

# DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO INTELIGENTE

## **Teodora Pinheiro Figueroa**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador São-carlense, 400  
13566-590 São Carlos-S.P.-Brazil  
(16) 273-8229  
[teodora@sc.usp.br](mailto:teodora@sc.usp.br)

## **Paulo Seleglim Junior**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador São-carlense, 400  
13566-590 São Carlos-S.P.-Brazil  
(16) 273-9416  
[seleglim@sc.usp.br](mailto:seleglim@sc.usp.br)

**Resumo:** - Este trabalho apresenta um estudo prospectivo referente ao desenvolvimento de um medidor de vazão eletromagnético inteligente, cuja finalidade é determinar a vazão de escoamento após a reconstrução do perfil de velocidade com a ajuda de técnicas tomográficas. O objetivo desta pesquisa consiste em obter uma medida de vazão confiável, a qual não sofra influência de perturbações nos perfis de velocidades ocasionados por elementos de tubulação, tais como curvas, redução ou válvula. Em vista disso, o medidor de vazão inteligente será capaz de corrigir a vazão dada, através da integração do correto perfil de velocidade reconstruído por tomografia. O problema é formulado pela definição de um funcional de erro, gerado a partir da diferença entre voltagens experimentais medidas em um número de eletrodos colocados sobre as paredes do tubo e, voltagens teóricas calculadas através de um modelo numérico parametrizado o perfil de velocidade. Uma expansão deste último, sob um conjunto de convenientes funções conhecidas, permitem o uso de técnicas convencionais de otimização, a fim de determinar o melhor coeficiente de expansão. Resultados obtidos através de simulações numéricas são apresentados para uma série de casos demonstrando a praticidade de nossa pesquisa.

**Palavras-chave:**- medidor de vazão eletromagnético, reconstrução tomográfica eletromagnética, métodos de otimização.

## **1. INTRODUÇÃO**

Medidores de vazão eletromagnéticos são usados para medição de vazão volumétrica de fluidos condutivos, e são amplamente utilizados em vários setores da área industrial, como por exemplo: químico/petroquímico, saneamento, siderúrgico, indústria alimentícia, farmacêutica etc. Seu

princípio de funcionamento baseia-se na Lei de Indução de Faraday e, a característica fundamental é o alto grau de sensibilidade a perturbações nos perfis de velocidades, ocasionados por curvas, reduções, etc. Em função dessa característica e, visando obter medidas de vazão mais precisas, tem-se buscado garantir na prática um escoamento retilíneo com perfil de velocidade simétrico (Shercliff, 1954; Shercliff, 1962), através da utilização de tubulações retas com comprimento de 5 a 10 vezes o diâmetro do tubo, o que complica a instalação, sendo em alguns casos impossível devido ao espaço físico (Horner et al, 1996).

Os princípios básicos que impulsionaram a idéia do projeto de um medidor de vazão eletromagnético vêm sendo estudados desde 1832, a partir da descoberta de um dos grandes fundamentos do eletromagnetismo: o aparecimento de uma força eletromotriz (Lei de Indução de Faraday) agindo na direção perpendicular ao movimento de um fluido condutor e ao campo magnético que age sobre ele. A partir daí e, em decorrência do interesse de oceanógrafos e fisiologistas da época, muitas pesquisas foram realizadas afim de desenvolver um medidor de vazão eletromagnético, cujas respostas apresentassem um grau de precisão aceitável. Com esta finalidade, diversas propostas foram apresentadas: algumas dizem respeito ao mecanismo de funcionamento como, por exemplo, a utilização de um campo alternado (Kolin, 1945; Arnold, 1950) e, outras abordam relações entre os perfis de velocidades e, a sensibilidade dos medidores de vazão eletromagnéticos (Shercliff, 1954; Shercliff, 1955). Segundo, Bevir et al (1970) medidores convencionais com eletrodos pontuais não podem ser ideais, ou seja, insensíveis a distribuição de velocidade do fluido, embora possam ser imunes a variações nos perfis de velocidades, se o escoamento for retilíneo. Por outro lado, medidores de vazão circular podem ser projetados mais próximo do ideal pelo uso de um campo magnético uniforme, com eletrodos alinhados transversalmente ao escoamento ou com grandes eletrodos. Bevir et al (1981,1983) desenvolveu um programa computacional, que a partir de informações dos valores do campo magnético, em um dado medidor de vazão, produz a sensibilidade referente as medidas, especificado um perfil de velocidade simétrico. A partir daí, o objetivo das pesquisas se direcionaram à aplicação industrial, como por exemplo um método baseado sobre princípios tomográficos usando múltiplos pares de eletrodos e dois componentes de campo magnético (Horner et al, 1996). E um método de medida da corda, o qual não somente pode reduzir o número de dados medidos, como também melhorar a razão do sinal de ruído das medidas. (Xu et al, 2001).

Com base nestas pesquisas e, visando uma aplicação industrial otimizada, com o mínimo custo efetivo e medidas de vazão confiáveis, propusemos um estudo com o objetivo de obter um medidor de vazão eletromagnético inteligente, capaz de corrigir possíveis erros referentes a experimentação e instalação. A essência deste projeto consiste na utilização do desenvolvimento de uma nova técnica de reconstrução numérica para o problema de tomografia eletromagnética (EMT). Essa técnica baseia-se na minimização de um funcional de erro, o qual expressa a diferença entre o sinal (diferença de potencial) resultante da simulação numérica das equações governantes, dado a parametrização do perfil de velocidade real no interior do tubo e, a implementação do mesmo sob condições experimentais resultantes de alterações nos parâmetros da velocidade. Com base na construção deste funcional de erro, técnicas de otimização podem ser aplicadas, a fim de determinar os parâmetros ótimos da velocidade que minimizem o funcional de erro. E a partir daí, corrigir a vazão volumétrica através do cálculo de integração do perfil de velocidade correto reconstruído por EMT.

## **2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO**

A essência do medidor de vazão eletromagnético consiste em medir a diferença de potencial entre dois ou mais eletrodos dispostos nas paredes do tubo, a partir de uma distribuição de velocidade relativa a um fluido condutor de eletricidade e, um campo magnético imposto. Essas medidas são proporcionais à velocidade média do escoamento.

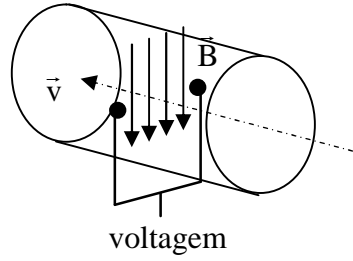


Figura 1. Representação física do Medidor de vazão eletromagnético

**Funcionamento:** uma bobina produz um campo de indução magnética  $\vec{B}$ , cujas linhas de força são perpendiculares à velocidade  $\vec{v}$  do fluido condutor de eletricidade. A força magnética gerada provoca o deslocamento de cargas  $q$  presentes no fluido e, um campo elétrico é obtido no interior do tubo. Logo, pela Lei de Indução de Faraday, surge uma força eletromotriz, estabelecendo-se uma diferença de potencial entre os eletrodos. De acordo, com a Lei de Faraday, a força eletromotriz induzida é proporcional a velocidade do fluido condutor, a intensidade do campo magnético e ao diâmetro do tubo (Kolin, 1945).

### 3. MODELAGEM DO MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO

A equação que rege o medidor de vazão eletromagnético é formulada a partir da Lei de Ohm para o fluxo de corrente no fluido, dada por:

$$\begin{aligned}\vec{J} &= \sigma [\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] \\ \nabla \cdot \vec{J} &= 0 \quad (\text{sem fluxo de corrente}) \\ \nabla \times \vec{B} &= 0 \quad (\text{campo magnético uniforme})\end{aligned}\tag{1}$$

onde  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente,  $\sigma$  a condutividade do fluido,  $(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$  é o campo elétrico devido ao movimento do fluido,  $\vec{E}$  é o campo elétrico em um sistema de coordenadas estacionária,  $\vec{v}$  é a velocidade do fluido e  $\vec{B}$  é o fluxo de densidade magnética. O termo  $\vec{v} \times \vec{B}$  representa a força eletromotriz induzida pelo movimento do fluido.

Supondo que o campo de velocidades tem somente a componente  $v_z$  na direção  $z$ , com condutividade do fluido constante e, campo magnético uniforme, obtemos a forma bidimensional simplificada da Eq. (1), como segue:

$$\nabla^2 f = -B_0 \frac{\partial v_z}{\partial x}\tag{2}$$

Esta equação do medidor de vazão juntamente com condições de fronteira apropriadas, determina a distribuição de potencial  $f$ , dada a distribuição de velocidade  $\vec{v}$  e do campo magnético  $\vec{B}$ .

### 4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Considere a formulação bidimensional, visto que a análise do estudo foi realizada em uma seção transversal do tubo, utilizando-se a Eq.(2) em coordenadas polares.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}^2} = -\frac{1}{M} \frac{\partial v}{\partial r} \quad (\mathbf{r}, \mathbf{q}) \in \Omega \quad (3)$$

onde M é um número adimensional,  $M = \frac{\mathbf{f}_0}{B_0 v_0 L}$ , v velocidade do fluido e,  $\mathbf{f}$  a diferença de potencial no interior do volume  $\Omega$ .

A condição de fronteira utilizada, Eq.(4), refere-se a técnica de excitação empregada e, matematicamente corresponde a condição de fronteira Mista (sem injeção de corrente):

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{h}} = 0, & (\mathbf{x}, t) \in \partial\Omega \\ \mathbf{f}(1, 0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Adotou-se o perfil de velocidade descrito a seguir:

$$v(\mathbf{r}, \mathbf{q}, \mathbf{a}, n) = \mathbf{a}(1 - r^n), \quad \mathbf{a}, r \in [0, 1] \quad \mathbf{q} \in [0, 2p] \quad n \in [0, 2] \quad (5)$$

Utilizando-se a Equação (3), Equação (4) e Equação (5) é possível simular numericamente a resposta do medidor de vazão eletromagnético, adotando valores aos parâmetros  $\alpha$  e n da velocidade, Eq. (5) e, obtendo como resposta cargas elétricas acumuladas sobre a fronteira  $\partial\Omega$ , as quais correspondem aos perfis de fronteira medidos, necessários ao procedimento de reconstrução numérica.

A técnica de reconstrução proposta consiste em gerar um funcional de erro, a partir do cálculo do erro relativo (e) entre: voltagens obtidas experimentalmente ( $\mathbf{f}_{\text{exp}}$ ) e voltagens aproximadas ( $\mathbf{f}_{\text{aprox}}$ ). Neste trabalho, as voltagens experimentais foram simuladas numericamente através do mesmo conjunto de equações (Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5)), considerando um perfil de velocidade parabólico, característico de escoamento laminar ou turbulento desenvolvido ( $\vec{v}_{\text{real}}$ :  $\alpha=1.0$  e  $n=2.0$ ). As voltagens aproximadas simuladas numericamente (Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5)), foram obtidas perturbando-se o perfil de velocidade através dos parâmetros  $\alpha$  e n ( $\vec{v}_{\text{aprox}}$ ). Nota-se que o erro relativo depende da distribuição de velocidade (em função dos parâmetros  $\alpha$  e n), visto que uma das características fundamentais do medidor de vazão é a sensibilidade a perturbações nos perfis de velocidades do fluido no interior do volume medido. Em decorrência dessa característica, estimou-se o funcional de erro, utilizando-se como medida de referência voltagens experimentais ( $\mathbf{f}_{\text{exp}}$ ), efetuando-se comparações com voltagens aproximadas ( $\mathbf{f}_{\text{aprox}}$ ). Como resultado obtém-se o erro relativo entre essas medidas através da Eq. (6).

$$e(\vec{v}(\mathbf{a}, n)) = \frac{\|\mathbf{f}_{\text{exp}} - \mathbf{f}_{\text{aprox}}\|_{\infty}}{\|\mathbf{f}_{\text{exp}}\|_{\infty}} \quad (6)$$

Dessa forma, a técnica numérica de reconstrução por tomografia eletromagnética consiste simplesmente em um processo de busca dos parâmetros ótimos da velocidade, que minimizem o funcional de erro, de modo que se obtenha uma boa aproximação entre  $\mathbf{f}_{\text{exp}}$  e  $\mathbf{f}_{\text{aprox}}$ . Ou seja, quando  $e(\vec{v}(\mathbf{a}, n)) \rightarrow 0$ , o perfil de velocidade aproximado se aproximará do perfil de velocidade real:  $\vec{v}_{\text{aprox}} \rightarrow \vec{v}_{\text{real}}$ .

Esta formulação, valida o projeto de um medidor de vazão eletromagnético inteligente pois podemos calcular a vazão ( $Q$ ) através da reconstrução eletromagnética do perfil de velocidade, ou seja:

$$Q = \int_A \vec{v}_{\text{aprox}} \cdot n dA \quad (7)$$

## 5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA E RESULTADOS

### 5.1. Problema Direto

O problema direto consiste na resolução numérica da Eq. (3), juntamente com a condição de fronteira, Eq. (4) e, a distribuição de velocidade, Eq. (5). Para a discretização das derivadas utilizou-se o método de diferenças finitas. As derivadas parciais de primeira ordem foram aproximadas por diferença centrada e a derivada de segunda ordem por diferença centrada de segunda ordem. Assim sendo, a discretização da equação em questão tem a seguinte apresentação

$$\frac{f_{i+1,j} - 2f_{i,j} + f_{i-1,j}}{dr^2} + \frac{1}{idr} \left( \frac{f_{i+1,j} - f_{i-1,j}}{2dr} \right) + \frac{1}{i^2 dr^2} \left( \frac{f_{i,j+1} - 2f_{i,j} + f_{i,j-1}}{dq^2} \right) = f_{i,j} \quad (8)$$

com a notação implícita:  $f_{i,j} = f(idr, jdq)$ ,  $i = 0,1,...16$  e  $j = 0,1,...80$

A Equação (8) apresenta um problema, ela não é definida para  $r=0$ , o qual é contornado utilizando-se uma idéia apresentada por Davis (1979), que se baseia na discretização da Eq. (2) nos pontos centrais utilizando-se coordenadas cartesianas.

Aplicando-se as equações discretizadas em cada um dos pontos da malha obtem-se um sistema linear. Tal sistema foi resolvido pelo método dos gradientes bi-conjugados pré-condicionado, o qual é uma generalização do método dos gradientes conjugados. Para a implementação utilizou-se a rotina PBCG (Preconditioned biconjugate gradient method) do pacote computacional *Numerical Recipes in Fortran* (Press et al, 1992).

### 5.2. Problema Inverso

A resolução do problema inverso é abordada como um problema de otimização em que os parâmetros da velocidade são refinados até que o funcional de erro atinja seu mínimo global. Visando atingir este objetivo, dividiu-se o estudo em duas etapas: análise das características topológicas do funcional de erro e, a implementação de rotinas numéricas afim de encontrar os parâmetros ótimos ( $\alpha$  e  $n$ ) da velocidade.

Alguns resultados são apresentados, como por exemplo, a superfícies de erro gerada, fixando-se os parâmetros  $\alpha$  e  $n$  e, alterando-os sistematicamente. O gráfico a seguir, contribue para uma melhor compreensão do mau condicionamento intrínseco do problema. Sendo que os eixos representam respectivamente os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e o erro calculado, Eq. (6).

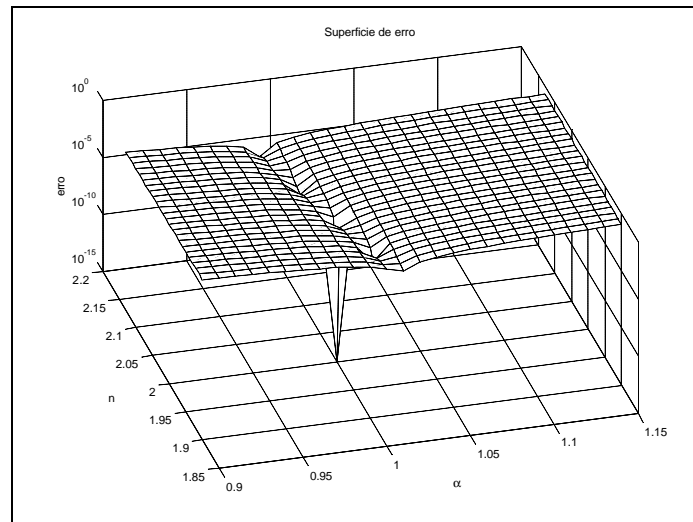


Figura 2. Superfície de erro

Podemos observar que a superfície de erro exibe um mínimo pronunciado na posição em que  $\vec{v}_{\text{aprox}} \equiv \vec{v}_{\text{real}}$ . Entretanto, problemas relacionados a topologia da superfície de erro, tais como, a existência de vários pontos de mínimo local e, regiões planas, podem comprometer seriamente a eficácia dos métodos numéricos de minimização.

Na segunda etapa deste trabalho, utilizou-se como uma heurística de otimização, o método dos algoritmos genéticos (GA) e um algoritmo estocástico, algoritmo de otimização extrema generalizada (GEO).

### 5.3. Algoritmos Genéticos

Esse método pertence a uma classe de métodos chamados algoritmos evolucionários, os quais são inspirados por um processo de seleção natural. A idéia básica dos algoritmos genéticos tem seu princípio na teoria da evolução biológica dos sistemas naturais, de Charles Darwin (1809-1922), onde os indivíduos de uma população com maior capacidade de adaptação tem maior chance de sobreviver e se reproduzir gerando descendentes. Assim de forma análoga à natureza, um algoritmo genético parte de uma população de indivíduos (configurações iniciais de um problema), faz avaliação de cada um (aplicação da função objetivo), seleciona os melhores (escolha daqueles cujo valor da função objetivo tenham os menores valores) e, promove manipulações genéticas como cruzamento e mutação (correspondentes a perturbações), a fim de criar uma nova população. Mais detalhes sobre algoritmos genéticos podem ser encontrados em Goldberg, (1989), Michalewicz, (1992), Gen et al, (1997) etc.

O algoritmo genético foi implementado para a superfície de erro Fig. (1). Matematicamente, resolveu-se o seguinte problema de minimização: Minimizar  $e(\alpha, n)$ , com  $0 \leq \alpha \leq 1$  ;  $0 \leq n \leq 2$ .

Para implementação do método, utilizou-se os seguintes dados:

Representação das variáveis: em números reais com uma população inicial de 20 vetores, dentro dos limites admissíveis.

Reprodução: crossover aritmético: média de dois pais escolhidos aleatoriamente entre os 5 primeiros indivíduos da população (ordenada).

Mutação: Uniforme: substitui um gene escolhido aleatoriamente por um número real admissível dentro dos limites superior e inferior de cada variável. Foram realizados 4 mutações. Dentre essas 4 mutações, utilizou-se de uma estratégia, descrita a seguir:

Sejam  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  a função objetivo a ser minimizada e  $v_j$  vetores com  $n$  componentes que formam uma sub-população com  $m$  elementos resultantes do processo de mutação. A idéia do método, para o problema em questão, se resume na aplicação dos seguintes passos: a) Para cada  $x_i$ ,

$i=1,2,3,\dots,n$ , calcule  $\frac{\partial f(v_j)}{\partial x_i}$ , com  $j=1,2,\dots,m$ , e tome  $\bar{x}_i$  do vetor  $v_j$ , onde  $\frac{\partial f(v_j)}{\partial x_i}$  assume o menor valor e, descarte o restante; b) Com  $\bar{x}_i$ ,  $i=1,2,3,\dots,n$ , forme um novo vetor  $\bar{v}$  para mutação. Esse vetor será utilizado para gerar novos vetores; c) Para cada  $\bar{x}_i$ ,  $i=1,2,3,\dots,n$ , faça:  $y_i = \bar{x}_i - a \frac{\partial f(\bar{v})}{\partial x_i}$ ,  $z_i = y_i - a \frac{\partial f(\bar{v})}{\partial x_i}$  e  $t_i = z_i - a \frac{\partial f(\bar{v})}{\partial x_i}$ . Cada um dos três elementos acima irão formar as  $i$ -ésimas componentes dos três novos vetores gerados a partir de  $\bar{v}$ .

Seleção: determinística: Toma as 20 melhores soluções escolhidas a partir da geração anterior (20) mais os 7 descendentes (3 criados na reprodução e 4 na mutação).

A Figura (3) refere-se ao resultado obtido com a implementação do algoritmo genético. O primeiro gráfico apresenta duas curvas, representando respectivamente as piores e as melhores soluções de cada geração.

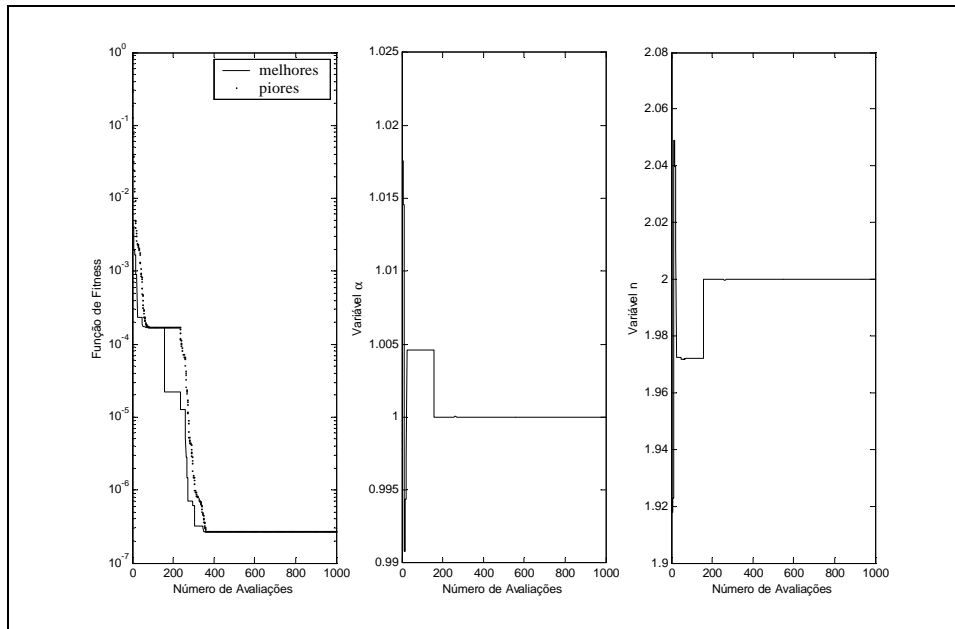


Figura 3. Resultados obtidos com Algoritmo Genético

#### 5.4. Algoritmo GEO

Recentemente Boettcher et al (2001), propôs um novo algoritmo de otimização, baseado sob princípios da seleção natural, usando a mesma lógica do modelo evolucionário de Bak e Sneppen (1993), contudo não utiliza a reprodução da população como em algoritmos genéticos. Denominou este novo algoritmo de Otimização Extrema (EO). Com o objetivo de melhorar sua execução, introduziram um parâmetro ajustável, tal que a busca não se prenderia em mínimos locais, que seria o resultado de buscas baseadas em uma mutação forçada de espécies mais fracas. Devido a introdução deste parâmetro, o EO passou a ser denominado  $\tau$ -EO, o qual apresentou uma melhora considerável em relação ao EO. Visando aplicar o método EO a uma classe extensa de problemas de otimização, independente do tipo de variável envolvida, ou seja, contínuas, discretas ou inteiras, foi proposto uma generalização de EO: o GEO (algoritmo de extrema otimização generalizada). Segundo Bak e Sneppen (1993),  $L$  espécies são alinhadas, e para cada espécie é realizada uma avaliação (através da aplicação da função objetivo), que determinará a espécie mais propensa a mutar. Nós podemos tratar estas espécies como bits que podem assumir valores 0 ou 1, uma vez que

a entrada da população consistirá de um único vetor binário. A proposta das variáveis do problema de otimização são codificados nesta string, a qual é similar ao cromossomo em AG com representação binária, conforme a figura a seguir.

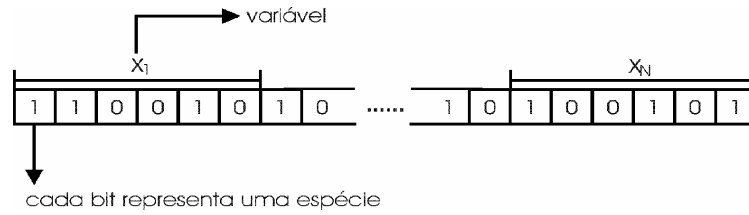


Figura 4. Variáveis codificadas em um único vetor binário

Para cada espécie (bit) é atribuído um valor de fitness que é proporcional ao ganho (ou perda) que a função objetivo tem ao mutar o bit. Todos os bits são posicionados, na seguinte ordem: de 1 para o menos adaptado, a N para o melhor adaptado. Um bit é então mutado de acordo com a distribuição de probabilidade:  $P(k) \propto k^{-\tau}$ ,  $1 \leq k \leq N$ , onde  $\tau$  é um parâmetro ajustável. Este processo é repetido até um determinado critério de parada ser alcançado e, a melhor configuração de bit ser encontrada através do processo, retornando o melhor valor da função objetivo.

Neste trabalho utilizou-se uma variação do GEO, o  $GEO_{var}$ , o qual segue os mesmos passos do GEO, mas classifica e muta separadamente as subpopulações de bits que representam cada variável. Mais detalhes sobre a implementação do algoritmo é descrita por Sousa et al (2003).

Com a implementação do  $GEO_{var}$  obteve-se ótimos resultados, os quais podem ser comprovados através da Fig. (5).

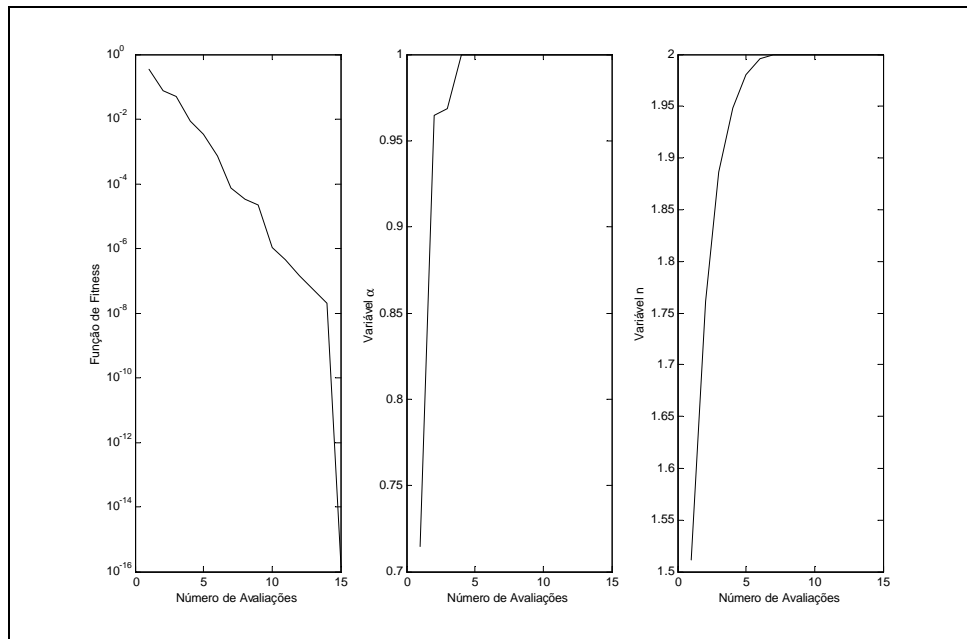


Figura 5. Resultados obtidos com  $GEO_{var}$

Com a aplicação do algoritmo de extrema otimização generalizada ( $GEO_{var}$ ), o funcional de erro convergiu para o ponto ótimo em um pequeno número de avaliações da função. É importante frisar que ambos os métodos convergem para o ponto ótimo, mas diferem no grau de precisão e, no número de avaliações da função. A grande desvantagem dos algoritmos genéticos é com relação ao número de parâmetros para ajustar, uma vez que a própria concordância destes parâmetros é muito importante para obter uma melhora do algoritmo, o que torna uma tarefa muito custosa, em alguns casos.



## 6. Conclusões

O objetivo fundamental deste trabalho baseia-se na reconstrução do perfil de velocidade, através da proposta de uma técnica numérica de reconstrução tomográfica eletromagnética. Essa técnica baseia-se na minimização de um funcional de erro, cujo ponto de mínimo global está relacionado com os parâmetros ótimos da velocidade. Nesta formulação, o mau condicionamento se manifesta através das características topológicas do funcional de erro (regiões planas e um mínimo bem pronunciado), que prejudicam os métodos de otimização na busca do mínimo global. Com base nestas características, propusemos a aplicação de dois métodos de otimização: A.G. e o  $GEO_{var}$ , os quais apresentaram boas perspectivas em relação aos métodos tradicionais de otimização, pois conseguiram evoluir na busca do ponto de mínimo global. Com os algoritmos genéticos não conseguimos ajustar os parâmetros de tal maneira a conseguir uma boa convergência, porém com a implementação do  $GEO_{var}$ , os objetivos foram atingidos, comprovando uma vantagem em relação ao A.G.: apresenta apenas um parâmetro para ajustar. Através dos resultados podemos concluir que é possível o desenvolvimento de um medidor de vazão eletromagnético inteligente, capaz de corrigir os erros nas medidas de vazão, atendendo o interesse industrial em otimizar o espaço físico e garantir maior qualidade em seus resultados.

## 7. Referências Bibliográficas

- Arnold, J. S., 1950, "An Electromagnetic Flowmeter for Transient Flow Studies", , The Review of Scientific Instruments, Vol.22, No.1, New Mexico, pp.43-47.
- Bak, P. and Sneppen, K., 1993, "Punctuated Equilibrium and Criticality in a Simple Model of Evolution", Physical Review Letters, Vol.71, No.24, pp.4083-4086.
- Bevir, M. K., 1970, "The theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters", Journal Fluid Mech., Vol.43, part 3, pp.577-590.
- Bevir, M. K., O'Sullivan, V. T. and Wyatt, D. G., 1981, "Computation of Electromagnetic Flowmeter Characteristics from Magnetic Field Data", Journal Phys. D: App. Phys., Vol.14, pp.373-378.
- Bevir, M. K., O'Sullivan, V. T. and Wyatt, D. G., 1983, "Computation of Electromagnetic Flowmeter Characteristics from Magnetic Field Data: III. Rectilinear Weight Functions", Journal Phys. D: App. Phys., Vol.16, pp.1461-1476.
- Boettcher, S. and Percus, A. G., 2001, "Optimization with Extremal Dynamics", Physical Review Letters, Vol.86, pp.5211-5214.
- Davis, G. De Vahl, 1979, "A Note on a Mesh for use with Polar Coordinates", Numerical Heat Transfer, Vol.2, pp.261-266.
- Gen, M. and Cheng, R., 1997, "Genetic Algorithms and Engineering Design", Wiley-Interscience Publication.
- Goldberg, D. E., 1989, "Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Co. Massachusetts.
- Horner, B., Mesch, F. and Trachtler, A., 1996, "A Multi-Sensor Induction Flowmeter Reducing Errors due to Non-Axisymmetric Flow Profiles", Meas. Sci. Technol., Vol.7, pp.354-360.
- Kolin, A., 1945, "An Alternating Field Induction Flow Meter of High Sensitivity", The Review of Scientific Instruments, Vol.16, No.5, pp.109-116.
- Michalewicz, Z., 1996, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", New York:Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Press, W. H. et al, 1992, "Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing", 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge [England]; New York, NY, USA:Cambridge University Press.
- Shercliff, J. A., 1954, "Relation between the Velocity Profile and the Sensitivity of Electromagnetic Flowmeters", J. Appl. Phys., Vol.25, pp.817-818.

- Shercliff, J. A., 1955, "Experiments on the Dependence of Sensitivity on Velocity Profile in Electromagnetic Flowmeters", Journal Scientific Instruments, Vol.32, pp.441-442.
- Shercliff, J. A., 1962, "The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement", Cambridge University Press.
- Sousa, L. F., Ramos, F. M., Paglione, P. e Girardi, R. M., 2003, "New Stochastic Algorithm for Design Optimization", AIAA Journal, Vol.41, No.9, pp.1808-1818.
- Xu et al, 2001, "Optimum Estimation of the Mean Flow Velocity for the Multi-Electrode Inductance Flowmeter", Meas. Sci. Technol., Vol.12, pp.1139-1146.

## DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ELECTROMAGNETIC FLOW METER

### **Teodora Pinheiro Figueroa**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador São-carlense, 400  
13566-590 São Carlos-S.P.-Brazil  
(16) 273-8229  
[teodora@sc.usp.br](mailto:teodora@sc.usp.br)

### **Paulo Seleglim Junior**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador São-carlense, 400  
13566-590 São Carlos-S.P.-Brazil  
(16) 273-9416  
[seleglim@sc.usp.br](mailto:seleglim@sc.usp.br)

**Resumo:** - *This work presents a prospective study of an intelligent electromagnetic flow meter, which determines the flow rate after reconstructing the velocity profile with the help of tomographic techniques. The objective of this research consists in an accuracy measured rate, without influence of change in this velocity profile, by piping elements such as curves, reductions or a valve. Because of this, the intelligent electromagnetic flow meter will be able to correct the flow rate, by integration of correct velocity profile reconstructed by tomography. This problem is formulated by defining an error functional, assessing the difference between experimental voltages, measured at a number of electrodes flush mounted on pipe walls, and theoretical voltages, calculated from a numerical model parametrized the velocity profile. An expansion of this last on a set of convenient known functions allows the use of conventional optimization techniques in order to determine the best expansion coefficients. Results from numerical simulations are presented for a series of representative cases demonstrating the feasibility of our approach*

**Keywords:** *intelligent electromagnetic flow meter, electromagnetic tomographic reconstructing, optimization methods.*