

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Davi Romero de Vasconcelos

**Análise de Estratégias Utilizando
Verificação Formal de Modelos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Informática do Departamento de In-
formática da PUC-Rio

Orientador: Prof. Edward Hermann Haeuler

**Rio de Janeiro
Fevereiro de 2003**



Davi Romero de Vasconcelos

**Análise de Estratégias Utilizando
Verificação Formal de Modelos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Edward Hermann Haeuler

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Mário Roberto F. Benevides

COPPE/UFRJ

Prof. Marcus V. S. Poggi de Aragão

Departamento de Informática - PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Fevereiro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Davi Romero de Vasconcelos

Graduou-se em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Ceará.

Ficha Catalográfica

Vasconcelos, Davi Romero

Análise de estratégias utilizando verificação formal de modelos / Davi Romero de Vasconcelos; orientador: Edward Hermann Haeuler. — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Informática, 2003.

[9], 128f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Teoria dos jogos. 3. Verificação formal de modelos. 4. Lógica. I. Haeuler, Edward Hermann. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

Agradecimentos

Inicialmente gostaria de agradecer a minha mãe, Nadja Rodrigues Romero, ao meu pai, Luis Cruz de Vasconcelos Junior, a minha irmã, Marina Romero de Vasconcelos, e ao meu irmão, Eneas Romero de Vasconcelos, pelo eterno apoio e carinho que sempre me dedicaram.

Ao professor Edward Hermann por diversos motivos: por ter aceitado ser meu orientador; pela liberdade que me deu na escolha do meu tema de dissertação, fazendo com que eu mesmo amadurecesse o meu trabalho; pelo relacionamento de amigo, sempre cheio de brincadeiras.

Em especial, a professora e amiga Ana Teresa de Castro Martins do Departamento de Computação da UFC por ter me ensinado a gostar de pesquisar durante o meu período como aluno de graduação da UFC.

À Roberta Moreira Wichmann pelo apoio e carinho.

Ao vir para o Rio de Janeiro fazer meu mestrado jamais imaginei que encontraria um amigo tão sincero e solidário como o que encontrei, por isso só tenho muito a te agradecer Alexandre Altoó Pigatti.

Aos meus amigos de convívio durante o mestrado: Claudio (o baiano), Amanda (a minha amiga carioca) e Juliana.

Aos meus amigos do TecMF: Bazilio, Vaston, Cristian e Geiza. Em especial, a Geiza por ter me ajudado em diversas oportunidades.

À Universidade Federal do Ceará e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro por terem me dado a base necessária para o desenvolvimento do meu trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Em métodos formais, uma das abordagens que vem obtendo sucesso nos últimos anos é a de verificação formal. Dentro desta, vem se destacando uma técnica chamada de verificação de modelos (*model checking*), na qual se verifica automaticamente a validade de propriedades em sistemas acerca do funcionamento de um sistema. Atualmente, a verificação de modelos é muito empregada em informática na verificação formal de software e hardware, mas tem sido pouco utilizada em outras áreas, como em matemática e em economia. Esta dissertação visa aplicar verificação de modelos a problemas de economia. O tema da pesquisa será delimitado à Teoria dos Jogos. Algumas inadequações foram observadas, fazendo-se necessário algumas novas definições: uma definição de jogo genérica e qualitativa que se utiliza de uma linguagem lógica denominada de *Game Analysis Logic* (GAL); uma linguagem para descrever jogo denominada de *RollGame* (Romero - All Game); uma tradução de RollGame na linguagem de especificação de modelos; uma tradução da definição de jogo em estrutura de Kripke. Observou-se ainda que com a utilização de *model checking* em jogos consegue-se analisar estratégias de jogadores. Uma ferramenta para automatizar a tradução de *RollGame* em model checking foi desenvolvida, chamada de *StratAn-RollGame* (*Strategy Analyzed using RollGame*). Assim, a presente dissertação demonstrou que de fato é possível utilizar verificação de modelos em outras áreas.

Palavras Chaves:

Verificação de Modelos, Teoria dos Jogos, *GAL*, Tradução, *Estruturas de Kripke*, *RollGame*

Abstract

In formal methods, one of the approaches that have been successful lately is Model Checking, which consists in a technique to achieve automatic verification about a system behavior. Nowadays, the model checking is very frequently employed in computer science to formal verification of software and hardware, but it is not used in other knowledge fields, such as mathematics and economics. The purpose of this research is to apply model checking in economics problems, using Game Theory. Some inadequacies have been observed. Therefore, it is necessary to create new definitions: a generic and qualitative definition of game that uses one logic language called *Game Analysis Logic* (GAL); a new language to describe game called *RollGame* (Romero + All Game); a translation from RollGame to a language of model specification; a translation from game definition to Kripke structure. It is also been observed that the use of model checking makes it possible to analyze players' strategies. One tool, called *StratAn-RollGame* (Strategy Analyzed using RollGame), makes the translation from *RollGame* to model Checking automatic. Thus, the present research has demonstrated that is possible indeed to use model checking in other knowledge fields.

Keywords:

Model Checking, Game Theory, *GAL*, Translation, Kripke Structure, *Roll-Game*

Sumário

1	Motivação e Introdução	9
2	Verificação de Modelos (<i>Model Checking</i>)	15
2.1	Abordagem Lógica	16
2.2	<i>Symbolic Model Verifier</i> (SMV)	17
2.2.1	A Linguagem de Especificação de Modelos do SMV	18
2.2.2	Computation Tree Logic (CTL)	20
3	Jogos em Teoria dos Jogos e em Computação	23
4	Uma Nova Abordagem para Jogos	29
4.1	Definição de Jogos Sem Estratégias	29
4.2	Lógica de Análise de Jogos - <i>GAL</i> (G ame A nalysis L ogic)	31
4.3	Definição de Jogos Com Estratégias	34
4.4	Exemplos	36
4.5	Uma Linguagem para Definição de Jogo - RollGame (R omero + A ll G ame)	38
5	Traduções	43
5.1	Traduções da Definição de Jogo Proposta em <i>Estrutura de Kripke</i>	43
5.1.1	Tradução de Jogo Sem Estratégias em <i>Estrutura de Kripke</i>	43
5.1.2	Tradução de Jogo Com Estratégias em <i>Estrutura de Kripke</i>	45
5.2	Traduções da linguagem RollGame na Linguagem do Verificador de Modelos	47
5.2.1	Tradução de Jogo Sem Estratégia em RollGame na Lin- guagem do SMV	50
5.2.2	Tradução de Jogo Com Estratégias em RollGame na Lin- guagem do SMV	52
5.2.3	Uma Ferramenta que Automatizará as Traduções da lin- guagem RollGame na linguagem do SMV - StratAn- RollGame (S trategy A nalyzed Using R oll G ame)	58
6	Análise e Construção de Estratégias	60
6.1	Análises de Estratégias do Jogo da Velha	62
6.2	Construção de Estratégias para o Jogo da Velha	68
6.3	Análises de Estratégias do Jogo sobre a Guerra do Iraque	72

7	Conclusão e Relacionamentos com outros trabalhos	76
A	Estudo de Caso 1	78
A.1	Jogo da Velha na Definição de Jogo Sem Estratégia	78
A.2	A Especificação do Jogo da Velha Sem Estratégias em RollGame	79
A.3	A Especificação do Jogo da Velha Com Estratégias em RollGame	80
A.4	Código gerado a partir de jogo da velha sem estratégia	85
A.5	Análise de Estratégia do jogo da velha com estratégia	97
B	Estudo de Caso 2	102
B.1	Especificação do Jogo sobre a Guerra do Iraque em RollGame .	104
B.2	Análises de Estratégias no Jogo sobre a Guerra	108
C	Correção da Tradução de <i>GAL</i>	129