×10^{-3}	6×10^{-3}	00000	FFFFF
B	-4×10^{-7}	-8×10^{-7}	00000	FFFFF
D ₁	255	257	00000	FFFFF
D ₂	8	10	00000	FFFFF
D ₃	-4	-2	00000	FFFFF
D ₄	1	3	00000	FFFFF

Um aspecto importante do Algoritmo Genético é a sua função de avaliação. Esta função que vai pontuar o indivíduo (solução) e estabelecer a sua chance de reprodução, as funções utilizadas estão descritas nas equações (6) e (7).

De -200 a 0 °C;

$$p = -\sum_1^n \left| t - \left(\sum_{i=0}^4 D_i \left(\frac{R_t}{R_o} - 1 \right)^i \right) \right| \quad (6)$$

De 0 a 650 °C;

$$p = -\sum_1^n \left| t - \left(\frac{\sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_t}{R_o} \right)} - A}{2B} \right) \right| \quad (7)$$

Onde:

p = pontuação do indivíduo;

n = número de pontos da tabela;

t = temperatura °C;

R_t = resistência na temperatura (t);

R_o = resistência à 0°C;

(D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , A , B) = Coeficientes a serem encontrados (cromossomas).

3.1 Validação

Com o objetivo de validar o aplicativo desenvolvido em *Matlab*® 6.5 com *toolkit Gaot*, foi produzida uma tabela usando a equação *Callendar-Van Dunsen* e os coeficientes padronizados na ASTM E 1137 – 97, para o PT100 com $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, utilizando o aplicativo *Excel*® 2007 para gerar a tabela, ver tabela 3.

Tabela 3. Tabela ASTM E 1137 – 97

Temperatura °C	Resistência Ω
-200	18,52008000
-150	39,72318438
-100	60,25584000
-50	80,30628188
0	100,00000000
50	119,39712500
100	138,50550000
150	157,32512500
200	175,85600000
250	194,09812500
300	212,05150000
350	229,71612500
400	247,09200000
450	264,17912500
500	280,97750000
550	297,48712500
600	313,70800000
650	329,64012500

As configurações do algoritmo genético utilizadas podem ser vistas na tabela 4.

Tabela 4. Configurações do algoritmo genético

Temperaturas Positivas	
Operador <i>crossover</i>	65%
Mutação Binária	0.08%
Número máximo de gerações	50
População Inicial	300
Temperaturas Negativas	
Operador <i>crossover</i>	65%
Mutação Binária	0.08%
Número máximo de gerações	50
População Inicial	250

O resultado da validação pode ser verificado na tabela 5 e os erros de cada ponto de temperatura na tabela 6. O maior erro encontrado foi de -0,0017 °C no ponto -50°C, o que pode ser considerado como um bom resultado, tendo em vista que a equação inversa negativa é uma aproximação.

Tabela 5. Resultado da validação

Coeficiente	Padrão	Calculado
A	$3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$-5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$	$-5,7750 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
D_1	255,819 °C	255,8047 °C
D_2	9,14550 °C	9,1497 °C
D_3	-2,92363 °C	-2,8057 °C
D_4	1,79090 °C	1,8997 °C

Tabela 6. Erros

Temperatura °C	Erro °C
-200	-0,0000
-150	0,0014
-100	-0,0014
-50	-0,0017
0	0,0000
50	0,0000
100	0,0000
150	0,0000
200	0,0000
250	0,0000
300	-0,0000
350	-0,0000
400	-0,0000
450	-0,0000
500	-0,0000
550	-0,0000
600	-0,0001
650	-0,0001

3.2 Testes

O nosso programa também foi testado com os valores de uma calibração de um PT100 real e o resultado foi comparado ao resultado de um método de *fit-curve* tradicional, os valores da calibração podem ser vistos na tabela 7.

Tabela 7. PT100 real

Temperatura °C	Resistência Ω
-19,86	92,1696
0,00	99,9590
100,00	138,5011
200,00	175,8772
300,65	212,3577

Foi utilizado software *TableCurve®* 3D v3.01 para ajustar os coeficientes A e B da equação de *Callendar*, os valores dos coeficientes podem ser vistos na tabela 8 e os resíduos encontrados podem ser vistos na tabela 9.

Tabela 8. Coeficientes *TableCurve®*

A	B
0,0039125772	$5,7404455 \times 10^{-7}$

Tabela 9. Resíduos *TableCurve®*

Temperatura °C	Erro °C
-19,86	-0,0011
0,00	0,0000
100,00	-0,0163
200,00	0,0164
300,65	-0,0056

Os valores dos coeficientes calculados pelo GA podem ser vistos na tabela 10 e os erros encontrados na tabela 11.

Tabela 10. coeficientes calculados pelo GA

Coeficiente	Valor Calculado
A	$3,912664 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$-5,776036 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
D ₁	255,5284 °C
D ₂	8,4091 °C
D ₃	-2,3737 °C
D ₄	2,9635 °C

Tabela 11. Erros GA

Temperatura °C	Erro °C
-19,86	-0,0000
0,00	0,0000
100,00	-0,0155
200,00	0,0150
300,65	0,0124

4. CONCLUSÃO

Observando-se os resultados obtidos durante a validação com simulações no *Matlab®*, vimos que este algoritmo teve um excelente comportamento, convergindo para um resultado muito próximo da curva da tabela, sendo que o maior erro apresentado foi de **0,0017 °C** e um erro médio de **-0,00011 °C**. Durante os testes com dados de uma calibração o resultado foi satisfatório. Os coeficientes gerados pelo *TableCurve®* obtiveram um erro médio de **0,0013 °C**, enquanto o GA obteve um erro médio de **0,0004 °C**. Os dois métodos tiveram erros máximos equivalentes no ponto 200 °C.

Na figura 3 e na tabela 12, podemos ver um teste de reprodutibilidade a partir do histórico das calibrações do nosso sensor, ao mesmo tempo comparando-se com os ajustes obtidos com software comercial para *fit-curve* muito utilizado em metrologia o *TableCurve®*. De acordo com a tabela podemos notar que o GA se comporta melhor que o método tradicional.

A Reprodutibilidade dos resultados de medição é o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição [8].

Conclui-se então que o Algoritmo Genético é uma opção viável para ajuste de curva de termoresistências de platina, principalmente no caso de existir poucos pontos de calibração.

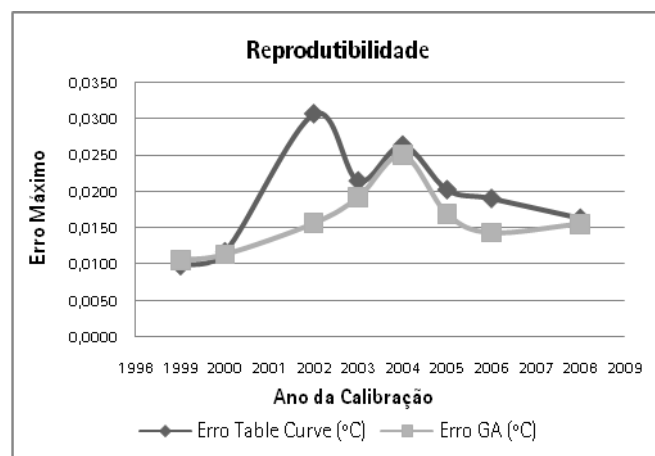


Figura 3

Tabela 12. Reprodutibilidade

Levantamento de Reprodutibilidade			
Ano da Calibração	Erro Table Curve (°C)	Erro GA (°C)	Pontos da Calibração
2008	0,0164	0,0155	5
2006	0,0191	0,0143	7
2005	0,0203	0,0169	7
2004	0,0264	0,0250	7
2003	0,0215	0,0192	7
2002	0,0307	0,0156	7
2000	0,0118	0,0113	5
1999	0,0099	0,0105	7

REFERÊNCIAS

- [1] HERMINI, Helder Anibal, Apostila MEDIDAS DE TEMPERATURA (Aspectos Gerais)
- [2] PRESTON-THOMAS, H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Metrologia, Vol 27, No. 1, 1990, pp 3-10
- [3] NICHOLAS, J. V. and WHITE, D.R., Traceable Temperatures, JOHN WILEY & SONS, 1997
- [4] ASTM E 1137-97, Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers, 1997
- [5] HONEYWELL, REFERENCE AND APPLICATION DATA - Temperature Sensors Platinum RTDs, 2008
- [6] SENSING DEVICES INC,
<http://www.sensingdevices.com/prtd4.htm>, 2008
- [7] GOLDBERG, David E.. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. EUA: Addison-Wesley, 1989.
- [8] INMETRO, Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, 4a edição, Rio de Janeiro, 2005.