



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## OTIMIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO DE GÁS ATRAVÉS DE REDES FIXAS E FROTA DE VEÍCULOS

Sebastião Emidio Alves Filho<sup>1</sup>, Marco César Goldberg<sup>2</sup>

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Laboratório de Algoritmos Experimentais – Departamento de Informática e Matemática Aplicada  
Campus Universitário, Lagoa Nova, Natal-RN.  
{alves<sup>1</sup>, gold<sup>2</sup>} @dimap.ufrn.br

**Resumo** – Há duas principais formas de se fazer a distribuição de gás natural: com uma frota de veículos ou através de uma rede fixa. No Brasil existem poucas regiões atendidas por redes fixas, pois o custo dessas redes é elevado. Com o crescimento da demanda por gás natural torna-se necessário otimizar a política de distribuição do produto e integrar, se possível, em um só sistema essas duas estratégias. O presente trabalho consiste então em dado um conjunto de clientes com suas demandas associadas, bem como os custos de operação e a capacidade de uma dada frota de veículos de transporte, determinar os clientes indicados a serem incorporados ao atendimento via rede fixa ou ao serviço móvel. São também conhecidos os custos de implantação e operação da rede fixa e as penalidades que incidem sobre o sistema no caso do não atendimento de cada demanda. Os custos de implantação da nova rede deverão ser amortizados dentro de um dado horizonte de tempo. O trabalho propõe abordar a solução do problema através de uma heurística transgenética que pretende mesclar soluções que visem minimizar os custos sob a ótica de cada subsistema de atendimento, comparando seus resultados a outro algoritmo evolucionário.

**Palavras-chave:** Gás natural; Distribuição mista; Transgenética Computacional; Redes fixas; Frota de Veículos.

**Abstract** – The gas distribution is mainly made either with a vehicle fleet or through a fixed network. Here in Brazil there are only few fixed networks regions, because of its high cost. The raising of the natural gas demand makes necessary to optimize the politics of gas distribution and integrate, if it's possible, in an unique system these two strategies. The work consists on the costumers determination, which will be considered on the fixed networks or mobile services, given a set of customers with their respectives demands and the vehicle fleet operation costs and capacities. The implantation and operation costs of the fixed networks are known, as well as the penalties that happen on the system if one of the demand points isn't serviced. The new network implementation costs would be amortized inside the time window known. This work intends to attack the problem through the transgenetic approach, which manipulate solution that minimize the costs under the optics of each subsystem, comparing its results with another evolutionary algorithm.

**Key words:** Natural gas; Mixed delivery; Computational Transgenetic; Fixed networks; Vehicle fleet

## 1. Introdução

O gás natural está sendo utilizado numa escala cada vez maior devido aos benefícios por ele trazidos, como maior economia e menor agressão ao meio ambiente. Existem basicamente duas maneiras de se fazer a distribuição desse combustível nas empresas, a saber: através da recarga de tanques, previamente instalados nos clientes, feita por um veículo especial e com redes fixas.

Este trabalho apresenta um modelo de solução para distribuições de gás que utilizam em mesmo sistema uma frota heterogênea de veículos e uma rede urbana fixa de gás.

Este trabalho está inserido no Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo – PRH 22 – com ênfase no desenvolvimento de sistemas em tempo-real para otimização e automação no setor de petróleo e gás.

## 2. Histórico

A utilização do gás natural como combustível para os mais diversos fins tem sido feita há muitos anos. Em cidades mais desenvolvidas, como Paris por exemplo, esse gás já é distribuído em redes fixas desde a década de 20 do século passado. Entretanto, aqui no Brasil – e em vários outros países menos desenvolvidos – essa não é a realidade. A distribuição por redes é feita em áreas extremamente restritas devido ao custo elevado para a compra, implantação e manutenção dos dutos as compõem; as demais regiões do país utilizam frotas de veículos, que são compostas por veículos de diferentes tipos, capacidades e custos.

Com o aumento da demanda, o interesse pela implantação de novas redes de gás no país tem crescido, e há a necessidade de se estudar os impactos que essa nova rede traria, tanto no que se refere ao custo dela, quanto a uma possível subutilização da frota de caminhões já existentes. Nesse contexto deve-se elaborar um modelo que integre essas duas formas de distribuição de modo que o custo da rede não seja excessivo e nem os veículos existentes fiquem sem uso.

Não existem na literatura trabalhos que abordem um sistema de distribuição mista como acima citado. Isso ocorre porque nos países que já possuem as redes há muito tempo, essa tecnologia é tão difundida que não existem muitas regiões que utilizem caminhões para este tipo de serviço. No Brasil e em outros o que ocorre é justamente o contrário, ou seja, as malhas fixas são tão poucas que este tipo de trabalho não despertou nenhum interesse da área da otimização.

## 3. Revisão Bibliográfica

Como já dito, não existe na literatura abordagem semelhante a esta aqui proposta. Entretanto, o nosso problema, que chamaremos de Problema da Distribuição Mista de Gás (PDMG), é composto por dois outros já estudados e que possuem diversas variações e modelos de solução: o problema de implantação de malhas urbanas de gás e o problema de roteamento de veículos (PRV).

### 3.1 O problema da implantação de malhas urbanas de gás

O problema da implantação de malhas urbanas de gás pode ser descrito como: dado um conjunto de clientes com suas respectivas demandas, projetar uma rede que atenda a necessidade de todos os clientes com o menor custo possível. A figura 1 representa um modelo esquemático de uma rede urbana de gás.

Figura 1. Exemplo de uma rede urbana fixa de gás.

Este problema é extremamente complexo, e envolve uma série de elementos a serem analisados, como restrições de pressão, diâmetro e comprimento dos dutos que formam a rede, caminho por ela percorrido, etc. Como o objetivo do trabalho não é o cálculo do custo para o dimensionamento da rede, admitiremos que o custo para cada cliente, que é constituído pela soma entre o custo para se levar a rede até ele e a manutenção dessa rede por um certo período, já é conhecido.

### 3.2 O problema do roteamento de veículos

O PRV consiste basicamente em visitar, utilizando uma frota de veículos, uma série de clientes com menor custo possível, atendendo a necessidade de cada um deles. Essa frota deve seguir uma seqüência de movimentos de tal forma que inicia e finaliza as visitas em um mesmo local, que é chamado de depósito ou domicílio. A figura 2 mostra o caso clássico de um roteamento de veículos com um único depósito central.



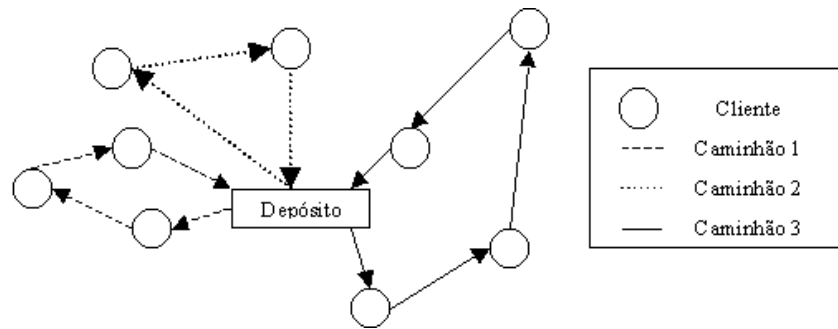


Figura 2. Um problema de roteamento de veículos.

O PRV engloba um grande número de casos particulares e importantes da literatura, como o problema do carteiro chinês, o problema do carteiro rural, o problema do caixeiro viajante rodoviário, o problema do M-caixeiro viajante, entre outros. Alguns possuem solução polinomial, outros não, e é justamente essa classificação que determinará o grau de dificuldade que o PRV vai assumir.

Goldberg e Luna(2000) apresentam uma descrição mais completa das diversas variações do PRV.

## 4. Modelo de solução

Podemos modelar o PDMG usando grafos, onde:

- Os vértices representam o depósito, a origem da rede de gás e os pontos de demanda;
- Os arcos representam a existência de um caminho direto entre dois pontos da configuração. Eles podem ser direcionados ou não-direcionados;
- Os pesos dos arcos representam as distâncias entre os clientes;
- Os pesos nos vértices representam as demandas.

Daremos agora uma descrição mais detalhada do problema e dos métodos que utilizaremos para resolvê-lo.

### 4.1 Características dos clientes

- Cada cliente terá uma demanda fixa e determinada que será maior que zero;
- Cada cliente terá uma ligação com todos os outros clientes e com o depósito, diretamente ou indiretamente;
- Um cliente será abastecido por apenas um caminhão, ou então pela rede (ou seja, não será abastecido por mais de um caminhão nem por um caminhão e a rede ao mesmo tempo);
- Haverá mais de um cliente na região.

### 4.2 Características da frota de veículos

- A frota terá um número de caminhões fixo e determinado antes de se determinar uma solução, que será maior ou igual a um;
- A frota é heterogênea, ou seja, os caminhões possuem capacidades diferentes uns dos outros;
- Não há caminhão especial, ou seja, qualquer caminhão pode atender qualquer ponto de demanda;
- Todo veículo deve fazer a distribuição e retornar para o depósito.

### 4.3 Características da rede fixa

- Existe apenas um ponto de onde sairá a rede fixa, chamado de origem da rede;
- O custo para se levar a rede aos clientes é conhecido;
- A rede tem capacidade de atender a todos os pontos de demanda, como também pode atender a nenhum (tendo seu custo igual a zero).

### 4.4 Características gerais

- Os clientes e as ligações entre eles são representados por um grafo não direcionado;
- A localização da demanda está nos vértices;
- Só há um depósito onde a frota tem que retornar;
- A operação é de entrega;
- Os custos das entregas são baseados na distância total percorrida por todos os veículos da frota;
- O custo da rede é dado pelo custo da sua implantação somado a um custo de manutenção;
- Os custos são amortizados em um determinado horizonte de tempo.

## 5. Meta-Heurísticas

O PRV é um problema NP-árduo, ou seja, para a sua resolução de forma exata é necessário explorar um número de combinações exponencial com o número de pontos de demanda. Como o PRV é um problema que está

contido no PDMG, podemos afirmar que ele também é NP-árduo. Sendo assim somos obrigados a utilizar uma abordagem aproximativa para o problema, pois a enumeração de todas as configurações possíveis se torna uma tarefa complexa, até mesmo para pequenas instâncias. Para isso utilizaremos as chamadas meta-heurísticas.

As meta-heurísticas levam uma maior vantagem sobre as heurísticas comuns, pois tem um maior poder de percorrer o espaço das soluções dos problemas. Nesses últimos tempos as meta-heurísticas que têm se destacado são as chamadas evolucionárias. Seu princípio se baseia em manipular uma população de indivíduos – denominados cromossomos – que representam soluções possíveis para o problema, os quais são modificados de alguma forma para que visando uma intensificação e/ou uma diversificação nas soluções de modo que ao final do processo sejam selecionadas boas soluções para o problema. Neste contexto, podemos destacar, principalmente os Algoritmos Genéticos (AG) e os Transgenéticos.

### 5.1 Algoritmos Genéticos

Baseados no princípio de seleção natural de Darwin, os AG's são constituídos de uma população no qual somente os indivíduos mais aptos sobrevivem. Utilizados inicialmente para fundamentar uma teoria geral de sistemas de adaptação robusta, os AG's logo encontraram aplicações práticas na determinação de máximos e mínimos de funções matemáticas. O algoritmo parte de uma população inicial, e aplica sobre ela basicamente dois operadores: mutação, onde um indivíduo se transforma mudando suas características, e um cruzamento, onde dois indivíduos da população geram um novo. Nessa população resultante é feita uma seleção, onde os indivíduos mais aptos (que representam as melhores soluções) têm uma maior probabilidade de permanecer na próxima geração (rodada do algoritmo). É menos comum, mas também é utilizado um operador de replicação, que cria uma cópia do indivíduo afetado.

Usando esses termos biológicos para abstrair os seus componentes e modificando o design dos cromossomos e a funcionalidade dos operadores, os AG's foram utilizados para resolver os mais diversos e complexos problemas de otimização, onde obtiveram excelentes resultados graças ao balanceamento das taxas dos operadores genéticos.

O AG para o nosso PDMG seguirá o modelo descrito na figura 3. O ponto chave do AG é a escolha dos operadores. No nosso problema, os operadores que forneceram os melhores resultados foram adaptações de conhecidos operadores utilizados para o Problema do Caixeiro Viajante, descritos por Larrañaga et al.: para o cruzamento o OX – Order Crossover – a uma taxa de 50%; para a mutação o ISM – Insert Mutation – a uma taxa de 5%; e para a seleção o TS – Tournament Selection – a 25% (todas as taxas são relativas ao tamanho da população).

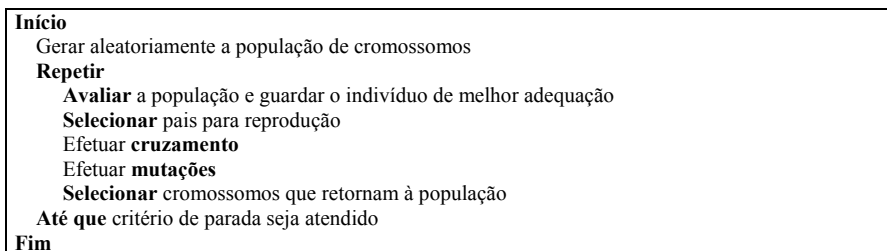


Figura 3. Meta Algoritmo Genético.

### 5.2 Algoritmos Transgenéticos

Apesar de apresentar resultados excelentes em vários problemas, os AG's têm alguns pontos desfavoráveis: geralmente não há uma maneira de se manter uma boa solução na população, pois os operadores genéticos são totalmente aleatórios e geralmente quebram boas soluções, que se perdem e não voltam mais à população; além disso, não há como ter uma forma eficiente de se influenciar externamente os indivíduos da população. Os Algoritmos Transgenéticos (AT) surgiram então como uma nova meta-heurística evolucionária que pretende abolir esses problemas próprios dos AG's.

Assim como o genético, o algoritmo transgenético também se utiliza da metáfora de população e cromossomos. Entretanto, com relação aos operadores ele utiliza uma política totalmente diferente: descarta as mutações e utiliza poucos cruzamentos. Os AT's apoiam-se no princípio da manipulação intencional do indivíduo, através de agentes externos. Estes agentes atacam geralmente cromossomos de baixa fitness “injetando informações” neles. Essas informações, denominadas memes, são pedaços de boas soluções para o problema. Eles são guardados em um repositório, denominado banco de memes, que são acessados pelos agentes.

Com isso é possível influenciar a população de uma forma mais direta, o que não é possível com os AG's. Maiores detalhes sobre os AT's são dados por Gouvêa(2001).

Pela facilidade de implementação e bons resultados em outros problemas conhecidos o AT utilizado será o ProtoG. A seguir (figura 4) temos a descrição de um algoritmo ProtoG.

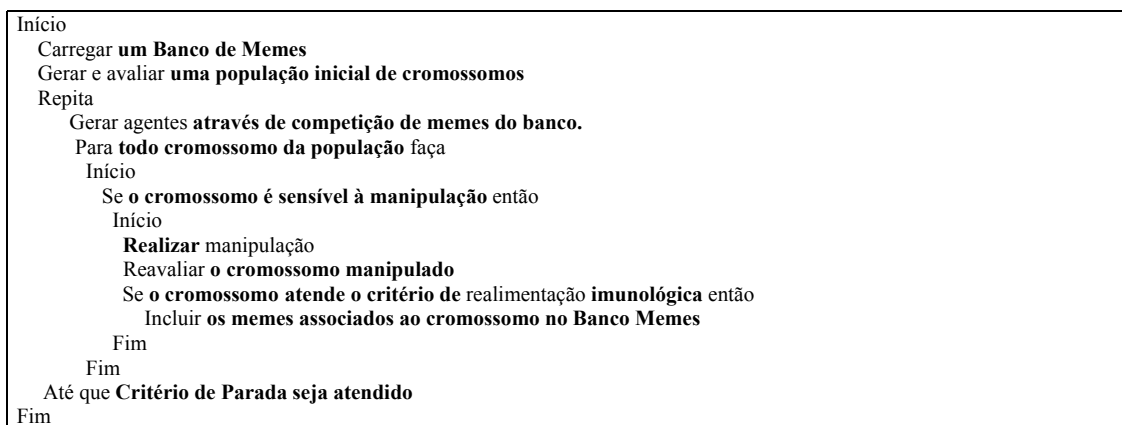


Figura 4. Meta Algoritmo ProtoG.

O banco de memes será carregado inicialmente com as melhores soluções encontradas pelos melhores algoritmos para cada problema separadamente. Os agentes utilizados são a Partícula Genética Móvel (PGM) e o Ruído. Estes tipos de agentes manipulam o cromossomo injetando uma informação por ele carregada, sendo que para a PGM essa manipulação só se concretiza se a fitness do cromossomo melhorar, enquanto que o Ruído sempre afeta o indivíduo atacado. Um exemplo de manipulação realizado por uma PGM está ilustrado na figura 5.

Para as nossas instâncias as melhores soluções foram obtidas com memes de tamanho variando entre 2% e 10% do número de pontos de demanda, a uma taxa de ataque de 2 ruídos para cada PGM.

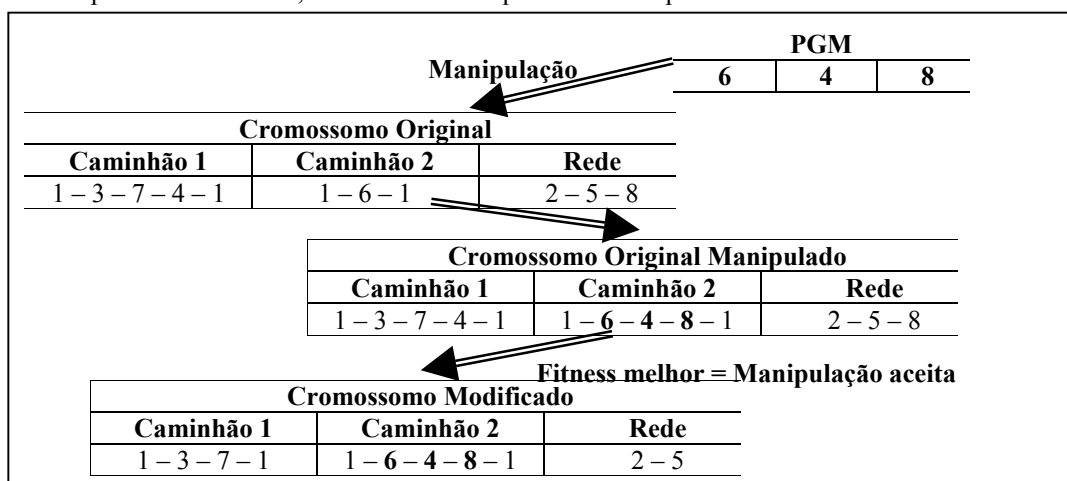


Figura 5. Manipulação por um agente PGM.

### 5.3 Design do cromossomo para o PDMG

O cromossomo para o nosso PDMG pode ser descrito como uma estrutura que contém vários arrays (figura 6), um para cada veículo da frota, sendo que cada array representa uma visita aos locais e a volta para o depósito; há um outro array que guarda informações sobre as empresas que serão atendidas pela rede de gás. A partir daí podemos projetar os operadores genéticos que serão utilizados pelos nossos algoritmos evolucionários.

<b>Caminhão 1</b>	<b>Caminhão 2</b>	...	<b>Caminhão X</b>	<b>Rede</b>
1 - 3 - 7 - 4 - 1	1 - 8 - 1	...	1 - 19 - 25 - 1	2 - 5 - 9 - 13

Figura 6. Formato do cromossomo para o PDMG.

### 5.4 Cálculo da fitness dos cromossomos

Um detalhe importante para ambos, AG e AT, é a forma de avaliação do indivíduo. Como o cálculo do custo é feito sobre um determinado horizonte de tempo temos que a fitness de cada solução será dada pela seguinte soma: a expectativa do custo de implantação e manutenção da rede fixa, amortizado no tempo para o qual o algoritmo foi planejado; e a soma das distâncias que serão percorridas multiplicadas pelo custo/quilômetro esperado para cada caminhão (estima-se nesse cálculo despesa com motorista, combustível e manutenção do caminhão e o equipamento nele instalado).

Caso a população possua alguma solução na qual os clientes alocados para um caminhão tenham uma demanda maior que sua capacidade de transporte, o cromossomo que contém essa solução não será excluído da população. Ao invés disso será atribuído um valor de penalidade, proporcional a demanda que deixaria de ser atendida, ao valor da sua função de adequação.

## 6. Resultados

Para o nosso problema foram criadas 12 instâncias, nas quais o número de clientes variavam entre 20 e 400, e o número de caminhões da frota entre 3 e 7 (para a descrição completa das instâncias ver Alves Filho 2003). Os resultados dos testes estão descritos na tabela 1. Os melhores resultados para cada instância estão destacados em itálico e negrito.

Instância	Algoritmo Genético		Algoritmo Transgenético ProtoG	
	Média	Melhor	Média	Melhor
1	2.364,00	2.315	<b>2.305,20</b>	<b>2.298</b>
2	1.999,30	<b>1.913</b>	<b>1.913,60</b>	<b>1.913</b>
3	1.614,50	<b>1.429</b>	<b>1.478,90</b>	<b>1.429</b>
4	5.107,40	<b>5.004</b>	<b>5.103,90</b>	5.076
5	4.938,60	<b>4.789</b>	<b>4.919,60</b>	4.882
6	4.849,50	<b>4.375</b>	<b>4.776,20</b>	4.592
7	<b>8.147,70</b>	<b>7.941</b>	8.345,70	8.001
8	9.728,30	<b>9.279</b>	<b>9.678,80</b>	9.501
9	<b>9.265,80</b>	<b>9.001</b>	9.436,80	9.323
10	101.063,20	100.809	<b>100.700,00</b>	<b>99.719</b>
11	100.970,50	100.617	<b>97.663,70</b>	<b>96.924</b>
12	100.265,60	99.964	<b>96.948,70</b>	<b>96.746</b>

Tabela 1: Comparação entre os algoritmos.

Em todos os casos testados, os valores médios obtidos pelos algoritmos foram mais baixos que os valores obtidos por uma distribuição feita somente por redes fixas, utilizando o algoritmo da Árvore Geradora Mínima. A tabela 2 expressa a diferença percentual entre as melhores médias dos nossos algoritmos usando a distribuição mista e uma possível distribuição feita somente pelas malhas de gás.

	Instância											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Diferença de custos	128%	174%	260%	51%	58%	67%	36%	17%	20%	2%	4%	5%

Tabela 2: Diferença de custos entre a distribuição mista e a distribuição feita somente por redes.

## 6. Conclusões

Os resultados da execução dos algoritmos demonstraram que em todas as instâncias a distribuição mista é economicamente melhor que uma distribuição feita somente pelas malhas fixas, representando em alguns casos diferenças maiores que 100%, o que nos leva a crer que este modelo pode se tornar uma ferramenta muito útil para auxiliar no planejamento de distribuições de gás como o descrito aqui, que representa a grande maioria dos casos das distribuições feitas no nosso país.

Quanto aos algoritmos pudemos perceber ambos AG e ProtoG têm desempenhos semelhantes, sendo que na maioria dos casos as médias das soluções obtidas pelo ProtoG é menor que as do AG.

## 7. Referências

- ALVES FILHO, S. E., Otimização na distribuição de gás através de redes fixas e frotas de veículos, Relatório(Graduação), DIMAp/UFRN, Natal, 2003.
- CASTRO, M. P., Algoritmos Evolucionários para o Problema de Otimização de Redes Urbanas de Distribuição de Gás Natural, XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, 2002.
- GOLDBARG, M. C., LUNA, H. P. L., Otimização Combinatória e Programação Linear. Editora Campus, Rio de Janeiro, 2000.
- GOUVÊA, E. F., Transgenética Computacional: um estudo algorítmico. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) COPPE/UFRJ, 2001.
- LARRAÑAGA P., KUIJPERS C. M. H., MURGA R. H., INZA I., DIZDAREVIC S., Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem: A Review of Representations and Operators, Department of Computer Science and Artificial Intelligence of University of the Basque Country, 1999.
- LIMA, C. M. R. R., Otimização da frota de veículos na distribuição de gás. XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campos do Jordão, São Paulo, 2001.