

ANTHONY BROOKE • DAVID KENDRIK
ALEXANDER MEERAUS



GAMS

SISTEMA GERAL DE MODELAGEM ALGÉBRICA



ANTHONY BROOKE
DAVID KENDRICK
ALEXANDER MEERAUS

GAMS

SISTEMA GERAL DE MODELAGEM ALGÉBRICA

Tradução
JACOB ZIMBARG SOBRINHO
Ph.D. pela Univesidade de São Paulo
Professor adjunto do Instituto de Matemática da USP

Supervisão técnica
JULIO MICHAEL STERN
Ph.D. pela Univesidade de Cornell, EUA
Diretor do Centro de Matemática e
Computação Aplicadas do IME – USP

JMStern Pesquisa Operacional



EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.

© 1997 Anthony Brooke
David Kendrick
Alexander Meeraus

1ª edição - 1997

*É proibida a reprodução total ou parcial
por quaisquer meios
sem autorização escrita da editora*

EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.

Fax: (011) 852-2707

Caixa Postal 5450

01061-970 - S. Paulo - SP - Brasil

Impresso no Brasil

Printed in Brazil



Conteúdo

CONTEÚDO	i
PREFÁCIO À EDIÇÃO BRASILEIRA	vii
PREFÁCIO	viii

PARTE I – Introdução

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE GAMS	1
(a) Princípios Gerais	1
(b) Documentação	2
(c) Portabilidade	2
(d) A interface com o usuário	3
(e) A Biblioteca de Modelos	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO LIVRO	3
1.4 PREPARANDO-SE PARA COMEÇAR	4
2 UM TUTORIAL GAMS	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 A ESTRUTURA DE UM MODELO GAMS	8
2.3 CONJUNTOS	9
2.4 DADOS	11
(a) Entrada de dados por meio de listas	11
(b) Entrada de dados por meio de tabelas	13
(c) Entrada de dados por meio de atribuição direta	13
2.5 VARIÁVEIS	14
2.6 EQUAÇÕES	15
(a) Declaração de equações	15
(b) A notação de soma e produto em GAMS	15
(c) Definição de equações	16
2.7 FUNÇÃO OBJETIVO	18
2.8 OS ENUNCIADOS DO TIPO MODEL e SOLVE	18
2.9 OS ENUNCIADOS DO TIPO DISPLAY	19
2.10 A BASE DE DADOS “.LO, .L, .UP, .M”	19
(a) Atribuição do limite de variáveis e/ou valores iniciais	19

(b) Transformação e display dos valores ótimos	20
2.11 SAÍDA DO PROGRAMA GAMS	21
(a) Impressão de <i>echo</i>	21
(b) Mensagens de erro	23
(c) Mapas de referência	25
(d) Listagens de equações	26
(e) Estatísticas do modelo	27
(f) Relatórios de status	27
(g) Relatórios de solução	28
2.12 CONCLUSÕES	30

PARTE II – A Linguagem **GAMS**

3 PROGRAMAS GAMS	34
3.1 A ESTRUTURA DOS PROGRAMAS GAMS	34
3.2 ORGANIZAÇÃO DOS PROGRAMAS GAMS	35
3.3 DEFINIÇÕES E TIPOS DE DADOS	37
3.4 ÍTENS DE LINGUAGEM	37
(a) Caracteres	37
(b) Palavras Reservadas e Tokens.	38
(c) Identificadores	38
(d) Rótulos	39
(e) Texto	40
(f) Números	40
(g) Delimitadores	41
(h) Comentários	41
3.6 SUMÁRIO	42
4 DEFINIÇÕES DE CONJUNTOS	43
4.1 CONJUNTOS SIMPLES	43
4.2 O ENUNCIADO ALIAS: NOMES MÚLTIPLOS PARA CONJUNTOS	46
4.3 SUBCONJUNTOS E VERIFICAÇÃO DE DOMÍNIO	47
4.4 CONJUNTOS MULTIDIMENSIONAIS E FUNÇÕES	47
4.5 SUMÁRIO	50
5 ENTRADA DE DADOS: PARÂMETROS, ESCALARES & TABELAS	52
5.1 PARÂMETROS	52
5.2 ESCALARES	54
5.3 TABELAS SIMPLES	54
5.4 TABELAS CONTINUADAS	55
5.5 TABELAS COM MAIS DE DUAS DIMENSÕES	56
5.6 RELATOS DE ERROS DURANTE A COMPILAÇÃO	58
5.7 ENUNCIADOS DO TIPO PARAMETER E TABLE QUE NÃO POSSUEM VERIFICAÇÃO DE DOMÍNIO	59
5.8 CONCLUSÕES	60

6	MANIPULAÇÃO DE DADOS COM PARÂMETROS	62
6.1	O ENUNCIADO DE ATRIBUIÇÃO	62
6.2	O ENUNCIADO DISPLAY	65
6.3	EXPRESSÕES SIMPLES	67
	(a) Operações aritméticas padrão	67
	(b) Operações Indexadas	68
	(c) Funções	69
	(d) Aritmética Estendida e Tratamento de Erros	71
6.4	TRATAMENTO DE EXCEÇÕES	72
	(a) Operadores Relacionais	72
	(b) O Operador Dólar	72
6.5	INTEGRIDADE DE DADOS E ENUNCIADO ABORT	76
6.6	UM EXEMPLO FINAL	77
6.7	CONCLUSÃO	80
7	VARIÁVEIS	81
7.1	DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS	81
7.2	LIMITES EM VARIÁVEIS	84
7.3	VARIÁVEIS EM DISPLAY E ENUNCIADOS DE ATRIBUIÇÃO	84
7.3	SUMÁRIO	86
8	EQUAÇÕES	87
8.1	DECLARAÇÃO DE EQUAÇÕES	87
8.2	DEFINIÇÕES SIMPLES DE EQUAÇÕES	88
8.3	DEFINIÇÕES DE EQUAÇÕES INDEXADAS	91
8.4	FUNÇÕES E OPERADORES ARITMÉTICOS UTILIZADOS EM DEFINIÇÕES DE EQUAÇÕES	92
8.5	OPERAÇÕES DÓLAR EM DEFINIÇÕES DE EQUAÇÕES	93
	(a) Controle das operações de índice pelo Dólar	93
	(b) Operadores Dólar internos à Álgebra	93
	(c) O Controle do Domínio de Definição de uma Equação pelo operador Dólar	95
8.6	ASPECTOS DO TRATAMENTO DE DADOS NAS EQUAÇÕES	96
8.7	SUMÁRIO	96
9	ENUNCIADOS TIPO MODEL & SOLVE	98
9.1	O ENUNCIADO TIPO MODEL	98
9.2	CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS	99
9.3	O ENUNCIADO SOLVE	100
9.4	PROGRAMAS COM VÁRIOS ENUNCIADOS DO TIPO SOLVE	101
	(a) Vários Modelos	101
	(b) Análise de Casos e Sensibilidade, e Relatórios	101
	(c) Implementação Iterativa de Algoritmos Não-standard	103
9.5	OPÇÕES USADAS COM ENUNCIADOS SOLVE	104
	(a) Detalhe de Controle de Saída	104
	(b) Controle dos Recursos do Computador Usado pelo Solver	105
	(c) Controle de Ações tomadas pelo Solver	106
	(d) O Controle pelo qual o Solver é Usado	107

9.6	TORNANDO NOVOS SOLVERS COMPATÍVEIS COM GAMS	107
10	SAÍDA GAMS	109
10.1	SAÍDA DE COMPILAÇÃO	109
(a)	Impressão de Echo do Arquivo de Entrada	109
(b)	Mapas produzidos	113
(c)	Diretivas Usuais de Controle tipo Dólar	115
10.2	SAÍDA NA EXECUÇÃO	116
10.3	SAÍDA PRODUZIDA POR UM ENUNCIADO DO TIPO SOLVE	117
(a)	A Listagem da Equação	117
(b)	A Listagem das Colunas	119
(c)	Estatísticas do Modelo	119
(d)	O Sumário do Solve	120
(e)	A Listagem da Solução	123
10.4	RELATÓRIO DE ERROS	125
(a)	Erros de Compilação	126
(b)	Erros de Execução	127
(c)	Erros de Solve	128
10.5	CONCLUSÃO	129
11	CONJUNTOS DINÂMICOS	130
11.1	CONJUNTOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS	130
11.2	ATRIBUIÇÕES DE CONJUNTOS	130
11.3	OPERAÇÕES DE CONJUNTOS: UNIÕES, INTERSECÇÕES E COMPLE- MENTOS	133
11.4	VERIFICAÇÃO DE DOMÍNIOS COM CONJUNTOS DINÂMICOS	134
12	CONJUNTOS COMO SEQUÊNCIAS: MODELOS DINÂMICOS	137
12.1	CONJUNTOS ORDENADOS E NÃO ORDENADOS	137
12.2	ORD E CARD	138
12.3	OPERAÇÕES DE AVANÇO E RETROCESSO	139
(a)	Atribuições de Avanços e Retrocessos	139
(b)	Avanço e Retrocesso em Equações	141
12.4	O ENUNCIADO LOOP	143
12.5	CONCLUSÃO	144

PARTE III – Tópicos especiais

13 O ENUNCIADO DISPLAY	146
13.1 A ORDEM DOS RÓTULOS EM DISPLAYS	147
13.2 ENUNCIADOS DE OPÇÕES QUE CONTROLAM DISPLAYS	149
13.3 EXPORTAÇÃO DE DADOS PARA OUTROS PROGRAMAS	151

14 SALVANDO E RECOMEÇANDO: O ARQUIVO DE TRABALHO	153
14.1 O CONCEITO DE ARQUIVO DE TRABALHO	153
14.2 SALVANDO OS ARQUIVOS DE TRABALHO	154
14.3 REINICIANDO	155
14.4 MANEIRAS DE APROVEITAR OS ARQUIVOS DE TRABALHO	156
(a) Programa de Desenvolvimento Incremental	156
(b) Lidando com Seqüências de Solves Difíceis	156
(c) Cenários múltiplos	157
14.5 SUMÁRIO	157
15 PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR	159
15.1 ASPECTOS GERAIS DE PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR	159
(a) Valores Iniciais	160
(b) Limites	160
(c) Escalonamento	161
(d) Reformulação da Função Objetivo	162
(e) Derivadas Descontínuas e Ótimos Múltiplos	162
15.2 ASPECTOS PARTICULARES A RESPEITO DE GAMS/MINOS	162
(a) O Sumário do Solve GAMS/MINOS	163
(b) Confronto com a não Viabilidade não-linear	164
(c) O Sumário da Tela	165
(d) Desconsiderando a Base	165
(e) O Uso dos Arquivos de Opções GAMS/MINOS	165
16 PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA	167
16.1 ASPECTOS GERAIS A RESPEITO DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA E MISTA	167
(a) As Tolerâncias de Término em GAMS	167
(b) Reiniciando as execuções MIP	168
16.2 ASPECTOS PARTICULARES A RESPEITO DE GAMS/ZOOM	168
17 MODELOS DE GRANDE PORTE	170
17.1 PORQUE MODELOS DE GRANDE PORTE DEVEM SER EVITADOS	170
17.2 COMO LIDAR COM MODELOS DE GRANDE PORTE	171
17.3 LIMITAÇÕES DE TAMANHO EM GAMS E SEUS SOLVERS	171
17.4 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DE EFICIÊNCIA	174
18 PONTUAÇÃO ENFRAQUECIDA	176
18.1 PONTO E VÍRGULA	176
18.2 VÍRGULA	177
18.3 FINAL DE LINHA	177
18.4 ASPAS	177

19 A BIBLIOTECA DE MODELOS	179
19.1 INTRODUÇÃO	179
19.2 OS MODELOS	180
19.3 REFERÊNCIAS	184

APÊNDICES

A A CHAMADA GAMS	190
A.1 A CHAMADA GENÉRICA GAMS "SEM XABU"	190
A.2 A CHAMADA GENÉRICA DE "OPÇÃO"	191
A.3 EXEMPLOS DE SEQUÊNCIAS DE CHAMADA PARA MICROS MS-DOS	192
A.4 EXEMPLOS DE SEQUÊNCIAS DE CHAMADA PARA SISTEMAS IBM CMS	193
A.5 EXEMPLOS DE SEQUÊNCIAS DE CHAMADA PARA SISTEMAS VAX VMS	193
B OPÇÕES DE CONTROLE PELO DÓLAR	194
B.1 CONTROLES DE FORMATAÇÃO DA ENTRADA	194
B.2 CONTROLES DE FORMATAÇÃO DA SAÍDA	195
B.3 CONTROLES DAS REFERÊNCIAS DE MAPAS	197
B.4 EXEMPLO	198
C O ENUNCIADO OPTION	201
D GAMS/MINOS	204
D.1 UMA DESCRIÇÃO GERAL DE GAMS/MINOS	204
D.2 O FORMATO DE UM ARQUIVO DE OPÇÕES GAMS/MINOS	210
D.3 OPÇÕES GAMS/MINOS	212
D.4 REFERÊNCIAS	230
E GAMS/ZOOM	231
E.1 UMA VISÃO GERAL DE ZOOM	231
E.2 OPÇÕES GAMS/ZOOM ESPECIFICADAS EM SEU PROGRAMA	240
E.3 FORMATO DO ARQUIVO DE OPÇÕES GAMS/ZOOM	241
E.4 OPÇÕES GAMS/ZOOM	242
E.5 DICAS PARA CONTROLAR A RAMIFICAÇÃO E PODA	245
F GRAMÁTICA	247
G GLOSSÁRIO	254
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	263
ÍNDICE	280

PREFÁCIO À EDIÇÃO BRASILEIRA

Tem sido um grande prazer para a J.M.Stern Pesquisa Operacional representar no Brasil o Software GAMS (Sistema Genérico de Modelagem Algébrica). GAMS é hoje o sistema de Programação Matemática mais utilizado em todo o mundo para modelagem em Pesquisa Operacional. Vários fatores contribuem, a nosso ver, para tal sucesso:

1. A Linguagem GAMS possui uma sintaxe simples, intuitiva e poderosa, que permite descrever com facilidade modelos complexos de Otimização.
2. O Sistema GAMS tem uma filosofia aberta, sendo compatível com uma grande variedade de *solvers*, i.e., programas resolventes para os problemas de Programação Matemática gerados pelo modelo de Pesquisa Operacional.
3. A existência de uma ampla biblioteca de modelos, já desenvolvidos e testados, facilita o desenvolvimento de novos programas.

A tradução deste guia para o Português é parte do esforço da J.M.Stern-P.O. de dar suporte para a crescente comunidade de usuários GAMS no Brasil. Esperamos também que a tradução do guia contribua para o ensino de Pesquisa Operacional e todas as suas áreas de aplicação. Os interessados poderão obter uma versão estudantil de GAMS e alguns solvers, juntamente com uma pequena biblioteca de exemplos. Para tanto, contacte-nos no endereço eletrônico abaixo. Somos gratos a vários alunos e professores da USP, UNICAMP e PUC-CAMP, por suas sugestões no trabalho de revisão desta tradução.

A biblioteca que acompanha a versão estudantil inclui exemplos nas áreas de Administração, Agro-Indústria, Comunicações, Desenvolvimento, Ecologia, Economia, Energia, Engenharia, Estatística, Finanças, Matemática, Nutrição, Planejamento, e Política de Comércio, Militar, de Transporte, Tributária, Urbana, etc.

J.M.Stern Pesquisa Operacional e
Equipamentos de Informática Ltda.
Rua Marcelino Ritter 1, Pacaembu,
01246-090, São Paulo, Brasil.
Tel/Fax: (+55-11)-259-1217 3159-2278
E-mail: stern@usa.net

Este guia de estudos descreve os principais aspectos de GAMS (a sigla abrevia General Algebraic Modelling System) e ensina como usá-lo. GAMS foi projetado para fazer a construção e resolução de modelos matemáticos amplos e complexos de forma mais direta para programadores, e mais inteligível para usuários de modelos em outras disciplinas, e.g., economistas. Pelo fato de poder efetuar enunciados concisos de modelos em uma linguagem que pode ser facilmente lida tanto por especialistas como por computadores, GAMS pode aumentar substancialmente a produtividade dos modelistas e expandir bastante a extensão e o uso das aplicações de programação matemática em análise de políticas e tomadas de decisão.

O ímpeto para o desenvolvimento de GAMS adveio das experiências frustrantes de um grupo de modelagem econômica do Banco Mundial. Mesmo as técnicas disponíveis mais evoluídas para desenvolver e resolver, e.g., modelos econômicos multi-setoriais em larga escala ou ainda modelos amplos de simulação e otimização em setores tais como agricultura, siderurgia e fertilizantes, possuíam sérios defeitos. Os programadores do grupo escreviam programas em FORTRAN para preparar a solução de cada modelo; o trabalho era entediante, exigindo muitos esforços, e os erros eram fáceis de fazer e difíceis de achar. Além disso, os economistas envolvidos freqüentemente achavam as representações computadorizadas de seus modelos complicadas, consumindo muito tempo para a compreensão e o trabalho; o programador do modelo, às vezes, era a única pessoa que conhecia exatamente como o modelo funcionava. Assim, a demissão de um programador fazia com que demorassem meses até que seu sucessor dominasse o programa. Os modelos também eram difíceis e caros demais para serem mudados, especialmente se a mudança contemplada não houvesse sido planejada ou prevista. Nas apresentações em seminários, os modeladores tinham que defender as versões existentes dos modelos, algumas vezes irracionalmente, porque o tempo e dinheiro envolvidos em mudanças tornavam as modificações propostas proibitivas. Esses modelos não podiam ser adaptados a novos ambientes, não apenas pelo conhecimento especializado de programação necessário, mas também porque os formatos de dados e os métodos de solução não eram portáteis. GAMS foi projetado para mudar essa situação, fornecendo uma estrutura de sistemas e uma linguagem de programação na qual concisão de expressões, generalidade e portabilidade são passíveis de fácil manutenção, além de usar o computador para rastrear tantos detalhes de programação quantos possíveis.

Tendo em vista as origens do sistema, não se constituiu em surpresa que as pessoas que desenvolveram GAMS devam considerável gratidão ao Banco Mundial. A pesquisa e desenvolvimento de GAMS foram custeados pela Comissão de Pesquisa do Banco (RPO671-58 e 673-06), e foram executados sob a direção de Alexander Meeraus no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (mais tarde Departamento) em Washington D.C. Muitas pessoas participaram do projeto e da implementação do sistema em tempos diversos; uma vez que a atribuição exata de cada um dos mesmos é impossível, nós simplesmente os listamos em ordem alfabética: Masood Ahmad, John Ayler, Jan Bisschop, Pete Bleyendaal, Tony Brooke, Henrik

Dahl, Arne Drud, Paul van der Eijk, Richard Inman, David Kendrick, Mohammed Ketabchi, Yonatan Levi, Alex Meeraus, Soren Nielsen, Sethu Palaniappan, Helen Patton, Skip Paules, Peter Pellemans, Mohammed Pourghadiri, e Ardy Stoutjesdijk. Os autores principais do *software* são: Tony Brooke, Paul van der Eijk e Alexander Meerhaus.

Sem o apoio, compreensão, e compromisso da administração *senior*, o projeto seria impossível. Em ordem cronológica, J. Duloy, A. Stoutjesdijk, e G. Ingram, foram os diretores responsáveis pelo departamento, e Hollis B. Chennery e Anne O. Kreuger, os vice-presidentes. B. Balassa, B. King e D. Lal foram administradores de pesquisa. Nós todos muito lhes devemos.

Também muito devemos a Allan Manne e Michael Saunders. Eles revisaram incansavelmente sucessivas versões deste livro e contribuíram para torná-lo mais claro, menos prolixo e mais didático. Peter Bocock fez um excepcional trabalho de edição e de arte final, e também recebemos comentários e sugestões de J. Colias, P. Manouchehri-Adib, B. McCullough, B. Paulin, S. Rogers, e R. Rosenthal.

Somos também gratos a Roy Marsten e Michael Saunders por cederem seu tempo gratuitamente enquanto ZOOM e MINOS estavam sendo modificados para rodar com GAMS. Também somos gratos àqueles que escreveram partes deste livro: Rick Rosenthal, pelo Capítulo 2, o tutorial; Philip Gill, Walter Murray, Bruce Murtagh, Michael Saunders e Margareth Wright, pelo Apêndice D sobre GAMS/MINOS; Roy Marsten e Jaya Singhal, pelo Apêndice E sobre GAMS/ZOOM. Um muito obrigado a todos os usuários de GAMS, que são em demasiado número para serem mencionados individualmente, que fizeram comentários sobre o *software*, nos mostraram seus modelos, e relataram alguns erros.

Anthony Brooke
The World Bank

David Kendrick
The University of Texas

Alexander Meeraus
The World Bank