



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Otimização de Negociação Dinâmica para Múltiplas Áreas Restritas de Fluxo no Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo

Leonardo Luiz Barbosa Vieira Cruciol

Tese apresentada como requisito parcial
para conclusão do curso de Doutorado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Li Weigang

Coorientador
Prof. Dr. John-Paul Clarke

Brasília, 03 de Dezembro de 2015

Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Doutorado em Informática

Coordenadora: Prof. Dr.^a Célia Ghedini Ralha

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador) – CIC/UnB
Prof. Dr. Ricardo Pezzuol Jacobi – CIC/UnB
Prof. Dr. Vander Ramos Alves – CIC/UnB
Prof.^a Dr.^a Yaeko Yamashita – ENC/UnB
Prof.^a Dr.^a Anna Helena Reali Costa – POLI/USP
Prof. Dr. Antonini Puppim Macedo – BOEING/Brasil

CIP – Catalogação Internacional na Publicação

Cruciol, Leonardo Luiz Barbosa Vieira.

Otimização de Negociação Dinâmica para Múltiplas Áreas Restritas de Fluxo no Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo /
Leonardo Luiz Barbosa Vieira Cruciol. Brasília : UnB, 2015.
119 p. : il. ; 29,5 cm.

Tese (Doutor) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

1. Teoria dos Jogos, 2. Sistemas Multiagentes, 3. Aprendizagem por Reforço, 4. Gerenciamento de Tráfego Aéreo, 5. Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo

CDU 004

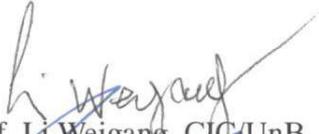
Endereço: Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro – Asa Norte
CEP 70910-900
Brasília – DF – Brasil

Leonardo Luiz Barbosa Vieira Cruciol

Otimização de Negociação Dinâmica para Múltiplas Áreas Restritas de Fluxo no Programa de Opções de Trajetórias Colaborativas

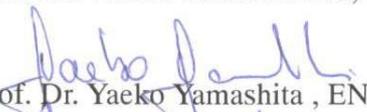
Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-graduação em Informática da Universidade de Brasília, pela Comissão formada pelos professores:

Orientador:


Prof. Dr. Prof. Li Weigang, CIC/UnB _ Orientador


Prof. Dr. Ricardo Pezzuol Jacobi , CIC/UnB


Prof. Dr. Vander Ramos Alves, CIC/UnB


Prof. Dr. Yaeko Yamashita , ENC/UnB


Prof. Dr. Anna Helena Reali Costa, USP

Vista e permitida a impressão.
Brasília, 03 de dezembro de 2015.

Prof.^a Dr.^a Célia Ghedini Ralha
Programa de Pós-Graduação em Informática
Departamento de Ciência da Computação
Universidade de Brasília

Dedicatória

À minha família que sempre me apoiou nos momentos mais difíceis e possibilitou que eu alcançasse este objetivo.

Agradecimentos

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Li Weigang, pelo apoio durante toda a pesquisa no mestrado e doutorado.

Agradeço aos professores da UnB, que me apoiaram sempre que foi necessário, em especial aos doutores Alba Cristina M. de Melo; Genaina Nunes Rodrigues, Marcelo Ladeira; Maria Emilia Machado Telles Walter; Mauricio Ayala Rincón, Priscila América Solis M. Barreto, Ricardo Pezzoul Jacobi e Vander Ramos Alves, os quais tive o prazer de assistir suas aulas.

Agradeço ao Prof. Dr. John-Paul Clarke do *Georgia Institute of Technology*, por ter acreditado e apoiado meu trabalho durante o período que estive pesquisando sob sua supervisão.

Agradeço aos colegas de pesquisa do Laboratório de Modelo Computacional para Transporte Aéreo (TransLab) da Universidade de Brasília pelo apoio durante toda a pesquisa, em especial ao Antonio Junior pelo apoio desde o mestrado.

Agradeço aos colegas de pesquisa do *Air Transportation Laboratory* (ATL) do *Georgia Institute of Technology* pelo apoio durante toda a pesquisa, em especial aos colegas Jim Brooks; Dr. Eric Feron; Dr. Bosung Kim; Harold Nikoue; Dr. Leihong Li; Parth Shah; Hasan Tawab; Bo Zhu; Gustavo Lee; Mandy Xie e Jong Park.

Agradeço ao CNPq, por possibilitar financeiramente o intercâmbio durante o curso no *Georgia Institute of Technology*.

“When everything seem to be going against you, remember that the airplane takes off against the wind, not with it.”

Henry Ford

Resumo

A otimização de recursos no gerenciamento de tráfego aéreo é, por si só, um problema computacionalmente complexo. Durante o último ano, foi colocada em operação nos EUA uma evolução de alguns dos atuais programas de gerenciamento de tráfego aéreo, o *Collaborative Trajectory Options Program* (CTOP), pela *Federal Aviation Administration*. Esse programa faz parte da iniciativa *Next Generation Air Transportation System* e possibilita a melhoria dos resultados de negócio pelas companhias aéreas.

Existe uma grande dificuldade pelas companhias aéreas, dada pela incerteza inerente ao complexo processo, na definição de quantas rotas devem ser enviadas para cada voo. O desenvolvimento de uma solução que trate de maneira dinâmica, quando o CTOP é iniciado, se mostrou computacionalmente complexa do ponto de vista da modelagem das informações a serem utilizadas. A utilização de uma estratégia errada pode gerar atrasos diversas vezes maiores.

Existe uma solução para este problema, na qual foram utilizados algoritmos de busca *greedy* para apresentar as rotas com menor atraso para uma determinada companhia aérea envolvida no CTOP, porém esta solução não trata a incerteza envolvida ao serem assumidas premissas não reais. Assim, esta tese apresenta um modelo inovador que utiliza sistemas inteligentes para o tratamento de incertezas ao sugerir ao especialista quantas rotas deverão ser enviadas.

O processo de disputa apresentado foi dividido em dois níveis. Primeiro, resolvido pelo modelo computacional *Single Games for CTOP* (SG-CTOP), como realizar a otimização dinâmica e automática do processo de disputa de *slots* disponíveis para múltiplas áreas restritas de fluxo durante a primeira rodada de negociações, no qual não existe qualquer conhecimento prévio dos seus concorrentes. Segundo, resolvido pelo modelo computacional *Repeated Games for CTOP* (RG-CTOP), como a estratégia de cada companhia irá afetar a estratégia da outra e possibilitar o aprendizado de reputações adaptando, assim, as estratégias utilizadas nas negociações anteriores.

Os resultados alcançados pelos dois modelos se mostraram promissores para as companhias aéreas. Em dois estudos de caso foram gerados 20.000 negociações em CTOP, assim, retratando os mais diversos casos e estratégias utilizadas dentro do CTOP. O modelo SG-CTOP alcançou um desempenho superior, ou igual, em 97% dos casos, quando comparado com as melhores estratégias atuais, reduzindo em 537 horas de atrasos para uma determinada companhia. Quanto ao modelo RG-CTOP, foi alcançada uma taxa de melhoria aproximada de 21%, para uma determinada companhia aérea, ao se considerar o aprendizado e adaptação de estratégias frente aos seus concorrentes na disputa dos melhores *slots*.

Palavras-chave: Teoria dos Jogos, Sistemas Multiagentes, Aprendizagem por Reforço, Gerenciamento de Tráfego Aéreo, Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo

Abstract

The optimization of resources in air traffic management is a computationally complex problem. During the last year, the Collaborative Trajectory Options Program (CTOP) had started as an operational evolution of current air traffic management programs by Federal Aviation Administration in USA. This program is part of Next Generation Air Transportation System initiative and makes possible to improve airlines' business results.

Airlines have a great issue to decide how many routes might be sent for each flight, because of the uncertainty in this complex process. The development of a solution that handle dynamically, as soon as CTOP has started, it was very complex considering the information modeling to be used. A wrong strategy could achieve delays several times greater.

There is a solution for this problem, which used greedy algorithms to find out the routes with minimum delay for a specific airline in CTOP. However, this solution does not handle the uncertainty involved once some unreal assumptions are made. So, this thesis presents an innovation model to suggest how many routes should be sent by intelligent systems to handle uncertainties.

The negotiation process was divided into two levels. First, using the computational model Single Games for CTOP (SG-CTOP), how to realize a dynamical and automatic optimization in the dispute process of available slots for multiple flow constrained areas during the first negotiation, which there is no previous knowledge about competitors. Second, using the computational model Repeated Games for CTOP (RG-CTOP), how the competitors' strategy could change the strategy of an airline and makes possible to learn by competitors' reputation, adjusting the past strategies.

The achieved results by both computational models are promising for airlines. In the case studies, 20.000 CTOP negotiations were generated. Thus, it was studied several cases and strategies used in CTOP. The SG-CTOP achieved a performance better, or equal, in 97% of CTOP negotiations, when it was compared to others strategies, representing a delay reduction of 537 hours for the airline. The RG-CTOP achieved a rate improvement about 21% for an airline, when it was used a learning process by adapting its strategies against competitors to be allocated in better available slots.

Keywords: Game Theory, Multiagent System, Reinforcement Learning, Air Traffic Management, Collaborative Trajectory Options Program

Sumário

Lista de Figuras	12
Lista de Tabelas	15
Capítulo 1 Introdução	22
1.1 Motivação	22
1.2 Justificativa	24
1.3 Objetivos	27
1.4 Metodologia de Pesquisa	29
1.4.1 Embasamento Teórico	29
1.4.2 Desenvolvimento da Pesquisa	30
1.5 Estrutura do Trabalho	31
Capítulo 2 Fundamentação Teórica	33
2.1 Sistemas Multiagentes	33
2.1.1 Motivação	34
2.1.2 Agentes Inteligentes	35
2.1.3 Utilização de Sistemas Multiagentes	36
2.2 Aprendizagem por Reforço	37
2.2.1 Interação Agente-Ambiente	38
2.2.2 Principais Algoritmos	39
2.2.3 Aplicação da Aprendizagem por Reforço	41
2.3 Teoria dos Jogos	42
2.3.1 Conceitos Básicos	43
2.3.2 Tipos de Jogos	44
2.3.3 O Dilema dos Prisioneiros	45
Capítulo 3 Gerenciamento de Tráfego Aéreo	47
3.1 Visão Geral	47
3.1.1 Espaço Aéreo do Brasil	49
3.1.2 Gerenciamento do Espaço Aéreo nos EUA	49
3.2 Collaborative Trajectory Options Program	53
3.2.1 Trajectory Options Set	54
Capítulo 4 Modelos Computacionais em ATM	58
4.1 Sistemas de Suporte à Decisão	58
4.2 Abordagem de Sistemas Multiagentes	59

4.3	Abordagem de Aprendizagem por Reforço	60
4.4	Abordagem em <i>Greedy</i> no CTOP	63
4.4.1	Visão Geral	63
4.4.2	Resultados Alcançados	66
4.5	Abordagem em Teoria dos Jogos no CTOP	67
4.5.1	Visão Geral e Aplicação	67
4.5.2	Estudo de Caso	70
4.5.3	Resultados Alcançados <i>versus</i> Abordagem <i>Greedy</i>	71
Capítulo 5 Incerteza na Tomada de Decisão no CTOP		77
5.1	Otimização de Negociação via TOS	77
5.2	Analisando as Negociações no CTOP	81
Capítulo 6 Modelos de Teoria de Jogos para o CTOP		91
6.1	Single Games for CTOP	91
6.1.1	Casos e Cenários de Jogo	93
6.1.2	Estratégias de Jogo	95
6.1.3	Função de Payoff	97
6.2	Repeated Games for CTOP	100
6.2.1	Casos e Cenários de Jogo	102
6.2.2	Função de Payoff e dos Agentes	104
Capítulo 7 Arquitetura e Implementação		107
7.1	Definições Iniciais	107
7.2	SG-CTOP	107
7.3	RG-CTOP	110
7.4	Bancos de Dados	117
Capítulo 8 Estudo de Caso		120
8.1	Planejamento	120
8.1.1	Condições Iniciais (SG-CTOP)	121
8.1.2	Condições Iniciais (RG-CTOP)	124
8.1.3	Agentes Inteligentes do RG-CTOP	130
8.2	Execução	132
8.2.1	Validação do Modelo SG-CTOP	133
8.2.2	Validação do Modelo RG-CTOP	142
8.3	Resultados	150
8.3.1	SG-CTOP	150
8.3.2	RG-CTOP	154
8.4	Análise dos Resultados Alcançados	158
Capítulo 9 Conclusão		165
9.1	Análise Conclusiva	165
9.2	Pesquisa Futura	167
Referências Bibliográficas		168

Apêndice A Voos Utilizados no Estudo de Caso SG-CTOP	181
A.1 Aeroporto Internacional de <i>Newark</i>	181
Apêndice B Voos Utilizados no Estudo de Caso RG-CTOP	191
B.1 Aeroporto Internacional de <i>Dallas/Fort Worth</i>	191

Lista de Figuras

1.1	Visão geral do CTOP (FAA, 2014a)	25
2.1	Visão geral de um SMA	34
2.2	Agente com capacidade de comunicação (Reis, 2003), adaptado . .	36
2.3	Aprendizagem por Reforço (Sutton <i>et al.</i> ,1998)	38
2.4	Dilema dos Prisioneiros	46
3.1	Espaço aéreo do Brasil (Crespo, 2010)	50
3.2	Organização do Espaço Aéreo nos EUA (FAA, 2008)	51
3.3	Exemplo do CTOP	54
3.4	ARTCC nos EUA (FAA, 2014)	55
3.5	Exemplo TOS (Bosung e Clarke, 2014)	56
4.1	Aeronaves recebendo medidas restritivas, adaptado (Agogino e Tumer, 2008)	60
4.2	Tela do FACET apresentando o tráfego nas rotas e as estatísticas do fluxo aéreo (Agogino e Tumer, 2008)	61
4.3	Abordagem tradicional do agente agindo em um ambiente simples, adaptado (Agogino e Tumer, 2009)	62
4.4	Procedimento de otimização (Bosung e Clarke, 2014), adaptado . .	64
4.5	Árvore de busca agrupado por FCA (Bosung, 2015)	64
4.6	Exemplo do algoritmo de busca (Bosung e Clarke, 2014)	65
4.7	Comparação entre as soluções (Bosung e Clarke, 2014)	66
4.8	Visão geral do modelo em Teoria dos Jogos	68
4.9	Visão geral dos casos e cenários	69
4.10	Visão geral da demanda CTOP	71
4.11	Atraso associado para a Cia. A em Teoria dos Jogos	75
4.12	Atraso associado para a Cia. A por movimentos de jogo	76
4.13	Comparação dos resultados em <i>Greedy</i> e Teoria dos Jogos para a Cia. A	76
5.1	Processo de decisão TOS para o CTOP	80
5.2	Movimento do Atraso Mínimo	81
5.3	Resultados Possíveis para a Cia A x Resultado Final do CTOP . .	82
5.4	Melhores movimentos para o Caso 50-50 no cenário 1	84
5.5	Melhores movimentos para o Caso 50-50 no cenário 2	84
5.6	Melhores movimentos para o Caso 50-50 no cenário 3	85
5.7	Melhores movimentos para o Caso 67-33 no cenário 1	86

5.8	Melhores movimentos para o Caso 67-33 no cenário 2	86
5.9	Melhores movimentos para o Caso 67-33 no cenário 3	87
5.10	Melhores movimentos para o Caso 75-25 no cenário 1	88
5.11	Melhores movimentos para o Caso 75-25 no cenário 2	88
5.12	Melhores movimentos para o Caso 75-25 no cenário 3	89
5.13	Atrasos Mínimo Estimado (Cia A) x Resultado Final	90
6.1	<i>Single Games for CTOP</i>	92
6.2	Casos e cenários no SG-CTOP	94
6.3	Modelo de jogo SG-CTOP	95
6.4	Estimativa conhecida pela <i>CompanhiaAéreaA</i>	96
6.5	Matriz de estimativas	97
6.6	<i>Repeated Games for CTOP</i>	101
6.7	Casos e cenários no RG-CTOP	105
7.1	Arquitetura do SG-CTOP	108
7.2	Tela do conjunto de jogadas no SG-CTOP	109
7.3	Tela individual da jogada no SG-CTOP	110
7.4	Arquitetura do RG-CTOP	111
7.5	Arquitetura dos agentes no RG-CTOP	113
7.6	Tela de visão geral de um estudo de caso no RG-CTOP	114
7.7	Tela de sorteio dos voos no RG-CTOP	114
7.8	Telas com <i>slots</i> disponíveis por FCA no RG-CTOP	115
7.9	Tela com as EAT's de cada voo no RG-CTOP	115
7.10	Telas RG-CTOP	116
7.11	Telas RG-CTOP	116
7.12	Telas RG-CTOP	117
7.13	MER do banco de dados <i>Voo</i>	118
7.14	MER do banco de dados <i>CTOP</i>	119
8.1	Árvore de decisão dos estudos de caso	121
8.2	Espaço aéreo da FCA001 e FCA002	122
8.3	Probabilidade para ocorrência de cada caso	124
8.4	Espaço aéreo do aeroporto DFW considerando as duas FCA's, adaptado (FAA, 2015)	125
8.5	Espaço aéreo da FCACQY (FAA, 2015)	125
8.6	Espaço aéreo da FCAJEN (FAA, 2015)	126
8.7	Probabilidade para ocorrência de cada caso	130
8.8	Estrutura de detecção de mudança de estratégia pelo Agente Detetive131	
8.9	Método de criação e avaliação dos ciclos	132
8.10	Matriz de estimativas de uma demanda CTOP	140
8.11	PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> nos casos 1, 2 e 3	152
8.12	PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 1	153
8.13	PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 3	153

8.14	PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 1 e estratégia 100%	155
8.15	PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 1 e estratégia 33% no 2º caso	156
8.16	PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 2 e estratégia 100%	156
8.17	PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 3 e estratégia 33% no 1º caso	157
8.18	PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 6 e estratégia 33% no 3º caso	157
8.19	PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a <i>CompanhiaAéreaA</i> no caso 5 e estratégia 33% no 2º caso	158
8.20	Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 1, quando a <i>CompanhiaAéreaB</i> envia NOSLOT	159
8.21	Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 1, quando a <i>CompanhiaAéreaB</i> envia 1 trajetória + NOSLOT	160
8.22	Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 1, quando a <i>CompanhiaAéreaB</i> envia 2 trajetórias + NOSLOT	160
8.23	Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 2, quando a <i>CompanhiaAéreaB</i> envia NOSLOT	161
8.24	Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 2, quando a <i>CompanhiaAéreaB</i> envia 1 trajetória + NOSLOT	161
8.25	Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 3, quando a <i>CompanhiaAéreaB</i> envia 2 trajetórias + NOSLOT	162
8.26	Equilíbrio de Nash para os casos 1, 2 e 3	163
8.27	Equilíbrio de Nash para o caso 1	163
8.28	Equilíbrio de Nash para o caso 2	163
8.29	Equilíbrio de Nash para o caso 3	164

Lista de Tabelas

4.1	Voos rastreados quando a <i>CompanhiaAéreaA</i> possuía 67% dos voos e a <i>CompanhiaAéreaB</i> 33%	72
4.2	Voos rastreados quando a <i>CompanhiaAéreaA</i> possuía 50% dos voos e a <i>CompanhiaAéreaB</i> 50%	72
4.3	Voos rastreados quando a <i>CompanhiaAéreaA</i> possuía 25% dos voos e a <i>CompanhiaAéreaB</i> 75%	73
4.4	Voos rastreados quando a <i>CompanhiaAéreaA</i> possuía 67% dos voos e a <i>CompanhiaAéreaB</i> 33%	73
4.5	Voos rastreados quando a <i>CompanhiaAéreaA</i> possuía 50% dos voos e a <i>CompanhiaAéreaB</i> 50%	74
4.6	Voos rastreados quando a <i>CompanhiaAéreaA</i> possuía 25% dos voos e a <i>CompanhiaAéreaB</i> 75%	74
8.1	Restrições na FCACQY	126
8.2	Restrições na FCAJEN	127
8.3	Voos capturados da <i>CompanhiaAéreaA</i> no CTOP entre 01:30pm e 10:00pm com destino ao EWR, LGA e JFK	139
8.4	Capacidade por período durante o CTOP em cada FCA	139
8.5	Um dos possíveis resultados finais do jogo	141
8.6	Voos da <i>CompanhiaAéreaA</i> capturados no CTOP entre 12:00pm e 02:00pm com destino ao DFW	144
8.7	Capacidade por período durante o CTOP em cada FCA	144
8.8	Relação entre voos da companhia aérea <i>A</i> e capacidade por período	144
8.9	EAT de entrada na FCAJEN e FCACQY para os voos capturados da <i>CompanhiaAéreaA</i>	146
8.10	<i>Slots</i> disponíveis para cada FCA	146
8.11	Exemplo do envio do TOS	147
8.12	Voos da <i>CompanhiaAéreaA</i> ordenados pelo IAT	148
8.13	Lista final dos voos associados em cada FCA da <i>CompanhiaAéreaA</i>	149
8.14	Atraso após um ciclo do SG-CTOP para cada estratégia e caso	151
A.1	Voos da companhia aérea <i>A</i> com chegada no EWR durante o período do CTOP	184
A.2	Voos da companhia aérea <i>A</i> com chegada no JFK durante o período do CTOP	187
A.3	Voos da companhia aérea <i>A</i> com chegada no LGA durante o período do CTOP	190

B.1	Voos da companhia aérea <i>A</i> com chegada no DFW durante o período do CTOP	204
-----	---	-----

Abreviaturas

ACC - *Area Control Center*

A-CDM - *Airport Collaborative Decision Making*

AFP - *Airspace Flow Program*

AHD - *Airborne Holding Delay*

AHP - *Air Holding Problem*

AGL - *Above Ground Level*

ARTCC - *Air Route Traffic Control Center*

ASM - *Air Space Management*

ATC - *Air Traffic Control*

ATFM - *Air Traffic Flow Management*

ATL - *Air Transportation Laboratory*

ATL - *Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport*

ATM - *Air Traffic Management*

BST - *British Summer Time*

CFA - *Controlled Firing Area*

CDM - *Collaborative Decision Making*

CDT - *Central Daylight Time*

CGNA - *Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea*

CINDACTA - *Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo*

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CTOP - *Collaborative Trajectory Options Program*

DA - *Delay Assignment*

DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DFW - *Dallas/Fort Worth International Airport*

DSS - *Decision Support System*

EAT - *Earliest Arrival Time*

EDT - *Eastern Daylight Time*

ERTD - *Earliest Runway Time of Departure*

ETA - *Estimated Time of Arrival*

EUA - Estados Unidos da América

EUROCONTROL - *European Organisation for the Safety of Air Navigation*

EWR - *Newark Liberty International Airport*

FAA - *Federal Aviation Administration*

FACET - *Future ATM Concepts Evaluation Tool*

FCA - *Flow Constrained Area*

FEA - *Flow Evaluation Area*

FIR - *Flight Information Region*

FL - *Flight Level*

GDP - *Ground Delay Program*

GHD - *Ground Holding Delay*

GHP - *Ground Holding Problem*

GMT - *Greenwich Mean Time*

IATA - *International Air Transport Association*

IAP - *Instrument Approach Procedures*

IAT - *Initial Arrival Time*

IFR - *Instrument Flight Rules*

IGTA - *Initial Gate Time of Arrival*

IGTD - *Initial Gate Time of Departure*

JFK - *John F. Kennedy International Airport*

KZAB - *Albuquerque Air Route Traffic Control Center*

KZAU - *Chicago Air Route Traffic Control Center*

KZBW - *Boston Air Route Traffic Control Center*

KZDC - *Washington DC Air Route Traffic Control Center*

KZDV - *Denver Air Route Traffic Control Center*

KZFW - *Ft. Worth Air Route Traffic Control Center*

KZID - *Indianapolis Air Route Traffic Control Center*

KZJX - *Jacksonville Air Route Traffic Control Center*

KZKC - *Kansas City Air Route Traffic Control Center*

KZHU - *Houston Air Route Traffic Control Center*

KZLA - *Los Angeles Air Route Traffic Control Center*

KZLC - *Salt Lake City Air Route Traffic Control Center*

KZMA - *Miami Air Route Traffic Control Center*

KZME - *Memphis Air Route Traffic Control Center*

KZNY - *New York Air Route Traffic Control Center*

KZMP - *Minneapolis Air Route Traffic Control Center*

KZOA - *Oakland Air Route Traffic Control Center*

KZOB - *Cleveland Air Route Traffic Control Center*

KZSE - *Seattle Air Route Traffic Control Center*

KZTL - *Atlanta Air Route Traffic Control Center*

LAS - *McCarran International Airport*

LAX - *Los Angeles International Airport*

LGA - *LaGuardia Airport*

MDT - *Mountain Daylight Time*

MER - *Modelo Entidade-Relacionamento*

MIA - *Miami International Airport*

MOA - *Military Operation Area*

MSL - *Mean Sea Level*

MTR - *Military Training Route*

MySQL - *My Structured Query Language*

NAS - *National Airspace System*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NFDC - *National Flight Data Center*

NextGen - *Next Generation Air Transportation System*

NM - *Nautical Miles*

NSA - *National Security Area*

PAZA - *Anchorage Air Route Traffic Control Center*

PHP - *Personal Home Page*

PHZH - *Honolulu Air Route Traffic Control Center*

PR - *Program Rate*

ORD - *Chicago O'Hare International Airport*

RBS - *Ration-by-Schedule*

RDBMS - *Relational Database Management System*

RMNT - *Required Minimum Notification Time*

RTC - *Relative Trajectory Cost*

SAO - *Special Area of Operation*

S-CDM - *Surface Collaborative Decision Making*

SARSA - *State-Action-Reward-State-Action*

SFO - *San Francisco International Airport*

SMA - *Sistemas Multiagentes*

SQL - *Structured Query Language*

SVFR - *Special Visual Flight Rules*

TFR - *Temporary Flight Restriction*

TMA - *Terminal Management Area*

TOS - *Trajectory Options Set*

TRM - *Jacqueline Cochran Regional Airport*

TVET - *Trajectory Valid End Time*

TVST - *Trajectory Valid Start Time*

TransLab - *Laboratório de Modelo Computacional para Transporte Aéreo*

UML - *Unified Modeling Language*

VFR - *Visual Flight Rules*

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os sistemas de suporte à decisão (*Decision Support Systems - DSS*) possibilitam aos especialistas que tomem decisões embasadas em mais informações como estimativas de riscos, simulações de ações, análises em tempo real, dentre outras. Essas atividades são possíveis, dentre diversas ferramentas, pela aplicação de técnicas de Inteligência Artificial como Aprendizagem por Reforço, Sistemas Multiagentes e algoritmos inteligentes.

Os seres humanos e computadores podem ser considerados complementares em diversos aspectos. Um DSS bem construído é aquele que ajuda a tomar a decisão ao invés de substituir o especialista responsável. O poder de uma decisão tomada por um ser humano em situações que lidam com a intuição, conceituação e criatividade, normalmente, são pontos fracos quando colocados em sistemas (Agogino e Tumer, 2008).

Entretanto, o ser humano é mais suscetível a erros quando está envolvido em situações complexas. Assim, os sistemas levam vantagens quando é necessário atingir pontos como velocidade, paralelismo e/ou uma grande quantidade de informações de maneira precisa. É importante que o sistema de apoio à decisão combine as habilidades dos seres humanos e computadores.

Existe uma grande quantidade de técnicas as quais, muitas vezes, são combinadas com outras para que se possa alcançar os resultados esperados. A utilização de teorias de outras áreas como economia, administração, biologia, dentre outras, vem sendo agregada dentro da área de Ciência da Computação, a fim de se desenvolverem sistemas cada vez mais inteligentes e adaptativos ao ambiente no qual são utilizados. A Teoria dos Jogos é uma dessas possíveis técnicas que possibilitam modelar, por exemplo, cenários de disputas, nos quais determinadas entidades buscam alcançar melhores resultados.

Os processos de automação devem ser escolhidos, cuidadosamente, como no controle de atividades; detecção de conflitos e execução de análise, pesquisa e planejamento. Os DSS permitem utilizar dados e modelos relacionados a um domínio de interesse para resolver problemas, semiestruturados e não estruturados, com os quais são confrontados (Beulens *et al.*, 1988; Agogino e Tumer, 2009).

O domínio de gerenciamento de tráfego aéreo (*Air Traffic Management -*

ATM) engloba um processo complexo de tomada de decisão, no qual estão inseridas decisões em tempo real que elevam a complexidade da análise e decisão no tempo adequado. Atualmente, muitas decisões são tomadas por especialistas como controladores de voo ou de operações em companhias aéreas, os quais possuem uma elevada carga de pressão sob os impactos de suas decisões e um tempo reduzido para avaliar e agir.

Em situações envolvendo risco de segurança no espaço aéreo são realizadas antecipadamente avaliações das causas, ações a serem tomadas e os prováveis impactos decorrentes do conjunto de ações a ser aplicado. A avaliação de possíveis riscos relacionados com a situação atual exige certa experiência e conhecimento para conseguir, de certa forma, estimar como a ação aplicada irá afetar o espaço aéreo em instantes futuros. Nesse ponto, os DSS são ferramentas fundamentais para o auxílio dos especialistas.

Apesar de toda a tecnologia avançada atualmente em uso no ATM, processos de controle de tráfego são criados e otimizados constantemente, geralmente englobados em programas de procedimentos pelos órgãos responsáveis pelo gerenciamento e controle de tráfego aéreo.

Um desses programas, o *Collaborative Trajectory Options Program* (CTOP), possibilita a melhoria dos resultados de negócio pelas companhias aéreas, quando ocorrem restrições na capacidade de voo em uma determinada área, pelo envio das preferências de rotas de cada voo para o controle de tráfego aéreo (FAA, 2014a). Uma particularidade desse programa é a aplicação de duas medidas restritivas ao mesmo tempo: atraso e alteração de rota.

Considerando que o CTOP possibilita o informe das preferências de rotas, atualmente, existe uma grande dificuldade pelas companhias aéreas, dada pela incerteza inerente ao complexo processo, na definição de quantas rotas devem ser enviadas para cada voo, de maneira dinâmica, no momento em que o CTOP é iniciado. A definição errada da estratégia a ser utilizada para cada vez que o CTOP é iniciado pode gerar atrasos sete vezes maiores do que a melhor estratégia (Cruciol *et al.*, 2015).

No momento existe uma solução para este problema, na qual foram utilizados algoritmos de busca *greedy* (Bosung e Clarke, 2014). Esse modelo alcançou bons resultados, porém foram assumidas diversas premissas que não retratam a realidade. Por exemplo, assume-se o fato de que uma companhia aérea deveria conhecer o horário de todos os voos dos seus concorrentes no momento de definição da sua estratégia, assim como, a estratégia de cada um, o que na prática dificulta a utilização de soluções utilizando *greedy*.

Logo, tal situação não permite uma aplicação prática, conforme as diretrizes atuais do CTOP. Devido ao CTOP ser um novo programa de ATM, sendo utilizado nos EUA pouco mais de 18 meses, existem ainda muitas dúvidas e abordagens surgindo para tratar os problemas enfrentados pelas companhias aéreas e órgão de controle.

Nesse cenário, esta tese apresenta um modelo inovador que utiliza sistemas inteligentes e funções de avaliação através de uma abordagem de tratamento de incertezas com utilização de Teoria dos Jogos para enviar uma sugestão ao especialista de operações da companhia aérea, a fim de ser definida a melhor estratégia para cada caso. Essa sugestão é apresentada na forma de quantas rotas deverão

ser enviadas, dinamicamente em cada demanda CTOP, conforme os voos que serão afetados da sua companhia.

Por tratar o problema e a solução de uma maneira prática, a arquitetura dessa solução, que utiliza a combinação de métodos inteligentes e modelos matemáticos, resulta em um sistema de decisão com grande potencial de suporte aos especialistas em operações de cada companhia aérea envolvida no âmbito do CTOP.

1.2 Justificativa

Um dos principais objetivos do ATM é tratar as situações de risco que podem acontecer devido a sobrecarga da quantidade de aeronaves em determinados setores geográficos do espaço aéreo, condições meteorológicas adversas entre os aeroportos de origem e destino, sobrecarga da infraestrutura disponível nos aeroportos, dentre outros. Essas situações são normalmente tratadas com a aplicação de um determinado programa de gerenciamento de tráfego aéreo, no qual cada um possui suas diretrizes e resultados esperados. Dentre os principais programas é possível citar o *Airspace Flow Program* (AFP), *Ground Delay Program* (GDP), *Collaborative Decision Making* (CDM), *Airport Collaborative Decision Making* (A-CDM), *Surface Collaborative Decision Making* (S-CDM) e *Collaborative Trajectory Options Program* (CTOP).

Uma característica em comum de todos esses programas é fazer com que a segurança no espaço aéreo se sobreponha a todos os demais fatores operacionais envolvidos como atrasos ou cancelamentos de voos, aumento dos custos operacionais, alterações nos planos de voo, preferências das companhias aéreas, dentre outros. Considerando o fator segurança, surge a questão de como elevar, ou manter, o nível de segurança nos voos, tratando as situações de risco que possam acontecer no espaço aéreo e, dentro do possível, melhorar outros fatores como fluência do tráfego aéreo; redução de atrasos em voos; redução de custos operacionais com combustível, tripulação e aeroportos; dentre outros.

A *Federal Aviation Administration* (FAA), órgão responsável pelo controle de tráfego aéreo nos Estados Unidos da América (EUA), apresentou em 2012 um plano para implementação da iniciativa *Next Generation Air Transportation System* (NextGen), a qual visa a melhoria do gerenciamento e demais atividades relacionadas com o *National Airspace System* (NAS). O NextGen pretende integrar as tecnologias, políticas e procedimentos existentes com as novas abordagens, para que seja possível melhorar a segurança, as operações e a experiência dos passageiros (FAA, 2012a).

Dentro desta iniciativa, a FAA lançou em 2012 o *Collaborative Trajectory Options Program*, uma evolução de programas como de espera em solo (GDP) e espera no ar (AFP) em direção ao NextGen, o qual objetiva melhorar o gerenciamento de tráfego aéreo, considerando os usuários do NAS e seus objetivos de negócio; as particularidades enfrentadas por cada voo; as restrições do espaço aéreo; e, assim, tornar esse processo mais flexível e negocialmente mais estável para os envolvidos pelo envio das preferências de rota para cada voo envolvido no CTOP por cada companhia aérea.

Assim, de acordo com cada CTOP é primordial que cada companhia aérea tenha uma ferramenta que possa realizar estimativas sob a incerteza envolvida no CTOP para resolver o complexo problema de estratégias sobre quantas trajetórias serão enviadas para cada voo, o que poderá trazer para a companhia a redução dos atrasos em voos, devido a um melhor posicionamento na fila de alocação dos *slots* disponíveis e, conseqüentemente, a redução do custo operacional e/ou alcance de melhores resultados de negócio.

As características apresentadas justificam uma solução DSS para este problema passando por uma estimativa, via algoritmos inteligentes, que possa analisar as possibilidades e riscos em cada CTOP, considerando que cada companhia aérea somente tem informação sobre os seus respectivos voos. Do ponto de vista de uma companhia aérea A , isso impacta na definição da estratégia, uma vez que dois pontos precisam ser considerados:

1. A proporção de voos da *Companhia Aérea A* dentro do total de voos capturados no CTOP, e
2. A estratégia para definição da quantidade de opções de trajetória utilizada para cada possível proporção.

Dada uma imensa possibilidade de combinações para a lista final de associação de *slots* e considerando que cada combinação alterará o tempo final de atraso do conjunto de voos de uma companhia aérea, uma solução desenvolvida para este problema utilizou algoritmos de busca *greedy* (Bosung e Clarke, 2014). Este modelo foi desenvolvido em dois passos, o primeiro para melhoria da alocação e o segundo para melhoria dos *slots* associados para a *Companhia Aérea A*, o que alcançou para tal companhia um ótimo teórico, ou seja, devido a utilização de premissas que não são reais, quanto ao CTOP, os seus resultados não seriam alcançados na prática.

Analisando melhor o processo de disputa entre as companhias aéreas é possível verificar que elas estarão sempre tentando otimizar a sua alocação de *slots* para que todos os seus voos tenham preferência. Considerando que normalmente a quantidade de *slots* é menor que a demanda, as companhias aéreas precisam definir suas estratégias de negociação e, provavelmente, irão mudar conforme estas disputas sejam executadas diariamente com outra companhia aérea. Esse fator de adaptação de estratégias se dá pelo aprendizado do sistema de suporte à decisão, o qual conforme as interações são realizadas, mais o modelo desenvolvido irá se adaptar e alterar as sugestões enviadas aos especialistas.

Na busca por uma solução que possa auxiliar as companhias aéreas, de forma dinâmica, a definir qual a melhor estratégia a ser utilizada em cada CTOP, a Teoria dos Jogos aparece como um modelo adequado para implantação de algoritmos inteligentes para o problema em questão. Essa teoria possibilita modelar problemas nos quais seus participantes disputam recursos limitados de maneira cooperativa, ou não, de maneira estática ou dinâmica, no qual suas decisões dependem ou influenciam os demais, no qual cada jogador possui suas estratégias para atingir seus objetivos (Neumann e Morgenstern, 1944; Nisan *et al.*, 2007).

Utilizando as técnicas e modelos apresentados, a proposta desta pesquisa é realizar a otimização da modelagem do processo de disputa entre usuários do *National Airspace System* (NAS) no âmbito do Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo, especificamente no caso de múltiplas áreas restritas de fluxo (FCA). Esta abordagem irá utilizar a Teoria dos Jogos para realizar a otimização na modelagem do processo de negociação de forma dinâmica, em conjunto com Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço.

O modelo desenvolvido considera duas companhias aéreas como jogadores, os quais participam de um jogo de disputa dos *slots* disponíveis para acesso nas áreas restritas de fluxo. Considerando a maneira de alocação de *slots* da FAA segundo o CTOP, verificou-se a oportunidade para aperfeiçoamento da disputa entre os voos e, assim, aumentando a satisfação dos usuários do NAS diante da melhoria no alcance dos objetivos de negócio de cada companhia aérea.

Assim, o processo de disputa apresentado pode ser dividido em dois problemas, do ponto de vista de quantas opções de trajetórias deveriam ser enviadas em uma determinada demanda. Primeiro, dado que durante a inicialização do CTOP as companhias aéreas tomam conhecimento das restrições e enviam as suas opções de trajetórias para cada voo (TOS), como realizar a otimização dinâmica e automática do processo de disputa de *slots* disponíveis para múltiplas áreas restritas de fluxo durante a primeira rodada de negociações, no qual não existe qualquer conhecimento dos seus concorrentes como reputações; estratégias; horário de voos capturados no CTOP; dentre outros.

Segundo, dada uma disputa entre duas companhias aéreas, a fim de aumentar a alocação dos seus voos nos *slots* disponíveis e que esse processo seja repetido sempre que ocorra a inicialização do CTOP, como a estratégia de cada companhia irá afetar a estratégia da outra, pelo aprendizado do sistema, na próxima ocasião de disputa entre elas e a verificação da condição do Equilíbrio de Nash após uma determinada quantidade de negociações.

1.3 Objetivos

A seguir são descritos os objetivos gerais e específicos que devem ser atingidos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

- Objetivo Geral:
 - Desenvolvimento de uma solução inteligente, para melhorar o processo decisório de negociação dinâmica de companhias aéreas e seus resultados de negócio, quanto a definição da estratégia de envio do TOS na ocorrência de múltiplas áreas restritas de fluxo no Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo.
- Objetivos Específicos:
 - Entender os procedimentos utilizados pelos controladores de tráfego aéreo e os especialistas em operações das companhias aéreas nos EUA, quanto ao CTOP e suas particularidades envolvidas.

- Entender como as companhias aéreas definem as estratégias para negociações em recorrentes disputas pelos *slots* disponíveis no CTOP. Além disso, verificar como a estratégia tomada pela *Companhia Aérea A*, em um instante T_k , afeta a estratégia da *Companhia Aérea B*, em um instante futuro T_{k+1} , e se, esse processo de negociação entre as duas companhias leva a um Equilíbrio de Nash.
- Desenvolver algoritmos inteligentes que possam melhorar o processo de negociação entre os usuários do NAS, para que os envolvidos alcancem melhores resultados de maneira equilibrada e respeitando-se as restrições aplicadas em múltiplas áreas restritas de fluxo.
- Apresentar um modelo que possa, de maneira geral, resolver de forma inteligente o problema de definição de estratégias de envio do TOS, e se adapte dinamicamente conforme cada demanda CTOP e as estratégias utilizadas pelo seu concorrente.
- Considerando os dois problemas apresentados, realizar a modelagem do cenário aéreo em questão utilizando Sistemas Multiagentes, no qual os agentes irão negociar em forma de um jogo, utilizando a Teoria dos Jogos. Será jogado por duas companhias aéreas, utilizando o espaço aéreo dos EUA, e em rodadas únicas, ou seja, ao final de cada rodada existirá um resultado final para o jogo, que serão repetidas conforme a ocorrência das FCA's e as inicializações do CTOP. Com a execução desse jogo no dia a dia, cada jogador criará sua reputação e, assim, irão aprender e adaptar suas estratégias para alcançar melhores resultados, utilizando-se Aprendizagem por Reforço para tal.
 - * Para o primeiro problema apresentado, quanto ao processo de definição de estratégias para a primeira rodada de disputas de *slots*, será modelado um jogo do tipo estático e repetido infinitamente com informação incompleta, utilizando, de maneira análoga, o clássico Dilema dos Prisioneiros.
 - * Para o segundo problema apresentado, quanto ao processo de definição de estratégias a partir da primeira rodada de disputas de *slots*, será modelado um jogo do tipo estático e repetido infinitamente com informação incompleta, utilizando, de maneira análoga, o clássico Dilema dos Prisioneiros, Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço.
- Desenvolver dois estudos de caso, para o primeiro problema será realizada a negociação entre duas companhias aéreas, em rodada única; com informações incompletas do jogo e sem informação prévia, a fim de validar o modelo *Single Games for CTOP* pela otimização do processo decisório e a redução global do risco de aumento de atrasos, conforme o TOS enviado para cada voo capturado no CTOP. Para o segundo problema será realizado a negociação entre duas companhias aéreas, em rodada única; com informações incompletas do jogo e com o aprendizado pela reputação de cada jogador, a fim de validar

o modelo *Repeated Games for CTOP* pela otimização do processo decisório; a redução global do risco de aumento de atrasos, conforme o TOS enviado para cada voo capturado no CTOP; e a verificação da existência do Equilíbrio de Nash no jogo, considerando como as estratégias utilizadas em cada jogo irão afetar a decisão do concorrente nas próximas disputas.

Assim, os usuários do NAS poderão entender melhor a forma de atuação e quais as melhores estratégias para cada possível jogo de negociação no CTOP.

1.4 Metodologia de Pesquisa

Este trabalho utilizará duas estratégias de metodologia para o embasamento teórico e o desenvolvimento da pesquisa, as quais serão descritas a seguir.

1.4.1 Embasamento Teórico

A modelagem computacional será fundamentada em:

- Teoria dos Jogos, abordagem para modelar cenários de disputa por recursos limitados, a fim de atingirem melhores resultados com o entendimento de como é o funcionamento do processo decisório no CTOP; o comportamento e reputação de cada companhia aérea; as possíveis estratégias para definição do TOS de cada voo; dentre outros.
- Sistemas Multiagentes, abordagem para criar agentes especialistas que irão agir com maior conhecimento dentro de um determinado problema, o qual é uma parte reduzida do problema maior de gerenciamento de tráfego aéreo, ou seja, agentes que serão especializados em tomar as melhores ações para cada usuário do NAS.
- Aprendizagem por Reforço, abordagem para permitir que os jogadores possam aprender, no dia a dia, com os cenários e resultados alcançados e, assim, adaptar suas estratégias conforme o ambiente envolvido se modifica.
- Gerenciamento de Tráfego Aéreo, abordagem que lida com o gerenciamento e controle de todas as atividades relacionadas como controle do espaço aéreo, aumento de fluxo de tráfego, gestão de aeroportos, dentre outros, considerando fatores como segurança, planejamento, justiça, meteorologia e financeiro.
- Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo, abordagem que possibilita aos usuários NAS, como companhias aéreas, participarem de maneira mais efetiva informando à FAA suas preferências de rotas para cada voo, uma vez que os mesmos foram capturados para sofrer medidas restritivas dentro do programa.

Todos os itens teóricos citados serão partes integradas para que os modelos obtenham sucesso. No capítulo 6 será explicado detalhadamente como a teoria irá interagir para alcançar os resultados esperados desta pesquisa.

1.4.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A pesquisa foi conduzida em cinco etapas divididas da seguinte maneira:

1. Revisão Bibliográfica

A fundamentação teórica do trabalho será baseada na revisão dos principais trabalhos publicados nos últimos anos e que estejam relacionados com esta pesquisa. Para tanto, serão analisados artigos científicos, relatórios técnicos, livros, periódicos, dissertações e teses. Serão levantados e apresentados os principais modelos computacionais criados para resolver problemas no ambiente ATM, incluindo o CTOP.

2. Coleta de Dados

O trabalho será focado em dados de voos entre determinados aeroportos para a identificação dos padrões e descoberta do conhecimento esperado, para isso serão utilizados dados históricos de aeroportos e voos capturados no CTOP nos EUA; visitas aos órgãos responsáveis pelo gerenciamento de tráfego aéreo como o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA), e a *Federal Aviation Administration*. Para melhorar o processo de coleta de dados, também, serão coletados dados por intermédio de companhias aéreas, do TransLab - Laboratório de Modelo Computacional para Transporte Aéreo da Universidade de Brasília e do ATL - *Air Transportation Laboratory* do *Georgia Institute of Technology*.

3. Modelagem Computacional para o CTOP

Após a organização dos dados será possível propor uma solução, baseada nas informações recebidas, para o problema de redução de atrasos em voos capturados pelo CTOP, via o TOS de cada voo. Assim, serão utilizadas as técnicas de Sistemas Multiagentes para modelar computacionalmente os cenários no ambiente CTOP; Aprendizagem por Reforço para avaliar e melhorar as estratégias das companhias aéreas, ao definirem quantas trajetórias enviar para cada voo; e a Teoria dos Jogos para desenvolver os modelos de negociação e estimativas, por parte das companhias aéreas, a fim de reduzir o atraso dos voos pela melhoria do posicionamento na fila de associação de *slots* disponíveis da FAA.

4. Modelagem e Arquitetura

Assim que a proposta de solução do problema em questão estiver pronta, será definida a arquitetura e implementação para que os especialistas tenham as informações certas, no momento certo e de rápida percepção, garantindo assim a usabilidade do sistema.

5. Estudo de Caso

Após o modelo computacional construído será necessário validar e avaliar os resultados para possíveis correções. Assim, serão desenvolvidos dois estudos de caso: 1- validar a aplicação do SG-CTOP para a primeira rodada de negociações no CTOP; e 2- validar a aplicação do RG-CTOP para as rodadas a partir da primeira, assim como, o processo de aprendizado e adequação das estratégias.

O estudo de caso será dividido nas seguintes fases:

- (a) Planejamento: Serão apresentadas todas as informações necessárias para a execução do trabalho como aeroportos, voos, companhias aéreas, FCA's, detalhamento das demandas CTOP's, dentre outras.
- (b) Execução: Será apresentada a execução, passo a passo, utilizando-se das configurações definidas e do resultado computacional da pesquisa para provar os modelos propostos.
- (c) Resultados: Serão apresentados os resultados, divididos pelos dois experimentos, e realizada a análise dos resultados alcançados.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 9 capítulos e serão descritos, após esse capítulo introdutório, como seguem abaixo.

O Capítulo 2 irá apresentar o referencial teórico utilizado para desenvolver a pesquisa, porém sem a intenção de ser uma pesquisa exaustiva na área. Serão apresentados conceitos, baseados no estado da arte do domínio desse problema, sobre Sistemas Multiagentes, Aprendizagem por Reforço e Teoria dos Jogos.

O Capítulo 3 irá apresentar o referencial teórico utilizado para desenvolver a pesquisa referente aos conceitos sobre gerenciamento de tráfego aéreo e as abordagens utilizadas para agir no domínio ATM nos EUA e no Brasil, a organização do espaço aéreo, os principais programas de gerenciamento utilizados pela FAA, o processo de negociação entre os usuários do NAS dentro do processo de tomada de decisão no CTOP, dentre outros pontos.

O Capítulo 4 irá apresentar uma visão geral de aplicações de sistemas de suporte às decisões para o ATM, utilizando Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço, e as principais abordagens no CTOP utilizando algoritmos de busca *greedy* e um estudo inicial com o uso de Teoria dos Jogos, a fim de resolverem o problema de definição de estratégias para envio do TOS.

O Capítulo 5 irá apresentar alguns pontos importantes do ambiente de incerteza envolvido no processo de tomada de decisão do CTOP, o qual irá dar embasamento técnico e prático para o desenvolvimento dos modelos SG-CTOP e RG-CTOP.

O Capítulo 6 irá apresentar duas soluções para a negociação e decisão do conjunto de opções de trajetórias para a *CompanhiaAéreaA*, a qual disputa com outra companhia os *slots* disponíveis no CTOP. Será utilizada a Teoria dos Jogos para otimizar o processo de decisão em ambientes incertos; Sistemas Multiagentes

para o controle, análise e gerenciamento das entidades e processos envolvidos; e Aprendizagem por Reforço para possibilitar a adaptação das estratégias de jogo.

O Capítulo 7 irá apresentar o detalhamento da arquitetura computacional utilizada no desenvolvimento dos dois modelos inteligentes, *Single Games for CTOP* e *Repeated Games for CTOP*.

O Capítulo 8 irá apresentar dois estudos de caso desenvolvidos para verificar os modelos apresentados e validar os resultados da pesquisa para o *Single Games for CTOP* e *Repeated Games for CTOP*.

O Capítulo 9 irá apresentar as conclusões do trabalho, incluindo a avaliação dos resultados, contribuição da pesquisa e a proposta de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

O capítulo irá apresentar o referencial teórico utilizado para desenvolver a pesquisa, porém sem a intenção de ser uma pesquisa exaustiva na área. Serão apresentados conceitos, baseados no estado da arte do domínio desse problema, sobre Sistemas Multiagentes, Aprendizagem por Reforço e Teoria dos Jogos.

2.1 Sistemas Multiagentes

Os Sistemas Multiagentes (SMA) são sistemas compostos por agentes, os quais interagem, de forma organizada, para alcançar um determinado objetivo. Esse tipo de sistema é utilizado quando um domínio de problema é altamente complexo para que agentes autônomos possam solucionar e o problema alvo possa ser dividido, organizadamente, para que vários agentes possam interagir e alcançar seus objetivos. Esses objetivos, distribuídos para cada agente, são divisões do objetivo principal de sucesso do sistema.

Segundo Russel e Norvig (2002), um agente pode ser definido como qualquer programa que possa perceber o ambiente e atuar para alcançar um objetivo estabelecido.

Segundo Jennings e Wooldridge (2000), os agentes realizam, dentro de um ciclo, as seguintes atividades: percepção contínua do ambiente no qual está agindo, verificação das ações que podem ser tomadas em um determinado instante no ambiente e, assim, verificar a melhor ação para agir.

Segundo Briot e Demazeau (2002), um agente é uma entidade lógica ou física, a qual é atribuída uma certa missão que ela seja capaz de cumprir de maneira autônoma e em coordenação com outros agentes.

Segundo Lesser (1999), o SMA é um sistema destinado a satisfazer um conjunto de objetivos ou desempenhar tarefas, o qual é composto por dois ou mais agentes destinados a trabalhar em conjunto. Sendo assim, o foco da pesquisa científica para o desenvolvimento de um SMA é a construção de princípios e modelos que permitam a construção de pequenos e/ou grandes conjuntos de agentes semiautônomos preparados para interagirem entre si, a fim de alcançarem seus objetivos.

A Figura 2.1 apresenta uma visão geral de um Sistema Multiagentes, na qual existe um ambiente dividido em três partes, e para cada parte do ambiente existe um agente responsável por verificar o estado e agir.

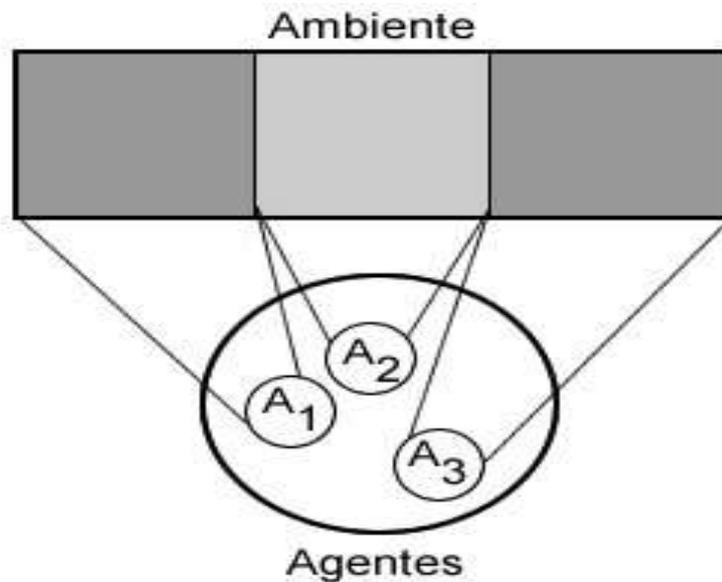


Figura 2.1: Visão geral de um SMA

2.1.1 Motivação

Segundo Pereira (2004) existe uma motivação crescente para a utilização de Sistemas Multiagentes baseada nos seguintes pontos:

- Problemas muito complexos para que um agente consiga resolver sozinho;
- Distribuir os problemas para alcançar melhores resultados;
- Aumentar a velocidade de processamento;
- Fornecer soluções para situações em que o problema pode ser distribuído.

Ainda segundo Pereira (2004), os SMA são adequados aos problemas que possuem vários métodos de resolução, várias perspectivas e/ou várias entidades. Esse tipo de sistema, normalmente, pode ser dividido em problemas menores e executado em paralelo de forma organizada. A organização pode ser realizada, basicamente, por três maneiras:

- Controlar: O agente utiliza-se de conhecimento adquirido por outros agentes para determinar as próximas ações;
- Coordenar: O agente coordena as ações dos outros agentes, a fim de alcançarem o objetivo principal;

- Negociar: O agente negocia com outro agente para que juntos possam chegar ao melhor resultado para ambos.

Nos SMA, existem os agentes homogêneos e os heterogêneos, que interagem ou trabalham em conjunto. Cada agente possibilita a solução autônoma do problema e funciona separadamente, em relação aos outros. Para que ele seja parte do sistema é preciso que exista uma infraestrutura que permita a interação entre os agentes.

Segundo Weiss (2000), o objetivo a longo prazo do SMA está na possibilidade da ciência da interação, na dimensão computacional, fornecer meios de análise e síntese, a fim de descobrir a resposta para perguntas como quem interage com quem, como, quando, sobre o que e o por qual motivo.

Ainda segundo Weiss (2005), há diversas vantagens na relação de um SMA quando comparado a um sistema composto por um único agente, cujo agente pode indicar falta de desempenho, confiabilidade e facilidade na manutenção ao ser submetido a um grande número de tarefas. Além do mais, não é possível um único agente prover conhecimento especializado em ampla quantidade.

2.1.2 Agentes Inteligentes

Segundo Juchen *et al.*(2001), os agentes podem agir sozinhos, em alguns casos, mas também podem precisar da cooperação dos outros. Dessa forma, os agentes são agrupados para que detenham parte do conhecimento que faz parte da estratégia de resolução do problema e interajam a fim de complementarem suas habilidades.

Segundo Boissier *et al.*(1992), o SMA, em uma visão simplificada, podem ser vistos como um grupo de limitações admitidas por um conjunto de agentes a fim de atingirem suas metas de forma mais prática.

De modo a se criar uma sociedade de agentes, um dos elementos essenciais é a capacidade de gerir as interações e as dependências das atividades dos agentes distintos, no que se refere ao SMA, e coordená-los. A coordenação é um passo fundamental no SMA, pois esses sistemas são inerentemente distribuídos (Reis, 2003).

A comunicação feita no SMA é tratada de forma a utilizar linguagens próximas as utilizadas por humanos. O agente tem capacidade de percepção, processamento e atuação em determinado ambiente, dessa forma, um agente possui uma representação interna do seu ambiente, conhecimento e capacidade de raciocinar de acordo com o seu conhecimento, assim, sendo capaz de avaliar qual o melhor momento e forma de agir.

Dessa forma, na definição de agente, é presumida a sua capacidade de comunicação e habilidade social, ou seja, que ele seja capaz de interagir com outros agentes ou humanos presentes no seu ambiente. A Figura 2.2 apresenta um agente com capacidade de comunicação.

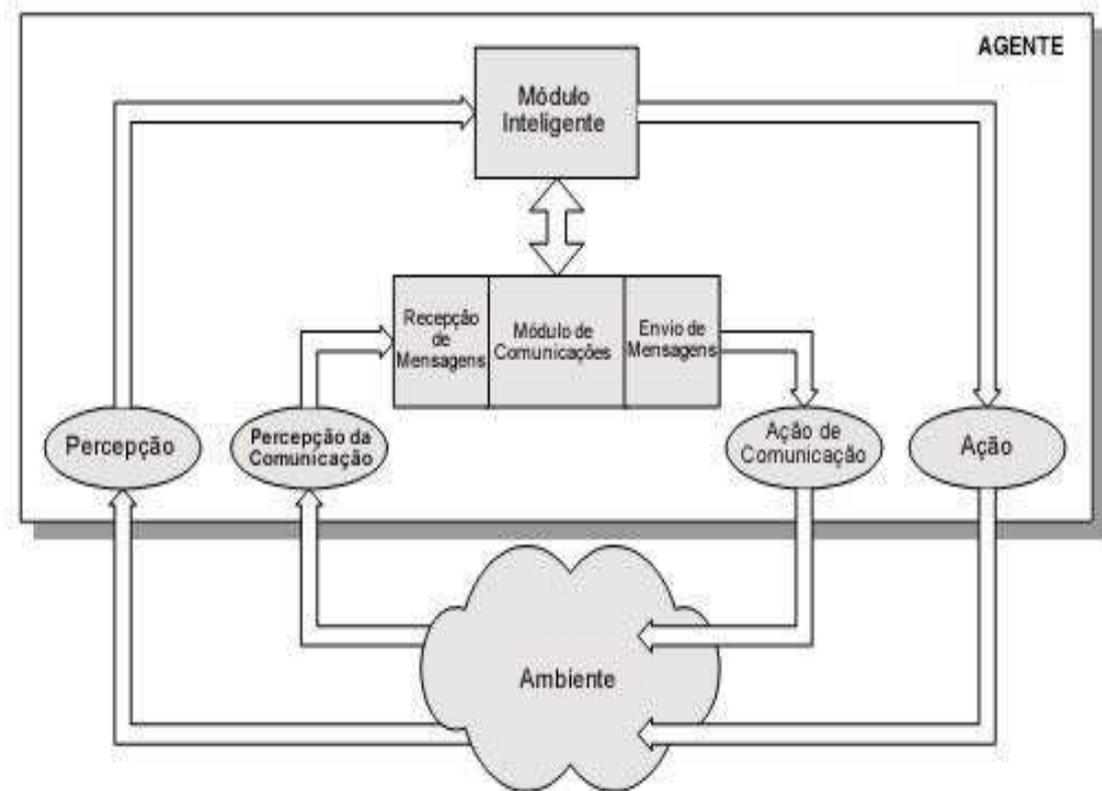


Figura 2.2: Agente com capacidade de comunicação (Reis, 2003), adaptado

Para obter a capacidade de comunicação de um agente, comumente, é utilizada a inclusão do módulo de comunicação em sua arquitetura, o qual consiste na recepção e envio de mensagens. Dessa forma, o módulo de comunicação liga-se ao módulo central do agente, possibilitando acesso as mensagens recebidas e, assim, definir quais enviar (Reis, 2003).

2.1.3 Utilização de Sistemas Multiagentes

Os agentes interagem em um determinado ambiente, no qual pode existir um ou mais agentes. Em alguns casos, um agente pode agir sozinho, em outros pode se comunicar com outros agentes e em sistemas mais avançados pode ser necessário que existam agentes responsáveis por intermediar essa comunicação, a fim de controlar o ambiente.

Segundo Juchen *et al.*(2001) os Sistemas Multiagentes são divididos em duas classes principais:

- **Sistemas Abertos:** Os agentes não são desenvolvidos para atingir um objetivo em comum, mas sim participar no processo para atingir o objetivo. Os agentes podem entrar e sair do sistema a qualquer momento, nesse caso a entrada de novos agentes precisa ser considerada.

- Sistema de Resolução Distribuída de Problemas: Os agentes envolvidos são desenvolvidos para atingir, de forma cooperativa e coordenada, um determinado objetivo.

Segundo Weiss (2005), os Sistemas Multiagentes possuem as seguintes vantagens:

- Um SMA composto de vários processos distribuídos pode acessar mais fontes de conhecimento, explorando a execução concorrente;
- Aplicações que necessitam de computação distribuída são melhores suportadas por SMA do que um agente isolado ou uma aplicação monolítica;
- Robustez e confiabilidade, a falha de um ou mais agentes não necessariamente torna o sistema inteiro inutilizável, porque outros agentes que estejam disponíveis podem assumir as tarefas;
- Desenvolvimento e reusabilidade, agentes individuais podem ser desenvolvidos separadamente por especialistas, o sistema inteiro pode ser testado e mantido mais facilmente e é possível reconfigurar e reusar agentes em diferentes cenários de aplicações;
- Custos, o custo efetivo é melhor do que em um sistema centralizado;
- Modularidade, flexibilidade e escalabilidade, devido à sua natureza distribuída e a possibilidade de adicionar novos agentes para resolver um problema maior sem afetar a operação dos demais agentes;
- Velocidade e eficiência, agentes podem operar de forma assíncrona ou paralela, e isso pode resultar em um aumento de velocidade de processamento.

2.2 Aprendizagem por Reforço

A Aprendizagem por Reforço é o processo no qual um agente, sem prévio conhecimento e em um determinado número de interações, interage com o ambiente para atingir seus objetivos e, assim, receber recompensas pelas ações executadas e os objetivos alcançados.

Segundo Mitchel (1997), é o estudo de como um agente autônomo, que percebe e atua no seu ambiente, pode aprender a escolher ações adequadas, a fim de atingir os seus objetivos.

Segundo Sutton *et al.*(1998), não é definida pelo método de aprendizagem e, sim, pelo problema de aprendizagem, ou seja, analisar os estados possíveis do agente e então definir a melhor estratégia, levando em consideração os estados e os resultados das ações que serão atingidos após a execução em um determinado ambiente.

Segundo Weiss (2002), os agentes devem agir de forma flexível e racional para fazerem parte de um sistema, levando em consideração o ambiente em que estão incluídos e as possíveis ações a serem tomadas.

Segundo Russel *et al.*(2002), os agentes possuem comportamentos que devem refletir os dos especialistas, dos quais o sistema está adquirindo seu conhecimento. Os comportamentos estão relacionados a percepção do ambiente, ao raciocínio e a tomada de decisão.

Assim, é possível encontrar uma solução ótima para o problema em questão, ou seja, encontrar as melhores ações para atingir um determinado objetivo, da melhor maneira possível, levando em consideração um determinado ambiente em um instante T_n .

2.2.1 Interação Agente-Ambiente

A Aprendizagem por Reforço faz parte da teoria de Aprendizagem de Máquinas, na qual se engloba como aprendizagem não supervisionada, pois não existe nenhuma informação, externa, de entrada para o treinamento do agente tomar sua decisão. Todas as decisões do agente levam em consideração os resultados obtidos pelo histórico de ações executadas em busca de uma solução ótima.

Um dos seus princípios é que a recompensa atribuída para cada ação do agente seja estimulada se obtiver bons resultados e desestimulada caso alcance um resultado pior que o já obtido e, assim, aproveitar ações que já foram executadas e obtiveram bons resultados, sendo os valores de recompensa, positivos ou negativos, dependendo de quão próximo está de uma solução ótima. Assim, o agente poderá buscar sempre a melhor ação a ser tomada, baseado no passado e sempre tentando melhorar seus resultados. A Figura 2.3 apresenta o funcionamento da Aprendizagem por Reforço.

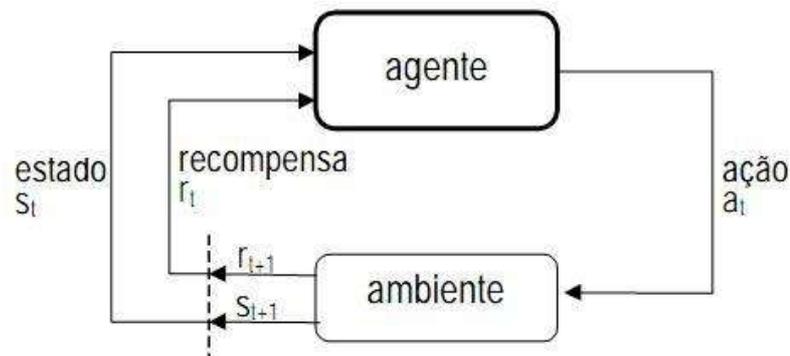


Figura 2.3: Aprendizagem por Reforço (Sutton *et al.*,1998)

Durante a interação, o agente irá interagir com o ambiente para descobrir em qual cenário está e, assim, escolher a melhor ação a ser executada. Após a ação apresentada pelo agente, ele irá receber um valor, que pode ser chamado de reforço ou recompensa. Assim será possível verificar se a ação tomada é melhor ou não do que as ações tomadas no passado, sendo possível escolher a melhor para o cenário.

2.2.2 Principais Algoritmos

Durante as pesquisas relacionadas com a Aprendizagem por Reforço ao longo dos anos, foram desenvolvidos algoritmos para aprimorar os resultados alcançados. Dentre eles, um possui grande destaque tanto pela facilidade em sua utilização quanto pelos resultados que são alcançados (Dayan, 1992; Mitchell, 1997).

O algoritmo *Q-Learning* proposto por Watkins (1989) é largamente difundido em problemas de busca ótima com a técnica de Aprendizagem por Reforço. Existe, também, uma modificação do algoritmo *Q-Learning* conhecido como *SARSA*, o qual utiliza um mecanismo de iteração de política (Sutton *et al.*, 1998).

2.2.2.1 O Algoritmo *Q-Learning*

O algoritmo *Q-Learning* utiliza uma técnica de mapear cada ação $a \in A$ para um estado $s \in S$, de tal forma que a função consiga mapear os resultados naquele ambiente dentre diversas ações possíveis em busca da maior recompensa R . O algoritmo faz uso de processos de decisão conhecidos como Processos de Decisão de Markov.

O algoritmo foca em buscar sempre uma solução ótima para o problema, seguindo o conceito de sempre aumentar o ganho de cada ação executada em um determinado estado. É utilizado o método de exploração *offline* e dado pela seguinte função:

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t(s_t, a_t) \cdot (R_{t+1} + \lambda \max_a Q_t(s_{t+1}, a) - Q_t(s_t, a_t))$$

(2.1)

Dada a função que define o algoritmo *Q-Learning*, o seu entendimento se torna mais simples.

Algoritmo 1 *Q-Learning*

Entrada: s e r : sendo s o estado atual e r o sinal de recompensa

Saída: a : sendo a uma ação

```
1: repeat
2:   Inicializar  $s$ 
3:   repeat
4:     Selecionar uma ação  $a$ 
5:     Executar a ação  $a$ 
6:     Verificar a recompensa  $r$ 
7:     Verificar o novo estado  $T_{n+1}$ 
8:      $Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t(s_t, a_t) \cdot (R_{t+1} + \lambda \max_a Q_t(s_{t+1}, a) - Q_t(s_t, a_t))$ 
9:      $s \leftarrow s_{t+1}$ 
10:  until  $s$  é terminal
11: until não for o fim dos episódios
```

O funcionamento do algoritmo apresentado acima pode ser descrito em cinco passos, dado um instante T_n :

1. O agente verifica o estado S_{T_n} ;
2. O agente seleciona uma ação A_{T_n} ;
3. O agente recebe uma determinada recompensa R ;
4. O agente verifica a recompensa alcançada em função do novo estado alcançado;
5. O agente atualiza o valor da ação que foi tomada.

O algoritmo é executado n vezes, chamando a função a cada ação possível para aquele estado em um determinado instante no tempo.

Onde:

- s : Estado original;
- a : Ação;
- r : Recompensa recebida;
- α : Taxa de aprendizagem $[0,1]$;
- max : Máxima recompensa no próximo estado.

Em cada instante que uma ação é executada pelo agente, sua recompensa e o valor esperado são calculados e utilizados para que o agente possa aprender com a política utilizada. As informações da política são guardadas em uma Matriz-Q, dada por $Q(s, a)$, a qual é responsável por manter os valores dos pares utilizados na política para o histórico do agente e, assim, verificar em um próximo instante.

2.2.2.2 O Algoritmo *SARSA*

O algoritmo é composto por uma quintupla de eventos $Q = (s, a, r, s', a')$, a qual indica a transição de um par de estado e ação para o próximo par de estado e ação. Devido a essa quintupla de eventos esse algoritmo chama-se *SARSA* - *State-Action-Reward-State-Action*. Essa é a modificação do algoritmo *Q-Learning*, o algoritmo *SARSA* utiliza um mecanismo de iteração de política (Sutton *et al.*, 1998).

O algoritmo *SARSA* e o *Q-learning* são classificados, respectivamente, como *on policy*, corresponde a escolha de uma política única para o treinamento do agente; e *off policy*, que utiliza duas políticas, uma de geração de episódios e outra que será avaliada e melhorada, respectivamente, e essa é a diferença entre esses dois algoritmos para Aprendizagem por Reforço. É utilizado o método de exploração *online* e dado pela seguinte função:

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \lambda Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)) \quad (2.2)$$

Algoritmo 2 SARSA

Entrada: s' e r' : sendo s' o estado atual e r' o sinal de recompensa

Saída: a : sendo a uma ação

```
1: repeat
2:   Inicializar  $s_t$ 
3:   Selecionar uma ação  $a_t$ 
4:   repeat
5:     Executar a ação  $a_t$ 
6:     Verificar a recompensa  $r_{t+1}$ 
7:     Verificar o novo estado  $S_{t+1}$ 
8:     Selecionar uma ação  $a_{t+1}$ 
9:      $Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \lambda Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t))$ 
10:     $s_t \leftarrow s_{t+1}$ 
11:     $a_t \leftarrow a_{t+1}$ 
12:   until  $s$  é terminal
13: until não for o fim dos episódios
```

Por ser uma modificação do algoritmo *Q-Learning*, o funcionamento do *SARSA* segue um caminho parecido de execução.

Por um lado o algoritmo *SARSA*, *on-policy*, é usado em situações em que existe a necessidade de controle, em que minimizar o custo é a parte mais importante do que sofrer uma convergência rápida para política ótima.

Por outro lado o algoritmo *Q-Learning*, *off-policy*, é utilizado em momentos que exigem predições ótimas das ações a serem realizadas, quando o tempo de convergência é mais oneroso que o custo da exploração (Kolle, 2003).

Os algoritmos *Q-Learning* e *SARSA* representam grande parte das implementações na resolução de problemas baseados em Aprendizado por Reforço, portanto através desses algoritmos o agente, interagindo com o ambiente, consegue atingir uma solução ótima.

2.2.3 Aplicação da Aprendizagem por Reforço

A aplicação da Aprendizagem por Reforço em sistemas inteligentes tende a seguir alguns pontos, para que a técnica seja executada corretamente. O sistema deve possuir:

- Ação: Considerando um conjunto finito de ações, que o agente pode executar para alcançar seu objetivo, em um determinado cenário, pode acontecer uma sequência de ações antes da verificação do estado do ambiente.
- Agente: Considerando o histórico de ações realizadas, o agente consegue verificar qual a melhor ação a ser tomada em um determinado instante no ambiente.
- Ambiente: Considerando o ambiente e um determinado instante, configura-se um determinado cenário para o agente, no qual sua ação levará em conta o passado e poderá prever o resultado dela em um próximo cenário.

A Aprendizagem por Reforço possui uma estratégia constituída de:

- Política de Ação: Ela foca em como o agente deve agir, é o ponto principal de como a ação será tomada. A política de ação é modificada de acordo com o tempo, ou seja, conforme a experiência adquirida pelo agente na resolução de determinado problema.
- Função de Avaliação: Ela foca em aumentar os resultados adquiridos pela execução de uma ação e o valor adquirido pelo seu resultado. Essa função será mais importante no futuro, já que com os resultados obtidos pela execução das ações o agente ganhará a sua experiência.
- Função Valor: Ela foca em avaliar um ambiente T_n , e com essa avaliação será possível prever os resultados que poderão ser obtidos em um momento T_{n+1} , caso seja tomada uma decisão definida pelo valor do resultado da primeira avaliação.
- Modelo do Ambiente: Ele foca em reproduzir um ambiente, dado por um estado (s) e uma ação (a), em um momento T_n e, assim, prever o ambiente em um momento T_{n+1} e o seu respectivo ganho.

2.3 Teoria dos Jogos

A Teoria dos Jogos vem sendo estudada nas últimas décadas por pesquisadores de diversas áreas com o intuito de se empregar o comportamento adotado em jogos para modelar matematicamente problemas em domínios da economia, computação, biologia, política, dentre outros.

Alguns dos principais aspectos dessa teoria vieram do trabalho de Antonie A. Cournot (Cournot, 1897), no qual é realizada uma relação entre os princípios da economia política e de problemas os quais podem ser modelados matematicamente, como competições entre produtores, lei da demanda e oferta, monopólios, relação entre a comunicação dos mercados, dentre outros.

No trabalho de John von Neumann e Oskar Morgenstern foi modelado matematicamente o comportamento entre indivíduos em negociações estratégicas onde as decisões de um participante influenciam as decisões dos demais em próximas negociações (von Neumann e Morgenstern, 1944). Neste trabalho também foi apresentada a função de utilidade de *von NeumannMorgenstern*, a qual procura aumentar a utilidade de cada ação tomada e baseia-se em probabilidade para que aquela ação seja escolhida. Essa teoria começou a ser mais difundida e utilizada, principalmente, em ramos da economia para análise de estratégias, competições entre mercados, influência das ações em negociações futuras, dentre outros.

Em 1950 John Nash apresentou o conceito de equilíbrio dos resultados alcançados, conhecido como Equilíbrio de Nash, pelos participantes de um jogo, no qual nenhum dos jogadores tem interesse em modificar sua jogada unilateralmente (Nash Jr., 1950), ou seja, dentro de uma competição os jogadores alcançaram um equilíbrio no qual todos estão satisfeitos com o que foi alcançado e não possuem interesse de modificar sua estratégia sozinho, uma vez que isso pode trazer piores resultados.

A teoria dos jogos pode ser conceituada como uma modelagem matemática para cenários estáticos ou dinâmicos, que envolvem interações estratégicas entre agentes (Myerson, 1991; Fiani, 2009). Essa teoria analisa com que motivações os jogadores interagem com as regras de um jogo em um ambiente econômico, isto é, as customizações, regras, procedimentos e restrições que um mercado pode ser organizado (Roth e Sotomayor, 1990). É objetivo da teoria dos jogos a análise e previsão dos resultados possíveis baseada nas estratégias de cada jogador (Von Neumann e Morgenstern, 1944).

2.3.1 Conceitos Básicos

A Teoria dos Jogos possibilita a modelagem de cenários decisórios estratégicos entre participantes, no qual existem variações quanto ao tipo de jogo, estático ou dinâmico e repetido ou único; quanto ao tipo de informação, completa ou incompleta; quanto ao tipo de interação, cooperativo ou não cooperativo; quanto à quantidade de rodadas de negociação, finita ou infinita; e quanto as estratégias de jogo, pura ou mista. Esse processo decisório se repete em diversos domínios, possibilitando a modelagem nas mais diversas áreas e em problemas mais complexos.

O domínio ATM apresenta diversos problemas em tempo real, o que aumenta consideravelmente a complexidade, possibilitando a utilização de novas soluções para otimização ou, até mesmo, para problemas ainda não resolvidos. Um dos pontos identificados para otimização inclui o processo de negociação no CTOP entre as companhias aéreas, direta ou indiretamente, a fim de obterem os melhores *slots* para os seus voos, dada as restrições aplicadas em áreas restritas de fluxo (FCA).

Assim, esse processo de negociação pode ser considerado um jogo no qual os jogadores, duas ou mais companhias aéreas, disputam os *slots* disponíveis em uma determinada faixa de horário, considerando que cada companhia aérea possui estratégias racionais e que objetivam reduzir os custos das suas decisões. Estes custos incluem tanto os diretos com o aumento de custos operacionais com o tráfego em rota ou espera no pátio do aeroporto de origem, quanto os indiretos como a perda de credibilidade da companhia pelos passageiros. É possível verificar que a Teoria dos Jogos pode aperfeiçoar a negociação e melhorar os resultados alcançados, atualmente, pelos jogadores buscando maximizar, de maneira balanceada, os ganhos de todos os jogadores.

Segundo von Neumann e Morgenstern (1944), qualquer situação econômica pode ser modelada como a saída de um jogo entre dois ou mais jogadores. Esta saída possui valores maiores do que os de entrada, o que aumenta a complexidade para se encontrar as melhores estratégias.

Após o trabalho de Nash Jr. (1950), foi possível evoluir a teoria apresentada até aquele momento e apresentar um importante conceito chamado de *Equilíbrio de Nash*, o qual considera-se que os jogadores irão tomar sempre a melhor decisão para cada um deles, e não terão interesse de modificar a sua jogada unilateralmente.

Segundo Sotomayor e Bugarin (2007), um jogo é composto de decisões, múltiplos jogadores, resultados independentes, conhecimento e racionalidade. Conforme as

estratégias disponíveis e seu conjunto de ações, os jogadores podem tanto ser afetados quanto afetarem o resultado final do jogo.

Um jogo pode ser descrito como uma disputa entre um conjunto de jogadores e suas estratégias, o qual gera um conjunto de ganhos e soluções possíveis ao final de cada partida. Cada jogo pode ser jogado em partidas únicas ou sequenciais, com uma quantidade finita ou infinita de partidas, no qual os jogadores irão criar suas reputações e o comportamento individual em partidas anteriores irá afetar as estratégias escolhidas pelos demais participantes no futuro.

O resultado final do jogo se dará pela combinação de estratégias de cada jogador e o ambiente definido para aquele jogo em questão, o que de certa forma pode ser estimado conforme o conhecimento no jogo. Assim, cada estratégia terá um valor estimado que representará o possível ganho, estabelecida pela função *payoff* de cada jogador.

Para cada estratégia pode ser estimado um ganho, levando o jogador ter maior embasamento de qual será a melhor estratégia para aquele jogo. É importante que a função *payoff* represente o ambiente de cada jogo, ou seja, ela se adapte dinamicamente com a situação enfrentada por cada jogador.

Diante das definições em teoria dos jogos, é primordial que cada jogador seja racional, ou seja, irá tomar a estratégia que resultará em maiores ganhos para ele naquele jogo. Logo, o ganho deve representar as características necessárias para que uma possível estratégia seja penalizada no caso em que, por exemplo, uma estratégia de outro jogador possa gerar um resultado altamente insatisfatório em determinados casos.

2.3.2 Tipos de Jogos

A teoria dos jogos pode ser representada por alguns modelos específicos relacionados à forma de se jogar, a quantidade de jogadas, a maneira de se executar as estratégias e as diferentes classes (Myerson, 1991; Fiani, 2009). As principais características seguem abaixo:

- Jogos Cooperativos: Os jogadores realizam cooperações durante o jogo para alcançar melhores resultados do que poderiam sozinhos.
- Jogos Não-cooperativos: Os jogadores definem e tomam suas ações sozinhos sem qualquer interação com os jogadores oponentes.
- Jogos de Informação Completa: Os jogadores conhecem as informações dos demais jogadores e como eles definem suas estratégias.
- Jogos de Informação Incompleta: Os jogadores não possuem informações sobre todo o jogo, de forma parcial ou completa, de tal forma que precisam definir suas estratégias baseando-se em poucas informações sobre o ambiente e outros jogadores.
- Jogos de Informação Perfeita: Os jogadores tomam suas decisões com conhecimento sobre todas as decisões que ocorreram até aquele momento e os eventos ocorridos.

- Jogos de Informação Imperfeita: Os jogadores tomam suas decisões com conhecimento, ou não, das decisões ou eventos que ocorreram até aquele momento.
- Jogos Finitos: Os jogos possuem uma quantidade de rodadas definidas.
- Jogos Infinitos: Os jogos não possuem uma quantidade de rodadas definidas.
- Jogos Estáticos: Os jogos possuem um resultado ao final de cada rodada.
- Jogos Dinâmicos: Os jogos possuem mais de uma rodada até que se tenha um resultado final.
- Jogos Repetitivos: Os jogos tendem a levar aos jogadores tomarem as mesmas estratégias para os mesmos jogos.
- Jogos Não-repetitivos: Os jogos tendem a levar aos jogadores a pensarem em estratégias que podem trazer ganhos a médio-longo prazo.

2.3.3 O Dilema dos Prisioneiros

O clássico Dilema dos Prisioneiros em Teoria dos Jogos retrata uma observação que foi realizada dentro de prisões, no momento em que eram feitos os interrogatórios. Existem diversas variações, até mesmo a que foi utilizada nesta tese para modelar o problema do CTOP, porém será apresentada a versão mais básica. A Figura 2.4 apresenta a visão geral do Dilema dos Prisioneiros.

O Dilema do Prisioneiro clássico funciona da seguinte forma:

Dois suspeitos, A e B, são presos pela polícia. A polícia tem provas insuficientes para os condenar, mas, separando os prisioneiros, oferece a ambos o mesmo acordo: se um dos prisioneiros, confessando, testemunhar contra o outro e esse outro permanecer em silêncio, o que confessou sai livre enquanto o cúmplice silencioso cumpre 10 anos de sentença. Se ambos ficarem em silêncio, a polícia só pode condená-los a 1 ano de cadeia cada um. Se ambos traírem o comparsa, cada um leva 5 anos de cadeia. Cada prisioneiro faz a sua decisão sem saber que decisão o outro vai tomar, e nenhum tem certeza da decisão do outro. A questão que o dilema propõe é: o que vai acontecer? Como o prisioneiro vai reagir?

De maneira resumida, o dilema funciona da seguinte forma:

- Dois suspeitos são presos para que seja averiguado um crime.
- Cada suspeito é colocado em uma sala.
- Ao serem questionados do crime, eles teriam duas opções: cooperar e ficar em silêncio ou trair e acusar o outro suspeito.
- Assim, quatro pontos são extremamente importantes na decisão de cada um:
 - Se os dois colaboram e ficam calados, cada um recebe um ano de prisão.
 - Se os dois traírem, cada um recebe cinco anos de prisão.

		Prisioneiro A	
		Colaborar	Trair
Prisioneiro B	Colaborar	1	0
	Trair	10	5

Figura 2.4: Dilema dos Prisioneiros

- Se o Prisioneiro A colaborar e o Prisioneiro B trair, o Prisioneiro A pegará 10 anos e o Prisioneiro B será solto.
- Se o Prisioneiro B colaborar e o Prisioneiro A trair, o Prisioneiro B pegará 10 anos e o Prisioneiro A será solto.

Desta maneira surge o dilema do que fazer no jogo. Considerando que os dois prisioneiros são racionais e tomaram a melhor decisão para eles, é de se esperar que ambos irão trair na esperança de que o outro ficará calado e, assim, ser liberado. Entretanto, verifica-se que quando os dois traírem não receberão o melhor resultado individual para cada um, ou seja, ficar calado e receber somente um ano de prisão ao invés dos cinco anos que irão receber.

Capítulo 3

Gerenciamento de Tráfego Aéreo

O capítulo irá apresentar o referencial teórico utilizado para desenvolver a pesquisa referente aos conceitos sobre gerenciamento de tráfego aéreo e as abordagens utilizadas para agir no domínio ATM nos EUA e no Brasil, a organização do espaço aéreo, os principais programas de gerenciamento utilizados pela FAA, o processo de negociação entre os usuários do NAS dentro do processo de tomada de decisão no CTOP, dentre outros pontos.

3.1 Visão Geral

O ATM foca em fornecer meios para o gerenciamento de tráfego aéreo, levando em consideração fatores como segurança, planejamento, justiça, meteorologia e financeiro (Agogino *et al.*, 2009).

O gerenciamento é necessário para que o espaço aéreo possa ser monitorado, controlado e os fluxos das aeronaves, por aerovias definidas, possam ser gerenciados de maneira integrada e, assim, obter maior efetividade nas ações tomadas.

O ambiente ATM pode ser dividido em três setores:

- **ASM - *Air Space Management***: O gerenciamento do espaço aéreo foca em aumentar a capacidade de aeronaves no espaço aéreo, com o objetivo de atender a demanda necessária dentro da estrutura disponível. Considerando a estrutura dos setores de controle como aerovias, áreas terminais, entre outras, o ASM tem por finalidade providenciar uma estrutura suficiente para aumentar a eficiência das operações aeronáuticas, a fim de atender a demanda de tráfego aéreo.
- **ATC - *Air Traffic Control***: O controle do tráfego aéreo foca em controlar os voos das aeronaves, fornecendo informações necessárias para que a segurança dos voos seja preservada, ou seja, posicionar as aeronaves de modo que não haja colisão, organizar e agilizar o fluxo de tráfego e, quando necessário, fornecer informações e apoio aos pilotos.

O ATC é prestado por órgãos de controle, nos quais controladores de voo fornecem as coordenadas às aeronaves; controlam o deslocamento interno nos aeroportos, como circulação de pessoas e veículos; controlam as áreas

de manobra; entre outras. É considerada a atividade mais importante para a harmonia do espaço aéreo, pois buscam atingir um nível de tráfego aéreo constante, ordenado e seguro.

- *ATFM - Air Traffic Flow Management*: O gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo foca em fornecer informações para que os fluxos das aeronaves sejam mantidos com segurança e o impacto ao tomar medidas, não previstas, seja o menor possível em outros cenários.

São realizados estudos que podem indicar possíveis sobrecargas e assim, é possível agir na medida e no local certo, como infraestrutura; tecnologia; treinamento; dentre outros, possibilitando, também, a garantia de melhor gerenciamento do tráfego aéreo melhorando a relação de capacidade e demanda.

Esta pesquisa está focada no ambiente ATFM, o qual pode ser dividido em três fases:

- **Nível Estratégico**: Foca no planejamento estratégico dos voos, englobando o período até o momento de 48 horas antes do voo.

O planejamento estratégico é realizado em conjunto, entre os órgãos ATC e os responsáveis pela operação das aeronaves, por exemplo, as companhias aéreas. Basicamente, consiste em planejar para que um voo aconteça no futuro, baseado em demandas ou solicitações de novos voos, e tomar medidas para que a demanda esteja de acordo com a capacidade.

- **Nível Pretático**: Foca na tomada de decisões táticas, englobando o período de 48 até 2 horas antes do voo.

O planejamento pretático irá atualizar, se necessário, o plano estratégico. Caso sejam necessárias atualizações, as ações serão tomadas como, por exemplo, cancelamento de voos ou reorganização de voos e rotas. Assim, será possível evitar outros problemas como, no caso de cancelamento, passageiros esperando no saguão do aeroporto.

- **Nível Tático**: Foca na tomada de decisões táticas, englobando o período de 2 horas antes do voo até que a aeronave chegue a seu destino.

Na operação tática acontecem, basicamente, ações emergenciais que não foram, ou não puderam ser, identificadas na fase anterior. As ações a serem tomadas podem ser divididas em dois grupos de medidas restritivas para regular o tráfego aéreo: o primeiro enquanto as aeronaves estão em solo e o segundo enquanto as aeronaves estão no ar, o qual, é o ponto principal de estudo desta pesquisa.

Segundo Targa *et al.*(2001), o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo pode garantir que os voos sejam realizados de maneira segura, rápida, ordenada e econômica. Com a utilização do ATFM é possível evitar sobrecarga na capacidade de tráfego aéreo, otimizar o espaço aéreo e fornecer informações aos órgãos de controle.

3.1.1 Espaço Aéreo do Brasil

No Brasil, o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) é o órgão responsável pelas atividades no ambiente ATFM. Segundo o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2006), dentre algumas das responsabilidades desse órgão, são possíveis ressaltar:

- Monitorar e analisar todos os aspectos envolvidos no ambiente, como aspectos meteorológicos;
- Avaliar a aplicação das medidas restritivas no ATFM;
- Recomendar e aprovar alternativas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo.

O espaço aéreo brasileiro abrange toda a região territorial do país, incluindo parte do oceano Atlântico. A Figura 3.1 apresenta o espaço aéreo do Brasil, no qual existem cinco *Flight Information Regions* (FIR): FIR - Amazônica; FIR - Recife; FIR - Brasília; FIR - Curitiba e FIR - Atlântico.

As FIR's são subdivididas em setores de controle, a fim de separar as atividades de gerenciamento e obter maior controle. Atualmente, existem 46 setores de controle, 14 na FIR - Amazônica, 8 na FIR - Recife, 12 na FIR - Brasília, 10 na FIR - Curitiba e 2 na FIR - Atlântico.

Os setores ficam sob a supervisão de controladores de voo, os quais estão lotados nos ACC - *Area Control Center*. Em cada Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA) existe um ACC com responsabilidade sobre a FIR correspondente. Dessa forma, nesse contexto, é possível perceber a complexidade das atividades de gerenciamento e a necessidade de subdivisão para gerenciar tantos fatores, por exemplo, a quantidade de aeronaves por setor influencia diretamente a complexidade do gerenciamento, ou seja, quanto mais aeronaves trafegando em um mesmo setor, maiores os riscos de segurança envolvidos no ATM (Crespo *et al.*, 2007).

3.1.2 Gerenciamento do Espaço Aéreo nos EUA

O Gerenciamento do Espaço Aéreo (ASM) é composto por uma complexa rede de rotas de voo, pontos fixos, setores e unidades de Controle de Tráfego Aéreo (ATC) (EUROCONTROL e FAA, 2014). O ASM busca a eficiência e flexibilização do espaço aéreo, assim, aumentando a capacidade de aeronaves no espaço aéreo para atender a demanda necessária dentro da estrutura disponível (DECEA, 2014). Considerando a estrutura dos setores de controle como aerovias, pontos fixos, áreas terminais, dentre outras, o ASM auxilia a providenciar uma estrutura suficiente para aumentar a eficiência das operações aeronáuticas, a fim de atender a demanda crescente de tráfego aéreo.

Segundo FAA (2008) existem duas divisões do espaço aéreo nos EUA, regulada e não regulada. E nesta divisão existem outras quatro subdivisões: controlada, não controlada, uso especial e outras áreas de espaço aéreo. A Figura 3.2 apresenta a visão geral da organização em classes do espaço aéreo nos EUA. Esta

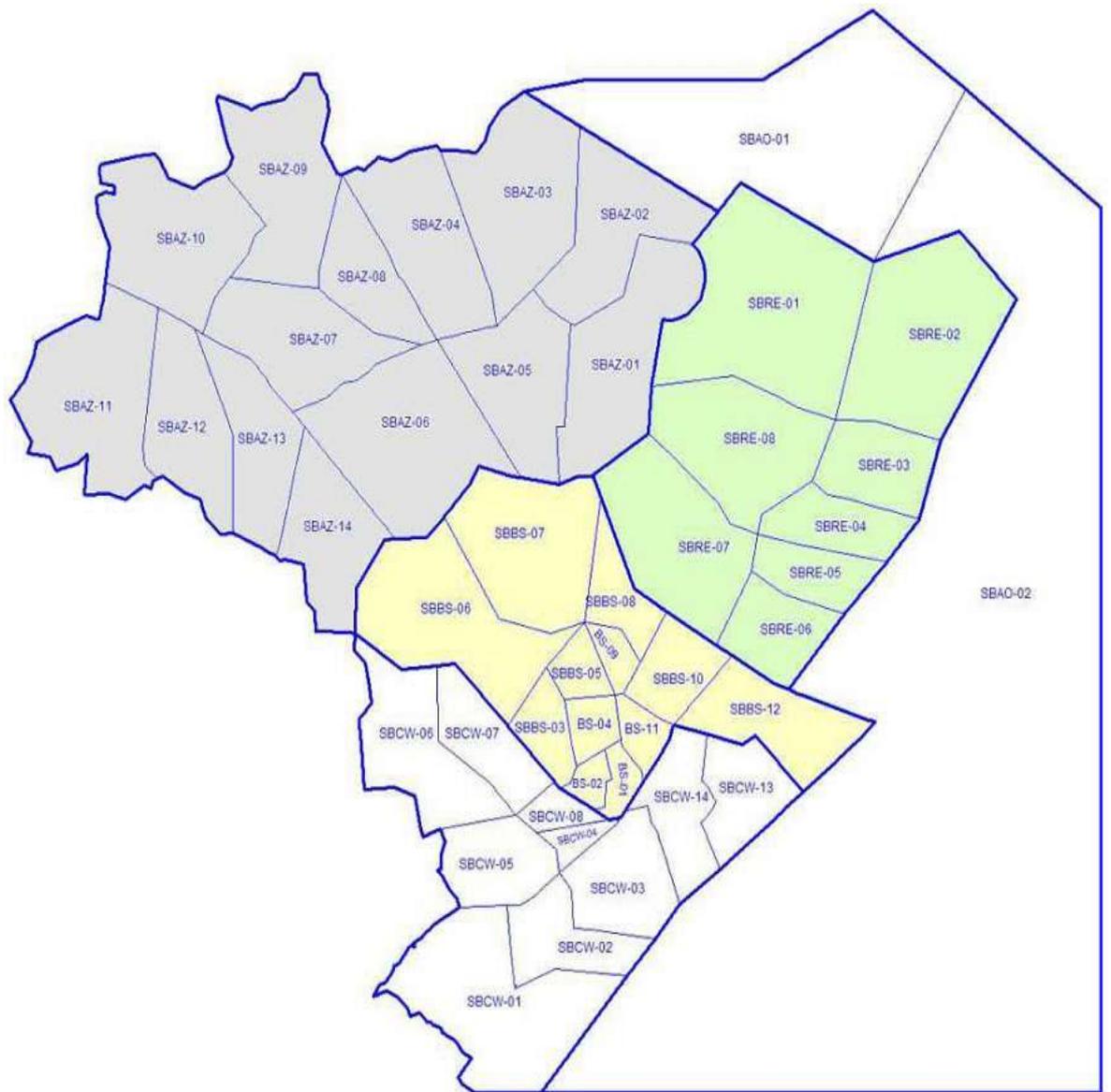


Figura 3.1: Espaço aéreo do Brasil (Crespo, 2010)

estrutura é importante para que todos os envolvidos saibam claramente suas responsabilidades e obrigações em cada área do espaço aéreo.

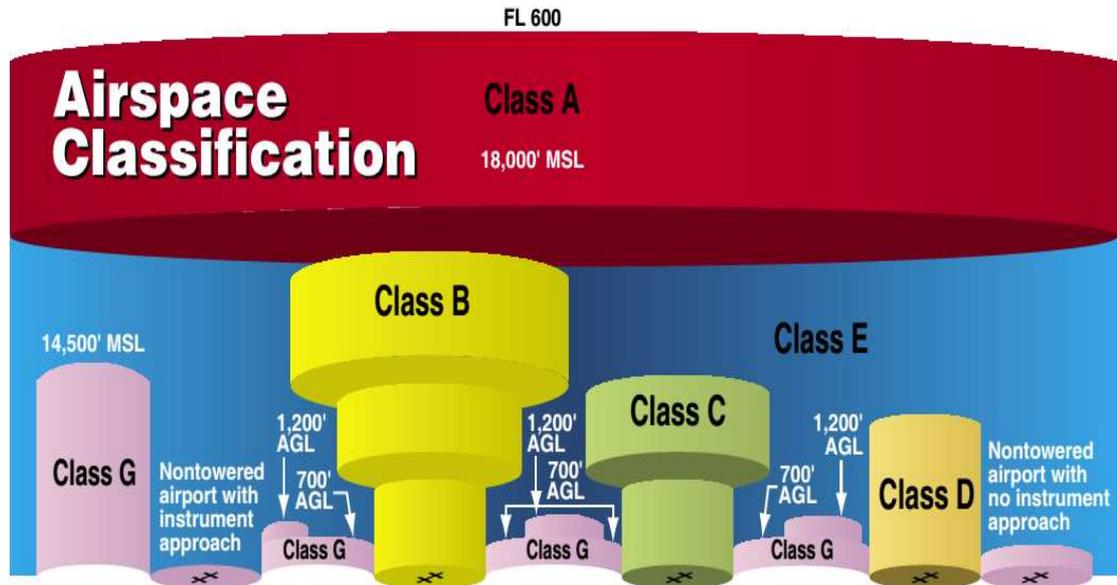


Figura 3.2: Organização do Espaço Aéreo nos EUA (FAA, 2008)

1. Controlada: É o espaço aéreo sob responsabilidade de um determinado centro de controle de tráfego aéreo.

- Classe A: É o espaço aéreo a partir de 18.000 pés acima do nível do mar (MSL), incluindo o nível de voo 600 (FL) e o espaço aéreo sobre a área náutica, de 12 milhas náuticas (NM), da costa de 48 estados e do Alaska. Todas as operações devem seguir as regras de operação de voo por instrumento (IFR).
- Classe B: É o espaço aéreo da superfície até 10.000 pés ao nível do mar em torno dos aeroportos mais movimentados. Essa classe possui três camadas, no qual o perímetro de atuação é reduzido conforme a aeronave se aproxima do aeroporto. É desenhado de maneira que todas as aeronaves, ao entrar no espaço aéreo, possam seguir os procedimentos de operação por instrumento e receberão os serviços de separação dentro do espaço aéreo.
- Classe C: É o espaço aéreo da superfície até 4.000 pés acima do nível do aeroporto e em torno da região. Nos aeroportos que possuam uma torre de controle de operações serão servidos pelo controle de aproximação por radares e determinados procedimentos de aproximação IFR. A configuração detalhada de cada área desta classe é individual. Esta classe possui duas camadas com o radio na superior de 10 NM e na inferior de 5 NM, na extensão geográfica acima do aeroporto de 1.200 até 4.000 pés. Todas as aeronaves devem manter comunicação de rádio,

duas vias, com o controle ATC, começando antes de entrar no espaço aéreo.

- Classe D: É o espaço aéreo da superfície até 2.500 pés acima do nível do aeroporto e em torno da região. A configuração detalhada de cada área desta classe é individual, quando os procedimentos IFR são publicados, normalmente, a área é desenhada para uso dos instrumentos.
 - Classe E: É o espaço aéreo a partir de 14.500 pés até 18.000 pés acima do nível do mar, incluindo o nível de voo 600 e o espaço aéreo sobre a área náutica, de 12 milhas náuticas, da costa de 48 estados e do Alaska. Nesta classe estão incluídas as vias aéreas federais começando de 700 ou 1.200 pés acima do nível do solo (AGL) utilizadas para entrar e sair de uma área terminal (TMA) e as rotas dos voos domésticos abaixo de 18.000 pés acima do nível do mar.
2. Não Controlada: É o espaço aéreo no qual os órgãos ATC não possuem autoridade ou responsabilidade para controlar o tráfego aéreo.
- Classe G: Esta classe se estende da superfície até acima do espaço aéreo da classe E, e inclui o espaço aéreo que não está designado nas classes A, B, C, D e E. A navegação é realizada pelas regras de voo visual (VFR), logo, devem existir condições para tal antes de entrar em uma área desta classe.
3. Uso Especial: São áreas de controle especial, nas quais algumas atividades aéreas podem ser confinadas ou sofrerem imposições do controle de tráfego aéreo.
- Áreas Proibidas: Estas áreas estabelecem uma região e os tipos de aeronaves que estão proibidos na região por motivos de segurança ou motivos relacionados com o bem estar da população.
 - Áreas Restritas: Estas áreas estão sujeitas à restrições de natureza, temporalidade, ou ambos. Estão incluídas áreas que fornecem perigo para a aeronave, por exemplo, áreas de treinamento de artilharia em solo ou no ar.
 - Áreas de Avisos: Estas áreas são similares às restritas quanto a natureza e possibilitam que os usuários, que não estão envolvidos em ações que possam causar perigo aos outros envolvidos, tenham conhecimento do risco existente. Nos EUA não existe no espaço aéreo a mesma jurisdição do solo entre os estados, e se estende até 12 NM da costa americana.
 - Áreas de Operação Militar: Estas áreas possuem restrição vertical e horizontal objetivando separar as atividades de treinamento militar do tráfego por instrumentos de voo.
 - Áreas de Alerta: Estas áreas são demarcadas para informar aos usuários do NAS, que não estão envolvidos nas ações, que possui um alto volume de pilotos em treinamento naquela região.

- Áreas de Explosão Controlada: Estas áreas possuem atividades que podem causar riscos as aeronaves, porém podem ser interrompidas se necessário, por exemplo atividades de detonação, testes de grandes motores de foguete e atividades de artilharia.
4. Outras Áreas de Espaço Aéreo: As demais áreas não cobertas pelas definições anteriores incluem, não se limitando: rota de treinamento militar (MTR), restrição temporária de voos (TFR), operação de aeronaves de paraquedismo e áreas de segurança nacional (NSA).

3.2 Collaborative Trajectory Options Program

A *Federal Aviation Administration* (FAA), órgão responsável pelo controle de tráfego aéreo nos Estados Unidos da América (EUA), apresentou em 2012 um plano para implementação da iniciativa *Next Generation Air Transportation System* (NextGen), a qual visa a melhoria do gerenciamento e demais atividades relacionadas com o *National Airspace System* (NAS). O NextGen pretende integrar as tecnologias, políticas e procedimentos existentes com as novas abordagens, para que seja possível melhorar a segurança, as operações e a experiência dos passageiros (FAA, 2012a).

Dentro desta iniciativa, a FAA lançou em 2012 o *Collaborative Trajectory Options Program*, uma evolução de programas como de espera em solo (GDP) e espera no ar (AFP) em direção ao NextGen, o qual objetiva melhorar o gerenciamento de tráfego aéreo, considerando os usuários do NAS e seus objetivos de negócio; as particularidades enfrentadas por cada voo; as restrições do espaço aéreo; e, assim, tornar esse processo mais flexível e negocialmente mais estável para os envolvidos pelo envio das preferências de rota para cada voo envolvido no CTOP por cada companhia aérea.

Esta iniciativa esteve em teste até o começo de 2014, quando foi colocada em uso no espaço aéreo dos EUA pela FAA (Novak *et al.*, 2010; FAA, 2012b; NBAA, 2012; FAA, 2014b).

A Figura 3.3 apresenta um exemplo de um voo vindo do *Dallas/Fort Worth International Airport* (DFW) em direção ao *John F. Kennedy International Airport* (JFK), no qual ocorre duas FCA's pelas rotas mais prováveis para chegar ao destino.

O CTOP possibilita que a interferência do órgão de controle de tráfego aéreo gere uma menor insatisfação dos usuários do NAS, por exemplo, as companhias aéreas, possibilitando que as preferências de rotas alternativas, incluindo a mudança de rota e de horário, sejam informadas ao órgão por meio do *Trajectory Options Set* (TOS) de cada voo. Desta forma, o programa possibilita que cada companhia aérea envie, ordenadamente, um conjunto de opções de trajetórias para cada voo passível de restrição pelo CTOP, e, assim, o órgão de controle possa tomar suas decisões considerando as restrições existentes para cada FCA e as preferências de negócio de cada companhia aérea.

Conforme a estratégia de cada companhia aérea na definição do conjunto de opções de trajetória (TOS), o posicionamento de cada voo na lista que será

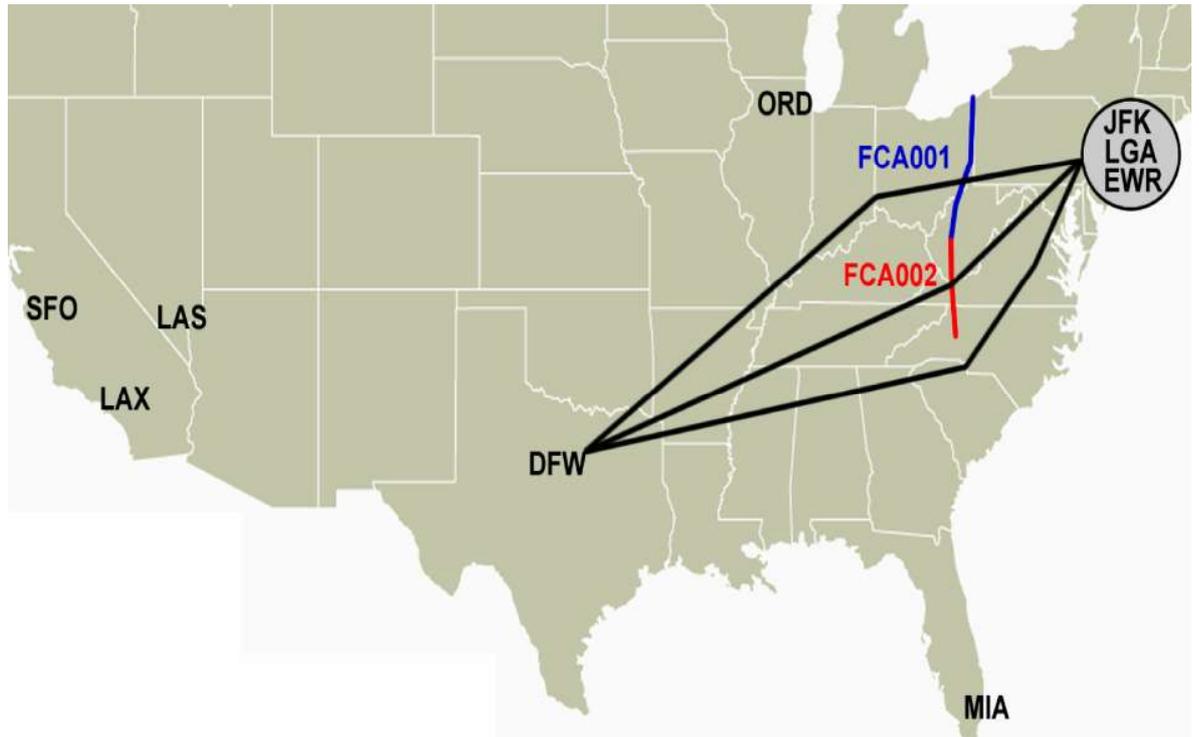


Figura 3.3: Exemplo do CTOP

utilizada pela FAA para realizar a alocação dos *slots* disponíveis é alterado. O CTOP pode ser considerado um processo de grande importância para os usuários NAS, do ponto de vista de custo de tempo aos passageiros; financeiro para as companhias aéreas e de congestionamento interno para os aeroportos.

Assim, de acordo com cada CTOP é primordial que cada companhia aérea tenha uma ferramenta que possa realizar estimativas sob a incerteza envolvida no CTOP para resolver o complexo problema de estratégias sobre quantas trajetórias serão enviadas para cada voo, o que poderá trazer para a companhia a redução dos atrasos em voos, devido a um melhor posicionamento na fila de alocação dos *slots* disponíveis e, conseqüentemente, a redução do custo operacional e/ou alcance de melhores resultados de negócio.

A Figura 3.4 apresenta a divisão do espaço aéreo no EUA com seus respectivos *Air Route Traffic Control Centers*.

3.2.1 Trajectory Options Set

O conjunto de opções de trajetória (TOS) apresenta as opções de rotas para cada voo, seguindo uma ordem de preferência a qual a companhia aérea pretende utilizar para aquele determinado voo. Para cada par de aeroportos, ou seja, para uma trajetória entre dois aeroportos existe uma variação de rotas possíveis, no qual a companhia aérea informa à FAA quais as suas preferências para cada voo.

Então, conforme as restrições de capacidade para determinadas áreas de voo, a FAA irá considerar o TOS de cada voo, enviado pela companhia aérea, para determinar a ordem final. O TOS somente é necessário quando existe um CTOP

- Voo 1, *CompanhiaAéreaB*, IAT-FCA 1(08:03)
- Voo 2, *CompanhiaAéreaA*, IAT-FCA 1(08:05)

Esta ordem IAT será a utilizada para, ordenadamente, verificar qual o *slot* disponível e com o menor custo considerando os horários EAT's de cada FCA para fazer a associação dos voos.

Segundo Golibersuch (2012) algoritmo de associação do CTOP pode ser resumido em seis passos:

1. Determinar quais voos estão incluídos na demanda CTOP;
2. Determinar quais voos são exceções na demanda;
3. Associar as trajetórias para as exceções;
4. Ordenar os voos remanescentes de acordo com o IAT de cada voo;
5. Considerando a ordem IAT e a capacidade disponível, é associado à rota preferencial disponível para cada voo;
6. Enviar a associação final para cada companhia aérea.

Alguns voos serão tratados como exceções pela FAA, no qual estão incluídos os voos internacionais ou domésticos que já estejam em rota no momento em que o CTOP é iniciado. Esses voos irão receber a preferência na alocação dos *slots* disponíveis em cada FCA, e após essa alocação os demais voos irão ser alocados conforme o IAT na FCA de cada voo.

A Figura 3.5 apresenta um exemplo de um TOS para um determinado voo.

Route	Altitude	Speed	Relative Trajectory Cost (RTC)	Trajectory Valid Start Time (TVST)	Trajectory Valid End Time (TVET)	Required Minimum Notification Time (RMNT)
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	350	480	0	13:00	-	-
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	370	480	10	13:00	15:00	-
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	350	480	20	13:00	16:00	45
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	370	480	25	13:00	15:50	45
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	350	480	40	13:00	16:00	-
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	370	480	45	13:00	15:00	-

Figura 3.5: Exemplo TOS (Bosung e Clarke, 2014)

Analisando a Figura 3.5, é possível verificar seis rotas para o voo; a altitude e a velocidade de cada rota ao passar pela FCA; o custo relativo de trajetória (RTC), o qual pode ser entendido como o limite de atraso aceito para aquela rota; o TVST e o TVET, os quais determinam o período em que cada rota está válida e o RMNT, o qual informa à FAA o tempo mínimo necessário para que a companhia seja avisada ao ser alocada naquela rota.

Considerando que cada companhia aérea deverá tomar suas decisões para a criação do TOS sem o conhecimento de quantos voos no total foram capturados para aquela demanda específica do CTOP, é necessário que cada companhia avalie os possíveis cenários e tente reduzir os seus riscos, por exemplo, custos operacionais e demanda de passageiros com conexão em um determinado voo, e assim, submeta as melhores opções de trajetória para cada voo.

Capítulo 4

Modelos Computacionais em ATM

O capítulo irá apresentar uma visão geral de aplicações de sistemas de suporte às decisões para o ATM, utilizando Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço, e as principais abordagens no CTOP utilizando algoritmos de busca *greedy* e um estudo inicial com o uso de Teoria dos Jogos, a fim de resolverem o problema de definição de estratégias para envio do TOS.

O CTOP é um programa complexo e novo dentro do domínio ATM dos EUA, assim, não possui ainda todos seus problemas e soluções computacionais definidos. Para o problema de definição de estratégias sobre as rotas que serão enviadas pelas companhias aéreas, existe até o momento, uma solução algorítmica proposta na literatura. Apesar de o modelo alcançar bons resultados, não é aplicável ao cenário real do CTOP, entretanto o modelo apresenta diretrizes a serem utilizadas em demais pesquisas. Para se ter uma validação da utilização de Teoria dos Jogos como base teórica para a modelagem do complexo problema em questão, foi desenvolvido um estudo simplificado e que será apresentado neste capítulo.

4.1 Sistemas de Suporte à Decisão

Os sistemas de apoio à decisão podem ser definidos como sistemas que apoiam o processo de decisão do usuário fornecendo informações relevantes; sugestões e previsões, baseando-se em informações atuais para fornecer uma visão do futuro, dado que determinadas ações sejam tomadas no presente.

Os DSS permitem trabalhar com problemas de tomada de decisão que ultrapassam a capacidade racional normal ou excedem aspectos temporais e/ou financeiros disponíveis. Um controlador de voo específica e modela processos de tomada de decisão utilizando um suporte, dado pelo DSS, e, assim, é possível gerenciar o conhecimento disponível; controlar o aumento da quantidade de dados e escolher a melhor decisão de forma mais precisa.

Segundo Agogino e Tumer (2008), é fundamental que os sistemas de apoio ao transporte aéreo estejam preparados para fornecer meios de um gerenciamento flexível e automatizado, para atenderem as necessidades inerentes a esse gerenciamento. Esses sistemas estão incluídos em uma nova geração, os quais devem

estar preparados para atender essa demanda.

Um dos problemas atuais desses sistemas, no domínio ATM, é a falta de explicação sobre os motivos de uma determinada sugestão ao controlador de voo para a tomada de decisão. Algumas sugestões não são claras o suficiente para que sejam aceitas pelo controlador de voo, devido a alta complexidade que envolve a análise de cenários e avaliação das possíveis sugestões.

Dentre as abordagens que são apresentadas na literatura (Bayen *et al.*, 2005; Souza, 2008; Agogino e Tumer, 2009; Arruda, 2009; Crespo, 2010; Cruciol, 2012), é possível classificar um sistema de apoio à decisão em quatro maneiras diferentes de funcionamento:

1. Sem autonomia, o sistema apresenta as informações e o especialista precisa verificar em vários pontos o que é útil, ou não, para cada situação;
2. Autonomia completa, o sistema, baseado em conhecimento previamente estabelecido, analisa cada situação e toma suas decisões;
3. Semiautomático (mais automático), o sistema possui inteligência para avaliar diversas situações e, dependendo da situação, decidir sozinho. Em outras situações, o especialista decide o que deve ser feito.
4. Semiautomático (mais humano), o sistema possui inteligência suficiente para analisar as situações e apresentar soluções ao especialista, o qual irá decidir o que deve ser feito.

A abordagem desta pesquisa seguirá a quarta maneira apresentada, na qual irá sempre deixar o poder de tomada de decisão com o gestor de operações da companhia aérea, porém irá analisar as situações e apresentar sugestões a serem tomadas para o especialista.

4.2 Abordagem de Sistemas Multiagentes

A abordagem de Agogino e Tumer (2008) utilizou a arquitetura de Sistemas Multiagentes, com o sistema *Future ATM Concepts Evaluation Tool* (FACET), para melhorar os resultados alcançados (Agogino e Tumer, 2007). O sistema FACET é uma ferramenta de modelagem de tráfego aéreo baseado no espaço aéreo dos EUA. Atualmente, é uma ferramenta utilizada pela FAA e *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Os autores dividiram em três itens para pesquisar e alcançar a melhoria necessária:

- O impacto das ações de dois novos agentes, sendo eles: os atrasos de aeronaves em solo e a redefinição de rotas e distância entre as aeronaves;
- O impacto do acoplamento entre as ações dos agentes;
- Os benefícios da previsão de recompensas dos agentes utilizando-se de funções de avaliação, previamente calculadas.

A utilização de Sistemas Multiagentes foi bastante difundida entre as pesquisas na área de gerenciamento de tráfego aéreo, pois, com os avanços realizados no domínio do problema, verificou-se que existem diversos agentes em interação contínua (Bayen *et al.*, 2005; Agogino e Tumer, 2009). A Figura 4.1 apresenta a interação de agentes para que sejam tomadas algumas medidas restritivas, a fim de evitar o congestionamento em um setor.

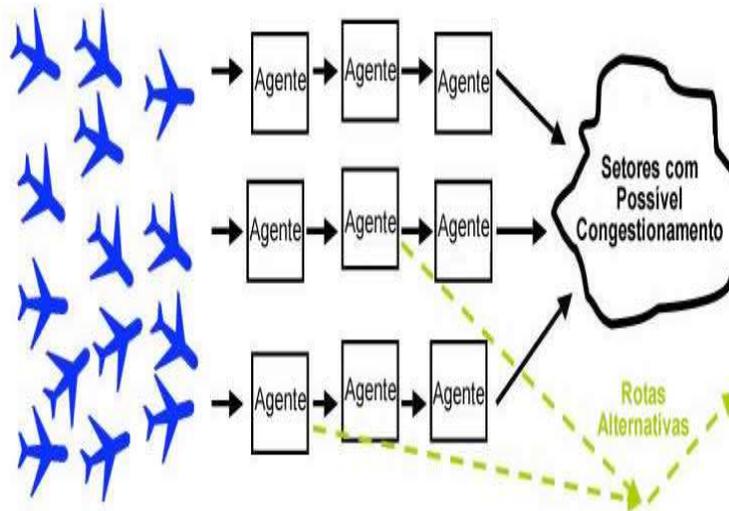


Figura 4.1: Aeronaves recebendo medidas restritivas, adaptado (Agogino e Tumer, 2008)

É possível verificar diversos responsáveis interagindo, como os órgãos de controle do espaço aéreo, dentre eles, o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo; o gerenciamento dos terminais nos aeroportos e o gerenciamento integrado das regiões de informação de voo. Assim, a abordagem de identificar os agentes dentro dessa estrutura e organizá-los para que possam interagir e alcançar melhores resultados para o ambiente se tornou foco de pesquisa.

Alguns dos principais pontos do sistema são: a simulação do tráfego aéreo baseado em planos de voo e a interação do usuário para analisar, dentre outros, o tráfego aéreo, rotas e estatísticas. A Figura 4.2 apresenta uma tela do sistema FACET, na qual é possível visualizar o tráfego nas rotas e as estatísticas do fluxo aéreo.

4.3 Abordagem de Aprendizagem por Reforço

Segundo Agogino e Tumer (2009), a utilização de agentes pode melhorar o nível de desempenho de um sistema, que apoie a decisão do controlador de voo, em até 20%, valor que é proporcional ao número de controladores que aceitam as sugestões do sistema, ou seja, quanto menor for o número de controladores que aceitem, menor será a taxa de melhoria no nível de desempenho.

Segundo Souza (2008), as medidas restritivas adotadas, sobre as demandas de fluxo de tráfego aéreo, não são armazenadas adequadamente para utilizar as

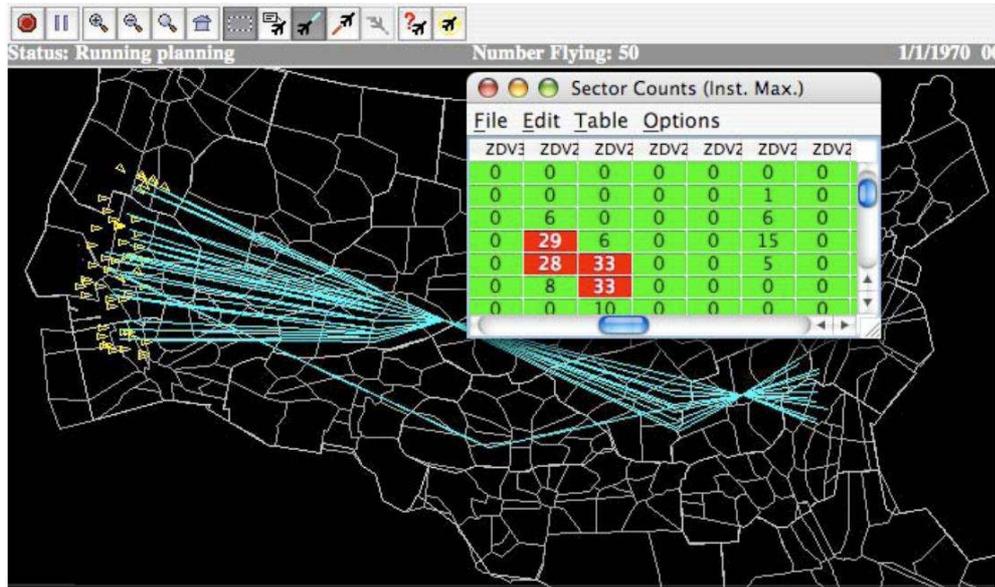


Figura 4.2: Tela do FACET apresentando o tráfego nas rotas e as estatísticas do fluxo aéreo (Agogino e Tumer, 2008)

melhores práticas, a fim de auxiliar a tomada de decisão em situações similares.

Uma contribuição relevante dos trabalhos que seguem esta abordagem é a sugestão de decisão a ser tomada conforme a semelhança dos cenários que estão sendo analisados com o passado, assim, é possível que o sistema aprenda diariamente com os controladores de voo (Agogino e Tumer, 2009; Arruda, 2009; Crespo, 2010; Cruciol, 2012).

No domínio desse problema o conhecimento humano é imprescindível para o sucesso da solução. Existe uma abordagem tradicional na qual o agente, dada uma função de avaliação, recebe uma recompensa caso ele tome uma determinada ação, assim, é possível verificar antes qual, provavelmente, será a melhor. A Figura 4.3 apresenta essa abordagem dividida em três situações.

Na situação "a" o agente tem uma ação, a qual o leva diretamente a sua recompensa, assim, é utilizada pelo agente para atualizar seus parâmetros internos; na situação "b" é incluído um ruído entre o agente e a avaliação da recompensa; e na situação "c" é apresentada uma situação mais complexa, na qual, além do ruído, existem filtros para as ações do agente, as quais podem ser ignoradas; aceitas ou modificadas.

Na abordagem utilizada por Agogino e Tumer (2008), foi definido um sistema de métricas para avaliar o congestionamento e o atraso, baseado no congestionamento de um conjunto de setores e o atraso médio no fluxo aéreo. Assim, foi apresentada uma combinação linear dos dois fatores pela função $G(z)$, definida na função 4.1.

$$G(z) = -((1 - \alpha)B(z) + \alpha C(z)) \quad (4.1)$$

Onde:

$B(z)$ = é a penalidade total para todas as aeronaves no ambiente.



(a) As ações do agente conduzem diretamente para a recompensa, a qual é recebida pelo agente.



(b) As ações pretendidas pelo agente são modificadas pelo ruído. A recompensa é modificada antes do agente receber.



(c) As ações do agente são filtradas por um processo desconhecido antes de alcançar a recompensa.

Figura 4.3: Abordagem tradicional do agente agindo em um ambiente simples, adaptado (Agogino e Tumer, 2009)

$C(z)$ = é a penalidade total de congestionamento.

A função $B(z)$ é definida, na função 4.2, pelo somatório de atrasos em um conjunto de setores.

$$B(z) = \sum_{s \in S} B_s(z) \quad (4.2)$$

Onde:

$B_s(z)$ = é o atraso por setor s .

A função $B_s(z)$ é definida de acordo com as medidas restritivas aplicadas. Quando as aeronaves não estão sofrendo medidas de mudança de rota, por motivos de atraso, é definida de acordo com a função 4.3.

$$B_s(z) = \sum_t t(k_{t,s} - k_{t,s}^b) \quad (4.3)$$

Onde:

$k_{t,s}$ = é a quantidade de aeronaves no setor s , no instante t .

$k_{t,s}^b$ = é a quantidade de aeronaves no setor s , no instante t , no caso base quando não existem agentes de controle.

Quando o gerenciamento está aplicando medidas de mudança de rota para evitar o congestionamento, é utilizada a função 4.4.

$$B_s^{rr}(z) = p \sum_t t(k_{t,s}^b - k_{t,s}) \quad (4.4)$$

Onde:

p = é uma penalidade fixa por ter sido aplicada a medida de mudança de rota.

Da mesma maneira, a penalidade de congestionamento total é o somatório das penalidades de congestionamentos nos setores s , apresentados nas funções 4.5 e 4.6.

$$C(z) = \sum_{s \in S} C_s(z) \quad (4.5)$$

$$C_s(z) = \alpha \sum_t \theta(k_{s,t} - c_s) \epsilon^{b(k_{s,t} - c_s)} \quad (4.6)$$

Assim, $C_s(z)$ penaliza o ambiente, quando a quantidade de aeronaves excede o limites, definido pela FAA nos EUA.

4.4 Abordagem em *Greedy* no CTOP

4.4.1 Visão Geral

Considerando o problema de otimização da alocação de voos da *Companhia Aérea A* para reduzir os seus atrasos em uma demanda CTOP, uma abordagem desenvolvida por Bosung e Clarke (2014) utilizou um modelo em dois passos com a técnica de busca *greedy*.

Os autores definiram um modelo ótimo teórico para escolher o melhor conjunto de opção de trajetórias (TOS) para cada voo envolvido no CTOP, ao se existir múltiplas áreas restritas de fluxo (FCA's) e o processo de negociação envolvendo uma segunda companhia aérea pelos melhores *slots* disponíveis. A Figura 4.4 apresenta a visão geral do procedimento de otimização desenvolvido.

Analisando a Figura 4.4 é possível verificar os dois passos definidos: 1- otimização da alocação de *slots*, e 2- otimização dos *slots* alocados para a companhia.

O primeiro passo da solução, o módulo *Slot Allocation Optimizer*, é dado pela entrada das seguintes informações:

- O conjunto de aeronaves e seus respectivos horários no plano de voo aprovado, dentro da demanda CTOP, de todas as companhias aéreas envolvidas;

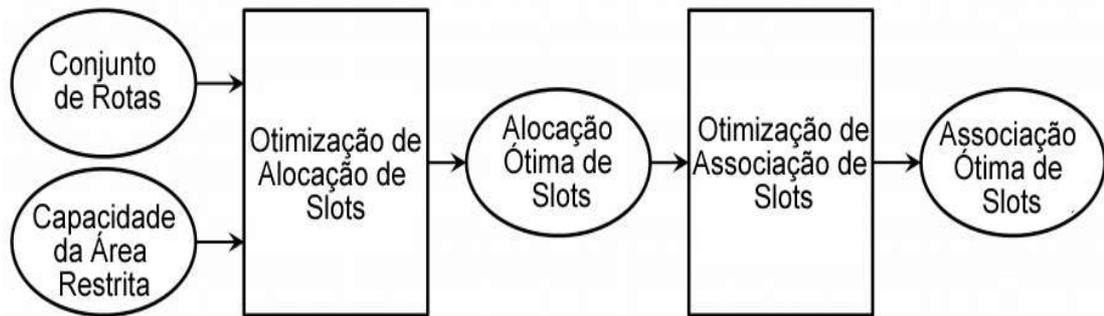


Figura 4.4: Procedimento de otimização (Bosung e Clarke, 2014), adaptado

- A capacidade e demanda das FCA's determinadas pela FAA;
- O conjunto das rotas possíveis para cada voo.

Após a entrada destas informações no primeiro passo, busca-se, para a *Companhia Aérea A*, a melhor alocação do ponto de vista do menor atraso possível para o conjunto global de voos capturados no CTOP. A Figura 4.5 apresenta a forma de organização utilizada para buscar o resultado ótimo teórico via algoritmo *greedy*.

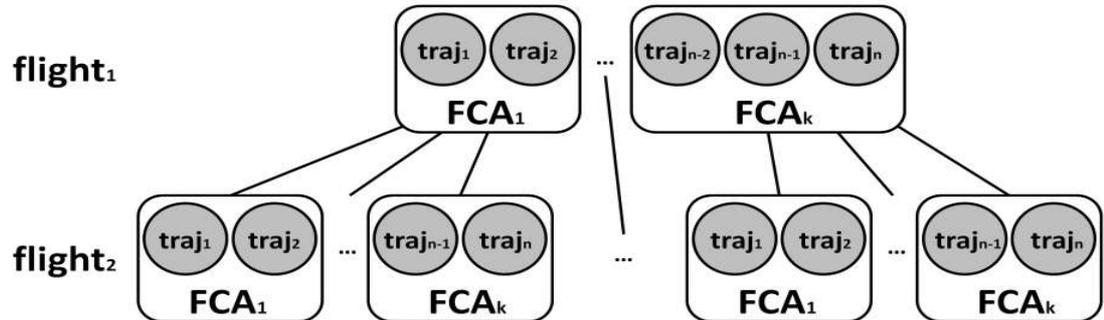


Figura 4.5: Árvore de busca agrupado por FCA (Bosung, 2015)

Analisando a Figura 4.5 é possível verificar que os autores primeiramente fazem uma ordenação pelo algoritmo do CTOP utilizado pela FAA, ou seja, pelo horário mínimo de entrada de voo em cada FCA. Após essa ordenação, é feita, para cada voo, a escolha da trajetória com o melhor *slot* disponível, e, assim, até o final da lista de voos capturados no CTOP.

Para cada possível combinação, considerando-se o atraso mínimo para os voos da *Companhia Aérea A*, é apresentado o valor global de atrasos para os voos envolvidos da companhia. A saída deste módulo gera o melhor conjunto de trajetórias a ser enviado para cada voo da *Companhia Aérea A*, e, assim, alcançando uma alocação de *slots* ótima. Este algoritmo foi apresentado como uma variação para o *Ration-by-Schedule*, gerando o *CTOP-RBS*. A Figura 4.6 apresenta um exemplo do algoritmo de busca utilizado no primeiro passo.

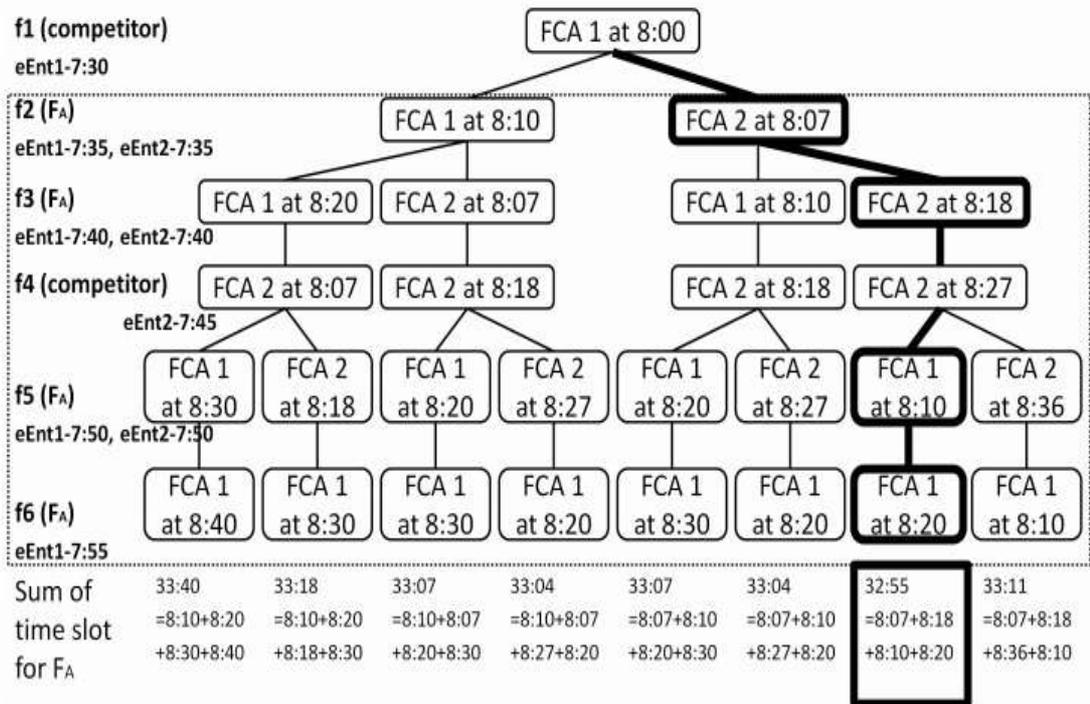


Figura 4.6: Exemplo do algoritmo de busca (Bosung e Clarke, 2014)

Analisando a Figura 4.6 é possível verificar que no voo *F3* o melhor *slot* disponível seria pela *FCA 1* as 8:10, porém o *slot* escolhido foi pela *FCA 2* as 8:18, justificado pelo menor atraso global diante das possíveis combinações naquela demanda CTOP.

Após a alocação ótima de *slots* no primeiro passo, essa lista é utilizada como entrada do segundo passo, o módulo *Slot Assignment Optimizer*, o qual irá gerar como saída uma otimização da lista de alocação para a *Companhia Aérea A*. Esta otimização se dará com a redução dos custos operacionais envolvidos com cada voo. Algumas outras informações são utilizadas como entrada no segundo módulo:

- O conjunto de aeronaves e seus respectivos horários no plano de voo aprovado, dentro da demanda CTOP, de todas as companhias aéreas envolvidas;
- A capacidade e demanda das FCA's determinadas pela FAA;
- O conjunto das rotas possíveis para cada voo;
- O custo de voo em rota, custo de atraso na decolagem e pouso.

Considerando-se que no primeiro passo os voos estavam disputando os *slots* disponíveis com os de uma segunda companhia aérea, no segundo passo os *slots* já estão definidos para cada uma delas, o que cria uma possibilidade de otimização na troca dos *slots* somente dentre os voos de cada uma.

Um dos pontos, para buscar a otimização dos custos, utilizados pelos autores foi a inclusão da estratégia de voar por fora da área restrita (FCA) enviando *NOSLOT* dentro do algoritmo de troca de associações no segundo módulo.

4.4.2 Resultados Alcançados

A Figura 4.7 apresenta a comparação de resultados alcançados por Bosung e Clarke (2014) verificando-se o atraso inicial para os voos capturados no CTOP, os voos alocados após o primeiro módulo e a lista final associada após o segundo módulo.

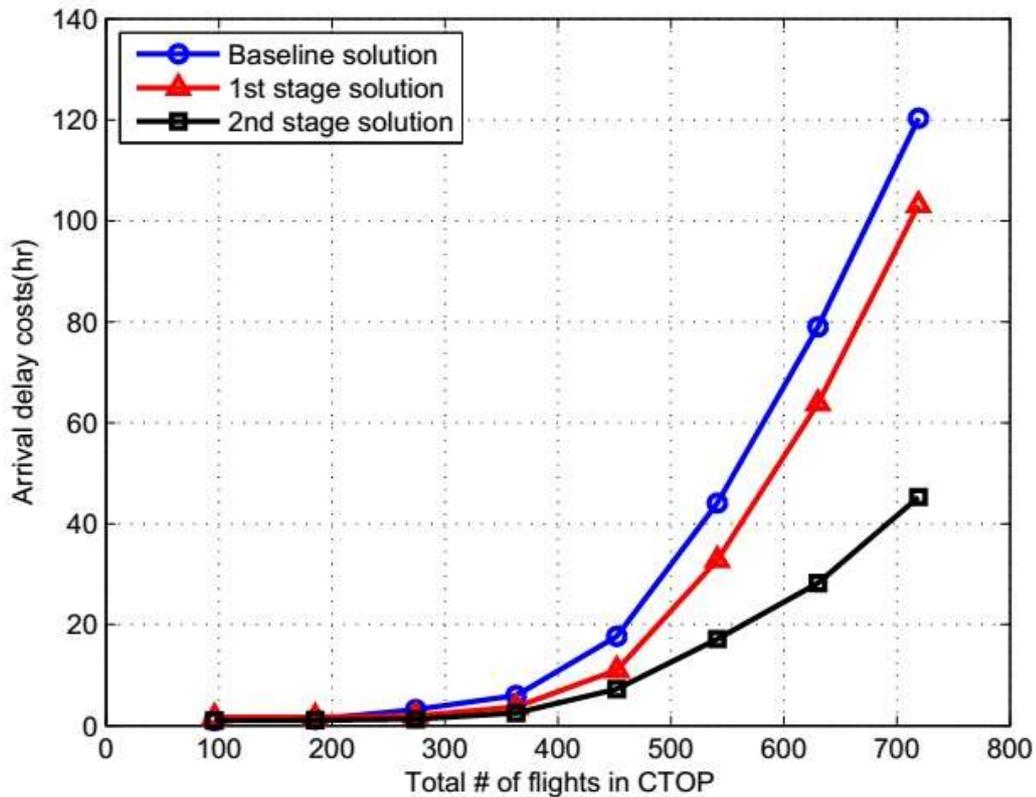


Figura 4.7: Comparação entre as soluções (Bosung e Clarke, 2014)

Analisando a Figura 4.7 é possível verificar que a solução dos autores alcançou resultados satisfatórios, destacando-se que quanto maior a quantidade de voos envolvidos no CTOP melhor foram os resultados alcançados. Em alguns casos verifica-se a redução próxima de 60% nos custos operacionais.

Entretanto, considerando o primeiro módulo, os autores assumiram que o sistema de suporte à decisão conhecia todos os voos e horários planejados para os voos capturados no CTOP. Essas premissas assumidas geram um problema para a utilização desta aplicação na prática, uma vez que, conforme as diretrizes atuais do CTOP, cada companhia aérea somente tem conhecimento sob as informações relacionadas com seus próprios voos.

Outro ponto a ser considerado na abordagem utilizada pelos autores para o primeiro passo, *Slot Allocation Optimizer*, é que a estratégia de definição do TOS da companhia aérea concorrente não é considerada pelo algoritmo de busca. Ao realizar a busca, nos voos dos concorrentes, é escolhido para o concorrente o *slot* que irá possibilitar menor atraso para a *Companhia Aérea A*.

Ainda referente ao primeiro módulo, foi retirada a estratégia de *NOSLOT* para reduzir a complexidade do algoritmo e melhorar os resultados para a própria companhia. A não utilização da estratégia de voar por fora da área restrita, ou seja, enviar *NOSLOT* para os voos, não retrata a realidade atual por dois pontos ao menos: 1- segundo estudos a serem apresentados no capítulo 5, em alguns casos a melhor estratégia seria enviar *NOSLOT* alcançando os melhores resultados em mais de 40% das demandas CTOP, e 2- algumas companhias aéreas atualmente usam exatamente a estratégia de enviar *NOSLOT* para os seus voos e não entram na negociação pelos *slots* disponíveis.

Considerando os pontos referentes ao primeiro módulo apresentados acima e que o segundo módulo segue a mesma arquitetura e premissas, verifica-se que a utilização de premissas como o conhecimento de todas as informações dentro de uma demanda CTOP, informações as quais somente são conhecidas em completo pela FAA, deixam de retratar a realidade a ser enfrentada pelas companhias aéreas nos EUA e dificultando sua utilização na prática.

4.5 Abordagem em Teoria dos Jogos no CTOP

4.5.1 Visão Geral e Aplicação

Considerando a abordagem realizada com algoritmos de busca *greedy* (Bosung e Clarke, 2014), foi desenvolvida, para esta tese, uma primeira abordagem utilizando Teoria dos Jogos. Esse modelo foi desenvolvido para se comprovar a eficácia e eficiência da utilização desta técnica no problema estudado por esta tese no CTOP.

Ao final desta abordagem inicial, será realizada uma comparação com a abordagem *greedy*, a qual é uma solução ótima do ponto de vista teórico, e, assim, possibilitar uma melhor avaliação dos resultados alcançados pela Teoria dos Jogos.

Para modelar a solução inicial foi utilizado o problema clássico em Teoria dos Jogos conhecido como Dilema dos Prisioneiros. A Figura 4.8 apresenta a visão geral do modelo.

Para este modelo inicial, foi considerado a negociação de *slots* no âmbito do CTOP entre duas companhias aéreas, a utilização de duas FCA's e a utilização de duas estratégias de jogo:

1. Enviar a melhor trajetória global, ou seja, a trajetória de rota que possui o menor tempo de entrada em uma das FCA's.
2. Enviar a melhor trajetória local para cada FCA, ou seja, a trajetória de rota que possui o menor tempo de entrada em cada uma delas.

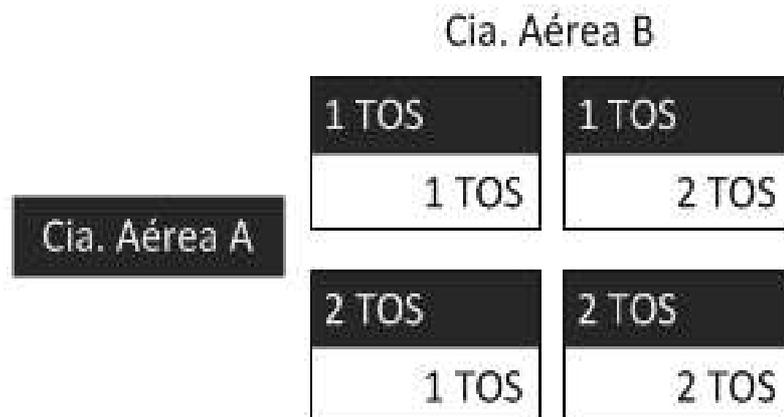


Figura 4.8: Visão geral do modelo em Teoria dos Jogos

A combinação de cada par de jogadas, ao final do jogo, resultará na quantidade de minutos de atraso nos voos capturados pelo CTOP para cada companhia aérea, conforme cada possível resultado.

Para identificar um comportamento inicial dentro das negociações no CTOP, foram definidos três casos e para cada caso sete cenários. A Figura 4.9 apresenta a visão geral dos casos e cenários definidos.

Analisando a Figura 4.9 é possível verificar três casos, referentes a proporção de voos de cada companhia capturados no CTOP:

1. A *CompanhiaAéreaA* possui 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* possui 50%.
2. A *CompanhiaAéreaA* possui 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* possui 33%.
3. A *CompanhiaAéreaA* possui 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* possui 75%.

E existem sete cenários para cada caso, referentes a ordem na fila de associação de *slots* utilizada pela FAA.

1. Os voos de ambas as companhias estão distribuídos aleatoriamente.
2. Os voos são inicialmente distribuídos na proporção: 1 voo da *CompanhiaAéreaA* e 1 voo da *CompanhiaAéreaB*. Conforme em alguns casos uma companhia possui mais voos do que a outra, os voos remanescentes da companhia serão distribuídos ao final da lista.
3. Os voos são inicialmente distribuídos na proporção: 1 voo da *CompanhiaAéreaB* e 1 voo da *CompanhiaAéreaA*. Conforme em alguns casos uma companhia possui mais voos do que a outra, os voos remanescentes da companhia serão distribuídos ao final da lista.

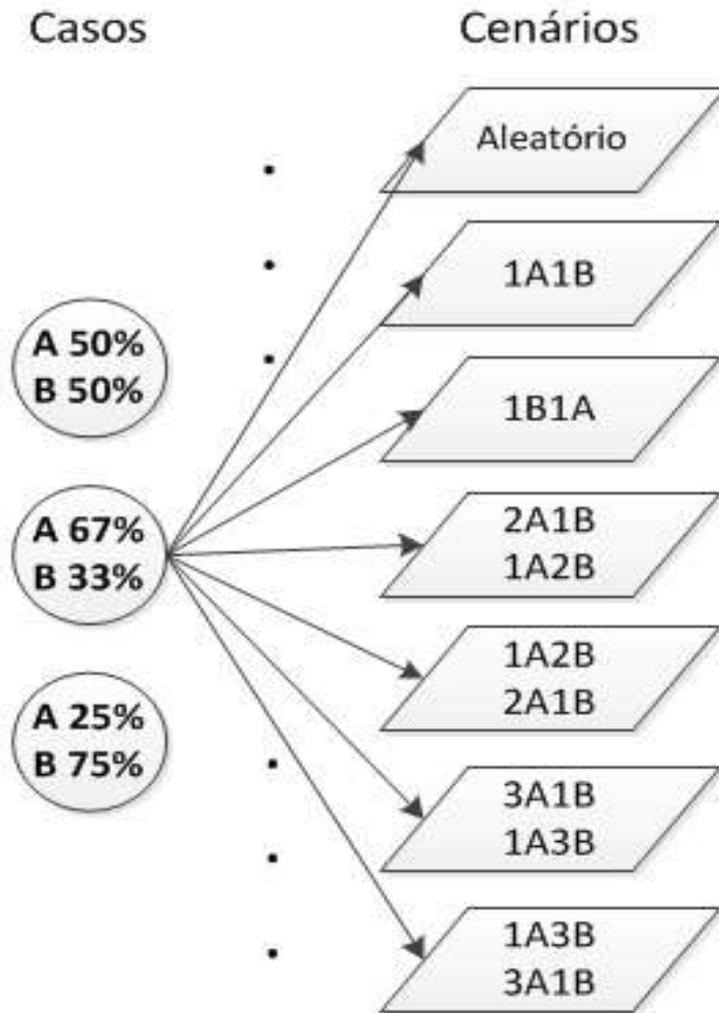


Figura 4.9: Visão geral dos casos e cenários

4. Os voos são inicialmente distribuídos na proporção, na primeira metade da lista: 2 voos da *CompanhiaAéreaA* e 1 voo da *CompanhiaAéreaB*, e na segunda metade 1 voo da *CompanhiaAéreaA* e 2 voos da *CompanhiaAéreaB*. Conforme em alguns casos uma companhia possui mais voos do que a outra, os voos remanescentes da companhia serão distribuídos ao final da metade da lista a qual pertencem.
5. Os voos são inicialmente distribuídos na proporção, na primeira metade da lista: 1 voo da *CompanhiaAéreaA* e 2 voos da *CompanhiaAéreaB*, e na segunda metade 2 voos da *CompanhiaAéreaA* e 1 voo da *CompanhiaAéreaB*. Conforme em alguns casos uma companhia possui mais voos do que a outra, os voos remanescentes da companhia serão distribuídos ao final da metade da lista a qual pertencem.
6. Os voos são inicialmente distribuídos na proporção, na primeira metade da lista: 3 voos da *CompanhiaAéreaA* e 1 voo da *CompanhiaAéreaB*, e na se-

gunda metade 1 voo da *CompanhiaAéreaA* e 3 voos da *CompanhiaAéreaB*. Conforme em alguns casos uma companhia possui mais voos do que a outra, os voos remanescentes da companhia serão distribuídos ao final da metade da lista a qual pertencem.

7. Os voos são inicialmente distribuídos na proporção, na primeira metade da lista: 1 voo da *CompanhiaAéreaA* e 3 voos da *CompanhiaAéreaB*, e na segunda metade 3 voos da *CompanhiaAéreaA* e 1 voo da *CompanhiaAéreaB*. Conforme em alguns casos uma companhia possui mais voos do que a outra, os voos remanescentes da companhia serão distribuídos ao final da metade da lista a qual pertencem.

Os casos e cenários apresentados acima conseguem resumir uma visão geral do comportamento e influência da proporção de voos e do ordenamento das listas de alocação de *slots*, conforme a realidade atual.

Levando em conta o modelo apresentado, ao final de cada jogo existem 21 possíveis combinações de casos e cenários, os quais combinados com os movimentos de jogo possíveis por cada companhia aérea resultam em 84 possíveis resultados finais para o jogo.

A função *payoff*, ou seja, como cada jogador irá verificar o ganho de cada possível ação a ser tomada, deste modelo é definida por:

$$Atraso(C, S, MA, MB) = x \quad (4.7)$$

Onde:

- $Atraso(C,S,M)$ = atraso estimado em x minutos para cada combinação de caso, cenário e movimentos de cada uma das companhias.

4.5.2 Estudo de Caso

Para validar este modelo foi executado um estudo de caso envolvendo duas FCA's, *FCA001* e *FCA002*; duas companhias aéreas, *A* e *B*; com 331 voos partindo dos aeroportos: *Chicago O'Hare International Airport* (ORD), *Miami International Airport* (MIA), *Dallas/Fort Worth International Airport* (DFW), *Los Angeles International Airport* (LAX), *McCarran International Airport* (LAS) e *San Francisco International Airport* (SFO); e com direção aos aeroportos: *LaGuardia Airport* (LGA), *Newark Liberty International Airport* (EWR) e *John F. Kennedy International Airport* (JFK).

A demanda CTOP foi definida com 4 horas de duração, de 16:00 até 20:00, e com a capacidade de 3 aeronaves a cada 15 minutos para ambas as FCA's. Gerando 48 *slots* disponíveis para cada FCA durante todo o CTOP.

A Figura 4.10 apresenta a visão geral da demanda CTOP utilizada para o estudo de caso, para um voo específico.

Analisando a Figura 4.10 é possível verificar um voo saindo do aeroporto de *Dallas* em direção a região metropolitana de *New York*. Existem três opções para este voo: voar pela *FCA001* ou pela *FCA002* ou desviar da área de fluxo restrita.

Para a execução da abordagem *greedy*, foi executado o módulo em dois passos desenvolvido por Bosung e Clarke (2014). Como entradas de informações

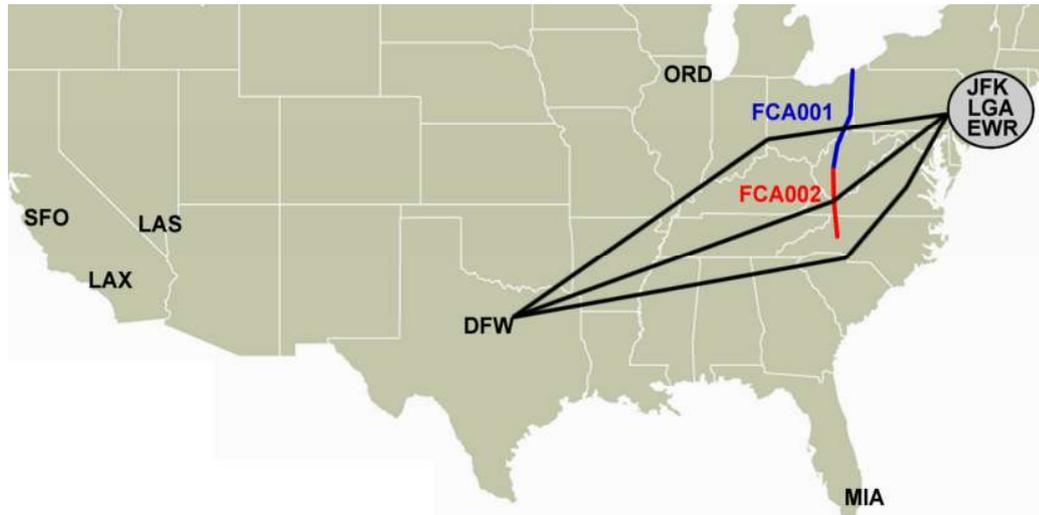


Figura 4.10: Visão geral da demanda CTOP

para o sistema foram assumidas algumas premissas: a *Companhia Aérea A* enviaria as 8 melhores trajetórias para cada voo, ou seja, as que tivessem o horário de entrada na FCA mais cedo, independentemente por qual FCA voaria; e a *Companhia Aérea B* enviaria somente a melhor opção de trajetória para cada voo.

Para a execução da abordagem em Teoria dos jogos, existiam quatro possíveis resultados, considerando os movimentos de jogo:

- Movimento (11), ambas as companhias enviam a melhor trajetória global por voo.
- Movimento (22), ambas as companhias enviam a melhor trajetória em cada FCA por voo.
- Movimento (21), a *Companhia Aérea A* envia a melhor trajetória em cada FCA por voo e a *Companhia Aérea B* envia a melhor trajetória global por voo.
- Movimento (12), a *Companhia Aérea A* envia a melhor trajetória global por voo e a *Companhia Aérea B* envia a melhor trajetória em cada FCA por voo.

4.5.3 Resultados Alcançados *versus* Abordagem *Greedy*

Foram escolhidos 15 voos aleatoriamente para serem rastreados durante o estudo de caso e apresentados de maneira mais clara, além dos atrasos globais para a *Companhia Aérea A*.

Considerando a abordagem *greedy*, a Tabela 4.1 apresenta os voos rastreados quando a *Companhia Aérea A* possuía 67% dos voos e a *Companhia Aérea B* 33%. A Tabela 4.2 apresenta os voos rastreados quando a *Companhia Aérea A* possuía

Tabela 4.1: Voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 33%

FID	FCA _{IAT}	FCA _{Asg} (EAT)	Slot _{Asg}	Dep _{Delay}
F21	FCA001(18:14)	FCA001 (18:18)	19:07	49
F24	FCA001(18:16)	FCA001 (18:16)	19:12	56
F30	FCA001(18:29)	FCA002 (18:36)	18:57	21
F37	FCA001(18:46)	FCA001 (18:46)	23:02	256
F38	FCA001(18:51)	FCA001 (18:51)	23:03	252
F40	FCA001(18:54)	FCA002 (19:35)	19:37	2
F46	FCA001(19:16)	FCA002 (19:23)	19:57	34
F48	FCA001(19:27)	FCA002 (20:08)	20:42	34
F53	FCA001(19:54)	FCA002 (20:01)	21:22	81
F54	FCA001(19:58)	FCA002 (20:39)	21:42	63
F61	FCA001(19:30)	FCA002 (19:37)	22:17	160
F65	FCA001(18:36)	FCA002 (18:41)	22:37	236
F66	FCA001(19:37)	FCA002 (19:43)	22:42	179
F67	FCA001(19:43)	FCA001 (19:58)	23:10	192
F69	FCA001(19:47)	FCA001 (19:54)	23:11	197

Tabela 4.2: Voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%

FID	FCA _{IAT}	FCA _{Asg} (EAT)	Slot _{Asg}	Dep _{Delay}
F21	FCA001(18:14)	FCA001 (18:18)	19:52	94
F24	FCA001(18:16)	FCA001 (18:16)	19:57	101
F30	FCA001(18:29)	FCA002 (18:36)	19:12	36
F37	FCA001(18:46)	FCA001 (18:46)	23:06	260
F38	FCA001(18:51)	FCA001 (18:51)	23:07	256
F40	FCA001(18:54)	FCA002 (19:35)	19:52	17
F46	FCA001(19:16)	FCA002 (19:23)	20:42	79
F48	FCA001(19:27)	FCA002 (20:08)	21:07	59
F53	FCA001(19:54)	FCA002 (20:01)	22:12	131
F54	FCA001(19:58)	FCA002 (20:39)	22:32	113
F61	FCA001(19:30)	FCA002 (19:37)	23:00	203
F65	FCA001(18:36)	FCA002 (18:41)	23:02	261
F66	FCA001(19:37)	FCA002 (19:43)	23:03	200
F67	FCA001(19:43)	FCA001 (19:58)	23:17	199
F69	FCA001(19:47)	FCA001 (19:54)	23:18	204

50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%. A Tabela 4.3 apresenta os voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%.

Analisando as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 é possível verificar na coluna *FCA IAT* o horário mínimo de entrada dentre todas as rotas que foram enviadas, na coluna *FCA Asg (EAT)* o horário mínimo da rota que foi escolhida para ser associada,

Tabela 4.3: Voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%

FID	FCA _{IAT}	FCA _{Asg} (EAT)	Slot _{Asg}	Dep _{Delay}
F21	FCA001(18:14)	FCA001 (18:18)	23:11	293
F24	FCA001(18:16)	FCA001 (18:16)	23:12	296
F30	FCA001(18:29)	FCA002 (18:36)	19:27	51
F37	FCA001(18:46)	FCA001 (18:46)	23:21	275
F38	FCA001(18:51)	FCA001 (18:51)	23:22	271
F40	FCA001(18:54)	FCA002 (19:35)	20:27	52
F46	FCA001(19:16)	FCA002 (19:23)	21:17	114
F48	FCA001(19:27)	FCA002 (20:08)	22:12	124
F53	FCA001(19:54)	FCA002 (20:01)	23:03	182
F54	FCA001(19:58)	FCA002 (20:39)	23:05	146
F61	FCA001(19:30)	FCA002 (19:37)	23:09	212
F65	FCA001(18:36)	FCA002 (18:41)	23:11	270
F66	FCA001(19:37)	FCA002 (19:43)	23:11	208
F67	FCA001(19:43)	FCA001 (19:58)	23:38	220
F69	FCA001(19:47)	FCA001 (19:54)	23:39	225

Tabela 4.4: Voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 33%

		Cia. B	
Cia. A		TOS = 1	TOS = 2
	TOS = 1	A (AG) = 14382 A (Ras) = 2513	A (AG) = 14216 A (Ras) = 2461
	TOS = 2	A (AG) = 13287 A (Ras) = 2182	A (AG) = 13419 A (Ras) = 2217

na coluna *Slot Asg* o horário do *slot* com menor atraso para o voo, e na coluna *Dep. Delay* o atraso associado para cada um dos voos em minutos.

Além dos voos rastreados, na abordagem em Teoria dos Jogos é apresentado o atraso global dos voos da *CompanhiaAéreaA*, conforme cada combinação de movimentos para o jogo. A Tabela 4.4 apresenta os voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 33%. A Tabela 4.5 apresenta os voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%. A Tabela 4.6 apresenta os voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%.

Analisando as Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 é possível verificar, para cada combinação de movimento do jogo, o atraso global (AG) e o atraso dentre os voos rastreados (Ras) para os voos da *CompanhiaAéreaA*.

Considerando a abordagem em Teoria dos Jogos, a Figura 4.11 apresenta um gráfico com o atraso em minutos para os voos da *CompanhiaAéreaA*, divididos entre o atraso global e o atraso dos voos rastreados, para os três casos: *CompanhiaAéreaA* possuía 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 33%,

Tabela 4.5: Voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%

Cia. A		Cia. B	
		TOS = 1	TOS = 2
TOS = 1	A (AG) = 19419	A (AG) = 19347	
	A (Ras) = 3714	A (Ras) = 3782	
TOS = 2	A (AG) = 18072	A (AG) = 18179	
	A (Ras) = 3579	A (Ras) = 3619	

Tabela 4.6: Voos rastreados quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%

Cia. A		Cia. B	
		TOS = 1	TOS = 2
TOS = 1	A (AG) = 16105	A (AG) = 15892	
	A (Ras) = 2703	A (Ras) = 2872	
TOS = 2	A (AG) = 15981	A (AG) = 16120	
	A (Ras) = 2652	A (Ras) = 2714	

CompanhiaAéreaA possuía 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%, e *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%.

Considerando a abordagem em Teoria dos Jogos, a Figura 4.12 apresenta um gráfico com o atraso em minutos associado para a *CompanhiaAéreaA*, divididos por possíveis resultados finais e para os três casos: *CompanhiaAéreaA* possuía 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 33%, *CompanhiaAéreaA* possuía 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%, e *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%.

A Figura 4.13 apresenta a comparação dos resultados finais entre as duas abordagens, ou seja, quanto foi o atraso global, para três casos, os voos da *CompanhiaAéreaA*.

Analisando as Figuras 4.12 e 4.13 é possível verificar alguns pontos:

- No caso em que a *CompanhiaAéreaA* possuía 67% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 33%, a melhor estratégia para a *CompanhiaAéreaA* seria enviar duas opções de trajetórias, uma para cada FCA. O melhor caso acontece quando são enviadas duas trajetórias pela *A* e uma trajetória pela *B*, justificado pelo fato de o concorrente possuir menos preferências no momento da alocação. Nesta abordagem, a *CompanhiaAéreaA* alcançou um atraso maior que a abordagem *greedy*, entre 16 e 27% nos voos rastreados e 21 e 26% considerando todos os voos.
- No caso em que a *CompanhiaAéreaA* possuía 50% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 50%, a melhor estratégia para a *CompanhiaAéreaA* seria enviar duas opções de trajetórias, uma para cada FCA. O melhor caso acontece quando são enviadas duas trajetórias pela *A* e uma trajetória pela *B*, justificado pelo fato de o concorrente possuir menos preferências no momento da alocação. Nesta abordagem, a *CompanhiaAéreaA* alcançou um

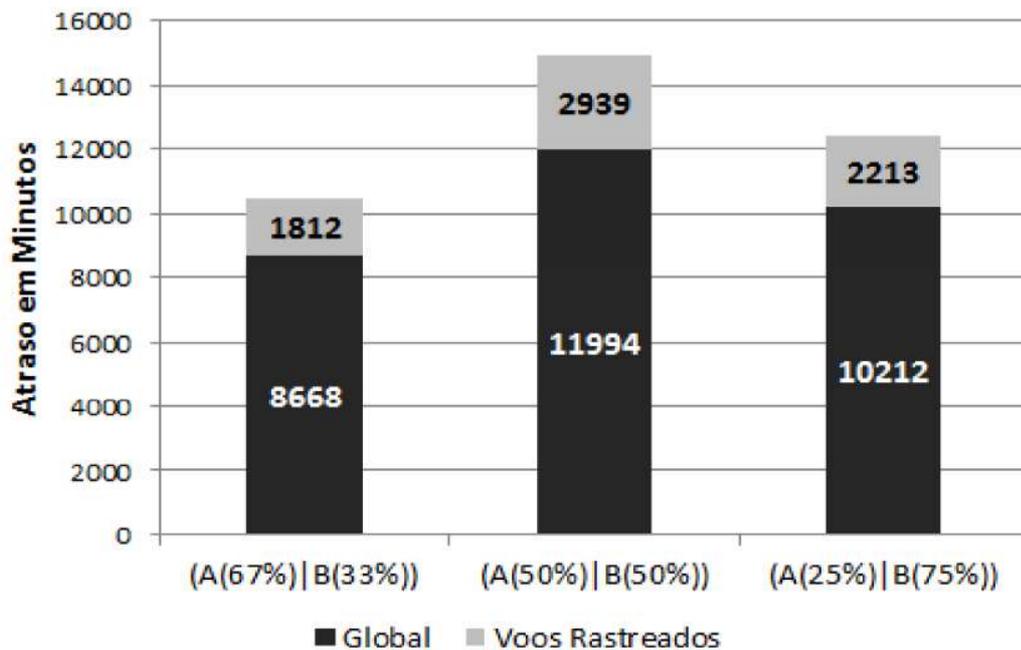


Figura 4.11: Atraso associado para a Cia. A em Teoria dos Jogos

atraso maior que a abordagem *greedy*, entre 17 e 22% nos voos rastreados e 17 e 23% considerando todos os voos.

- No caso em que a *CompanhiaAéreaA* possuía 25% dos voos e a *CompanhiaAéreaB* 75%, a melhor estratégia para a *CompanhiaAéreaA* seria enviar uma opção de trajetória. O melhor caso acontece quando é enviada uma trajetória pela *A* e duas trajetórias pela *B*. Nesta abordagem, a *CompanhiaAéreaA* alcançou um atraso maior que a abordagem *greedy*, entre 16 e 22% nos voos rastreados e 21 e 23% considerando todos os voos.

Os resultados acima demonstram que a abordagem em Teoria dos Jogos pode ser utilizada com resultados satisfatórios para o problema a ser resolvido por esta tese e sem a necessidade de se assumir premissas que não são reais para a prática, ao se comparar com a abordagem *greedy*, que alcança um resultado ótimo teórico assumindo-se que a *CompanhiaAéreaA* tem conhecimento de todos os voos e horários de todos os envolvidos no CTOP. Tal informação somente é conhecida com todos os detalhes pela FAA, segundo as diretrizes atuais do CTOP.

Na prática isso foi um estudo que irá ditar as diretrizes a serem definidas nos próximos capítulos para que a solução computacional seja aplicável na prática, por qualquer companhia aérea que esteja envolvida no CTOP, e que possa lidar com os principais problemas de incerteza durante a definição de quantas trajetórias devem ser enviadas em cada demanda.

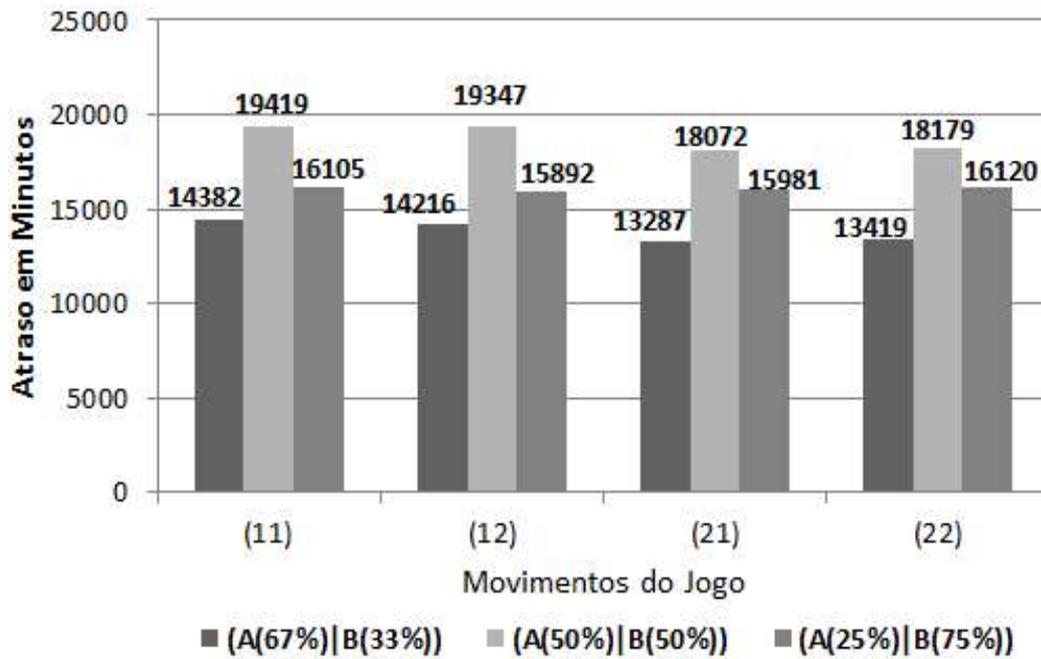


Figura 4.12: Atraso associado para a Cia. A por movimentos de jogo

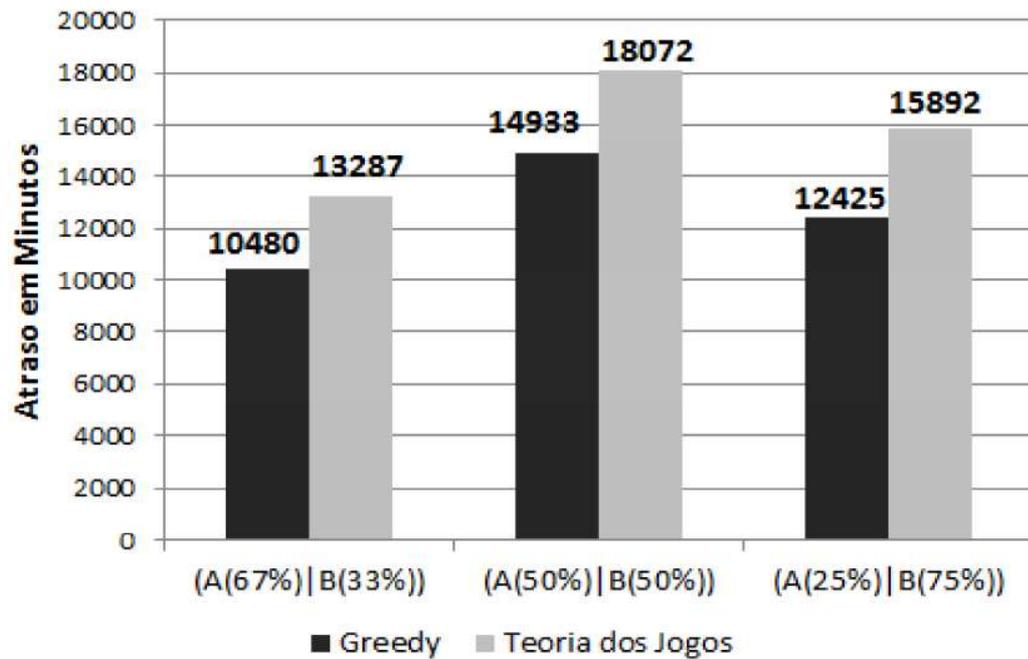


Figura 4.13: Comparação dos resultados em *Greedy* e Teoria dos Jogos para a Cia. A

Capítulo 5

Incerteza na Tomada de Decisão no CTOP

O capítulo irá apresentar alguns pontos importantes do ambiente de incerteza envolvido no processo de tomada de decisão do CTOP, o qual irá dar embasamento técnico e prático para o desenvolvimento dos modelos SG-CTOP e RG-CTOP.

5.1 Otimização de Negociação via TOS

Conforme foi apresentado no capítulo 4, a aplicação da Teoria dos Jogos alcançou resultados satisfatórios quando comparados com resultados ótimos teóricos, via solução combinatória, para o problema de redução de atrasos no CTOP, ao se enviar o TOS de cada voo (Bosung, 2015).

Esta aplicação inicial em Teoria dos Jogos, obteve um atraso maior do que o ótimo teórico entre 16 e 27%, quando são considerados somente ambientes conhecidos, ou seja, uma determinada companhia aérea conhece todas as informações dos seus concorrentes quando são capturados em uma demanda CTOP (Bosung e Clarke, 2014).

Entretanto, uma solução combinatória não retrata a realidade das companhias aéreas nos EUA, uma vez que cada uma possui conhecimento somente sobre os seus respectivos voos no CTOP, conforme apresentado no capítulo 3.

Ao se iniciar o CTOP, somente as informações dos voos de cada companhia são compartilhadas com cada uma. Por mais que uma companhia aérea possa realizar previsões de quais voos foram capturados no CTOP, baseando-se em planos de voos repetitivos, continuará sendo uma estimativa uma vez que no mercado norte americano existem muitos possíveis voos não repetitivos e que podem ter sido capturados.

Considerando as possíveis estratégias utilizadas, atualmente, pelas principais companhias aéreas nos EUA e os estudos iniciais apresentados no capítulo 4, o atraso poderia variar 65% após 100 demandas do CTOP, implicando em um atraso entre 3761 e 6231 horas de atraso global em todos os voos, de uma determinada companhia aérea, capturados no CTOP.

Esta grande variação de atrasos dada somente pela estratégia que uma companhia tem para alcançar melhores resultados contra seu concorrente, justifica

que cada uma envolvida no CTOP tenha consciência e tome ações para minimizar seus riscos em cada negociação, e, assim, alcançar melhores resultados de negócio.

Cada estratégia a ser utilizada na negociação pode ser retratada da seguinte maneira: quantas trajetórias serão enviadas, no TOS, para cada voo envolvido no CTOP, a fim de que a estratégia escolhida melhore o posicionamento daquele voo na fila de associação de *slots* pela FAA e, assim, reduzindo seu atraso no voo por ter tido preferência ao ser associado.

Assim, é possível verificar três pontos no processo de tomada de decisão ao se enviar o TOS de cada voo:

1. O ambiente de cada demanda CTOP possui um alto grau de incerteza, o qual dificulta a aplicação de uma abordagem *greedy*, uma vez que cada companhia aérea não possui conhecimento de todo o ambiente no qual está inserida.
2. A estratégia de envio do TOS, definida por cada empresa, possui um grande impacto na ordem final de associação de *slots* pela FAA, o que poderia alcançar uma taxa até 65% maior de atrasos, conforme estudos iniciais desse trabalho.
3. O envio de ilimitadas opções de trajetórias para cada voo não necessariamente irá trazer melhores resultados. Conforme apresentado no capítulo 4, ao se comparar uma abordagem *greedy* enviando 8 opções de trajetórias e uma abordagem em Teoria dos Jogos enviando K opções de trajetórias, onde K é a quantidade de FCA's definidas na demanda CTOP, no geral a segunda abordagem atingiu 17% mais atrasos, porém sem ser assumido premissas não reais para a companhia aérea.

O terceiro ponto valida a utilização de Teoria dos Jogos para resolução do problema de decisão quanto a definição da melhor estratégia para o envio do TOS, considerando-se que a utilização de uma solução que sempre alcance um ótimo global, para uma determinada companhia aérea, não é viável diante das diretrizes atuais do CTOP nos EUA.

Para exemplificar o problema de decisão acima, alguns pontos são resumidos:

- Ao iniciar o CTOP, cada companhia aérea é informada pela FAA sobre quais os seus respectivos voos foram capturados para, possivelmente, sofrerem alguma medida restritiva ao voar por uma, ou várias, FCA's.
- Cada companhia aérea precisa definir sua estratégia para alcançar um melhor posicionamento na fila de associação de *slots* de uma determinada demanda CTOP. Ressaltando-se que quanto melhor a posição de cada voo na fila, menor será o atraso no voo.
- O atraso que será atribuído a cada voo está ligado à quantidade de opções de trajetórias enviadas para cada voo; a estratégia dos concorrentes e a estratégia da própria companhia aérea relacionada com a proporção dos seus voos capturados no CTOP, conforme apresentado no capítulo 4.

- Ao final de cada demanda CTOP, cada companhia aérea possui acesso somente as informações dos seus próprios voos alocados, ou seja, não estão disponíveis informações como: quantidade de companhias aéreas envolvidas no CTOP; quantidade de voos e proporção dentro do conjunto total de voos capturados no CTOP; estratégias utilizadas pelos concorrentes; lista final de associação de *slots*; dentre outras. Assim, cada companhia precisa realizar uma estimativa do ambiente envolvido para adaptação das suas estratégias para as próximas negociações.

Considerando o processo de associação de *slots* e a definição da estratégia de envio do TOS por uma companhia aérea, foi definido um processo de decisão TOS para o CTOP, quando são definidas múltiplas áreas de fluxo restrito (FCA's), o qual é apresentado na Figura 5.1.

Analisando a Figura 5.1 é possível verificar que em um primeiro passo todas as informações quanto a demanda CTOP são definidas e enviadas, separadamente, para cada companhia aérea envolvida pela FAA. Após os envolvidos no CTOP iniciado tomarem conhecimento, foram definidos dois passos primordiais para entender e modelar a solução para o processo de decisão do TOS no CTOP.

1. Atuar na 1º negociação CTOP: Nesta primeira negociação CTOP, não existem informações iniciais para cada companhia aérea agir, a fim de maximizar seus resultados no jogo. Assim, é necessário que a companhia aérea defina uma estratégia para redução do risco de atrasos, de um modo geral, conforme os possíveis casos e estratégias.

Por exemplo, no primeiro jogo existe a mesma probabilidade de que uma companhia aérea tenha 50% ou 33% do total de voos capturados na demanda CTOP, assim como, o seu concorrente poderia enviar uma ou duas opções de trajetórias para cada voo com a mesma probabilidade.

Resumindo-se, na primeira rodada de negociação todos os casos e estratégias possuem a mesma probabilidade de acontecer, porém cada companhia aérea tem conhecimento sobre os seus voos, o que pode possibilitar, de uma forma geral, a análise e estimativa para reduzir a probabilidade de alcançar menores atrasos.

Para resolver este primeiro problema de decisão foi desenvolvido o modelo, em Teoria dos Jogos e Sistemas Multiagentes, *Single Games for CTOP* (SG-CTOP). Este modelo realiza uma estimativa para redução de atrasos de forma dinâmica, quando existem múltiplas áreas de fluxo restrito. Apesar de ter sido desenvolvido para múltiplas áreas, a sua utilização em uma única FCA segue a mesma ideia.

2. Atuar após a 1º negociação CTOP: A partir da primeira negociação, é possível que cada companhia aérea realize uma estimativa do que aconteceu nas demandas anteriores do CTOP e realize uma adequação da sua estratégia de jogo.

Por exemplo, conforme a proporção de voos capturados no CTOP e a estratégia utilizada pelo seu concorrente na rodada anterior, a estratégia pode mudar completamente para se alcançar melhores resultados. Um caso

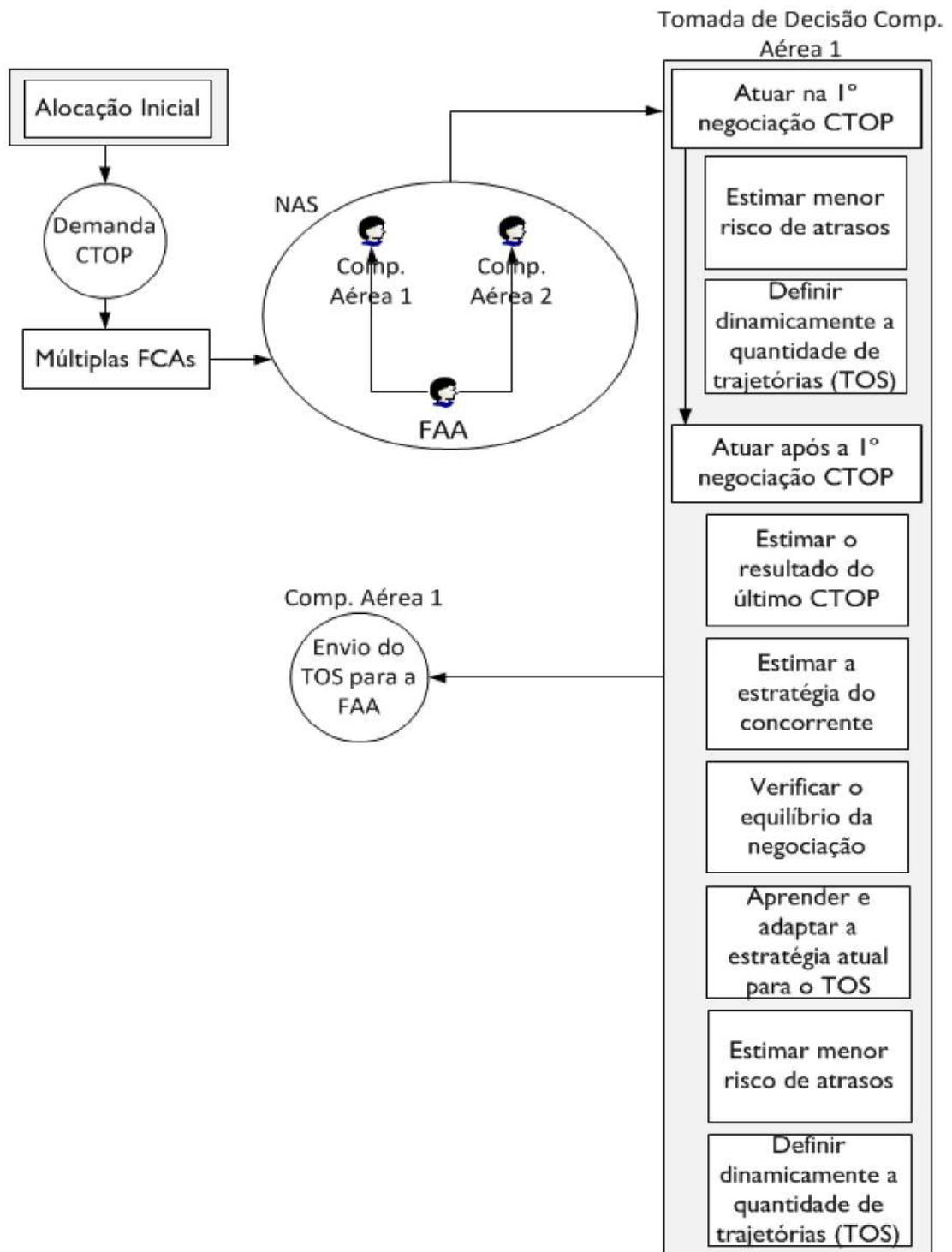


Figura 5.1: Processo de decisão TOS para o CTOP

possível é quando verifica-se que seu concorrente está enviando *NOSLOT* para todos os seus voos, ou seja, ele não está concorrendo aos *slots* disponíveis. Analisando a Figura 5.2 e considerando 100 demandas CTOP com múltiplas FCA's, em 95% dos casos, a melhor estratégia foi enviar uma trajetória para cada FCA, quando existiam duas FCA's.

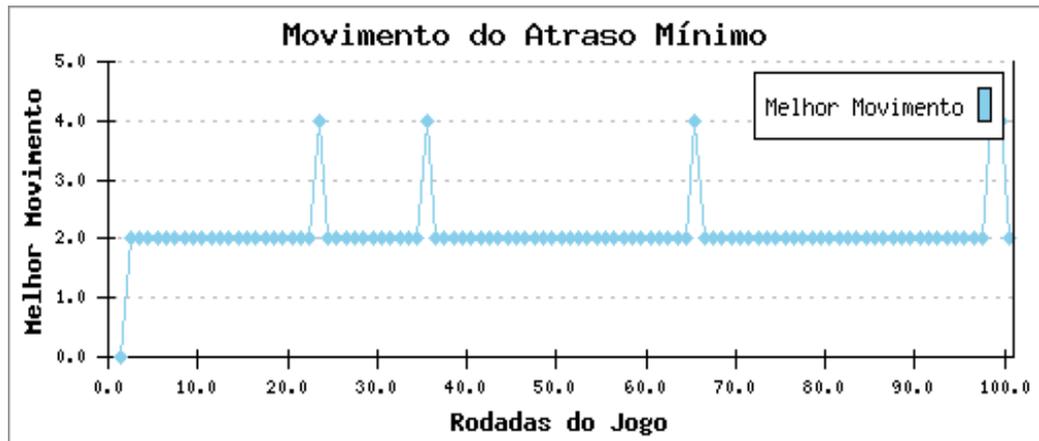


Figura 5.2: Movimento do Atraso Mínimo

Assim sendo, dado que uma companhia aérea na rodada anterior possuía uma estimativa de atraso para cada possível caso e resultado final do jogo, como estimar qual a sua proporção de voos na demanda CTOP, qual a estratégia do seu concorrente, dentre outros.

Para resolver este segundo problema de decisão foi desenvolvido o modelo, em Teoria dos Jogos, Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço, *Repeated Games for CTOP (RG-CTOP)*. Este modelo realiza quatro principais passos: estimar o ambiente final do último jogo e a estratégia do concorrente, verificar o equilíbrio das jogadas possíveis para aquele determinado jogo, e, após isso, tornar possível o aprendizado e adaptação das estratégias para os próximos jogos.

Para ambos os modelos acima, não foram assumidas premissas para que cada companhia aérea tomasse conhecimento de informações que não estão disponíveis no dia a dia, assim, tornando-se possível a sua utilização pelo mercado. No capítulo 5 cada modelo será detalhado adequadamente.

5.2 Analisando as Negociações no CTOP

Durante a fase inicial para entendimento de como funciona o CTOP no dia a dia das companhias aéreas, alguns estudos foram desenvolvidos para verificar o comportamento e a relação da quantidade de trajetórias no TOS, a influência da estratégia do concorrente, o impacto da proporção de voos na fila de associação, dentre outros.

A Figura 5.3 apresenta a comparação de atrasos em minutos, após 100 demandas CTOP para a Companhia Aérea A, dada cada possível estratégia e o resultado final alcançado após o envio do TOS pelo seu concorrente.

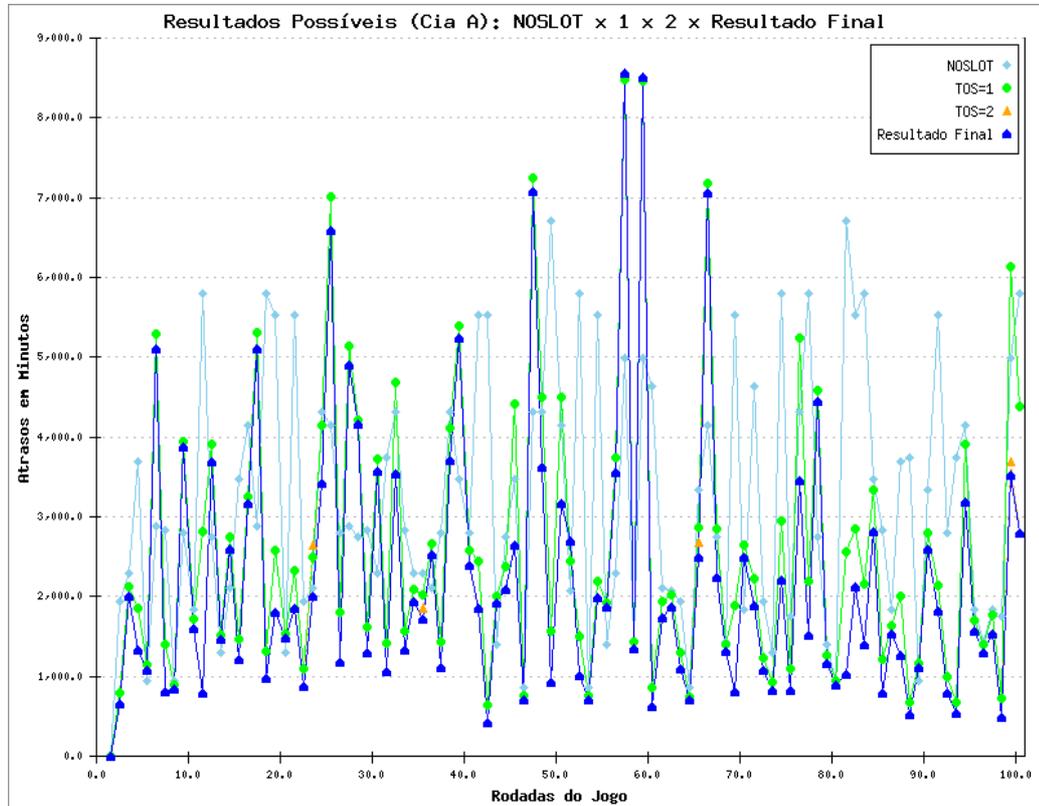


Figura 5.3: Resultados Possíveis para a Cia A x Resultado Final do CTOP

Analisando a Figura 5.3 é possível verificar um ponto importante, apesar de que o envio da opção *NOSLOT* fosse melhor para alguns jogos, o custo de se enviar esta opção, quando ela não era a melhor estratégia para um determinado jogo, era muito mais alto.

Considerando-se a possibilidade da proporção de voos de cada companhia aérea na ordem da fila de associação de *slots*, foram definidos três cenários para analisar esta possível influência. Assim a fila de associação de *slots* foi dividida pela metade, e a proporção global de voos capturados distribuídos em cada uma das metades gerando três cenários para cada proporção utilizada no estudo.

Assim como os três cenários, foram utilizados três casos considerando somente a proporção global de voos capturados, de cada companhia aérea, no CTOP. Esta divisão foi dada pela representatividade da realidade nos EUA. A divisão entre casos e cenários será detalhada na Figura 6.2.

No primeiro caso, no qual havia 50% de voos de cada uma das duas companhias aéreas, o cenário 1 possuía na primeira metade da fila 25% de voos da Companhia Aérea A e 75% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 75% de voos da Companhia Aérea A e 25% de voos da Companhia Aérea B. O cenário 2 possuía 50% dos voos de cada companhia aérea em cada metade. E o cenário

3 possuía na primeira metade da fila 75% de voos da Companhia Aérea A e 25% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 25% de voos da Companhia Aérea A e 75% de voos da Companhia Aérea B.

No segundo caso, no qual havia 67% dos voos da Companhia Aérea A e 33% da Companhia Aérea B, o cenário 1 possuía na primeira metade da fila 33% de voos da Companhia Aérea A e 67% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 100% de voos da Companhia Aérea A e 0% de voos da Companhia Aérea B. O cenário 2 possuía na primeira metade da fila 67% de voos da Companhia Aérea A e 33% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 67% de voos da Companhia Aérea A e 33% de voos da Companhia Aérea B. O cenário 3 possuía na primeira metade da fila 100% de voos da Companhia Aérea A e 0% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 33% de voos da Companhia Aérea A e 67% de voos da Companhia Aérea B.

No terceiro caso, no qual havia 75% dos voos da Companhia Aérea A e 25% da Companhia Aérea B, o cenário 1 possuía na primeira metade da fila 50% de voos da Companhia Aérea A e 50% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 100% de voos da Companhia Aérea A e 0% de voos da Companhia Aérea B. O cenário 2 possuía na primeira metade da fila 75% de voos da Companhia Aérea A e 25% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 75% de voos da Companhia Aérea A e 25% de voos da Companhia Aérea B. O cenário 3 possuía na primeira metade da fila 100% de voos da Companhia Aérea A e 0% de voos da Companhia Aérea B e na segunda metade da fila 50% de voos da Companhia Aérea A e 50% de voos da Companhia Aérea B.

A Figura 5.4 apresenta a porcentagem de cada movimento, quando este alcançaria o atraso mínimo em uma determinada demanda CTOP, para o caso em que existiam 50% dos voos capturados no CTOP para cada uma das companhias aéreas. No mesmo caso, a Figura 5.5 apresenta os resultados para o cenário 2 e a Figura 5.6 apresenta os do cenário 3.

Analisando as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, é possível verificar alguns pontos importantes:

- A jogada que alcançou os melhores resultados foi quando a Companhia Aérea A enviou duas trajetórias, uma para cada FCA, e a Companhia Aérea B enviava *NOSLOT*. Apesar de parecer trivial esta afirmação, devido ao concorrente desistir de disputar os *slots* disponíveis, em algumas demandas, neste mesmo caso, existia uma variação para a melhor estratégia a ser enviada. Conforme outros casos e cenários foram avaliados, foi percebido que este possível equilíbrio para o jogo é variável, para um primeiro jogo de rodada única.
- Em todos os cenários deste caso quando o concorrente enviava uma ou duas trajetórias, a melhor opção seria se a Companhia Aérea A tivesse enviado *NOSLOT* para todos os seus voos, em $\approx 44\%$ dos casos. Entretanto, um ponto importante a ser apontado, conforme os estudos apresentados, é o alto custo de atraso ao se enviar *NOSLOT* quando o concorrente envia uma trajetória para cada FCA.

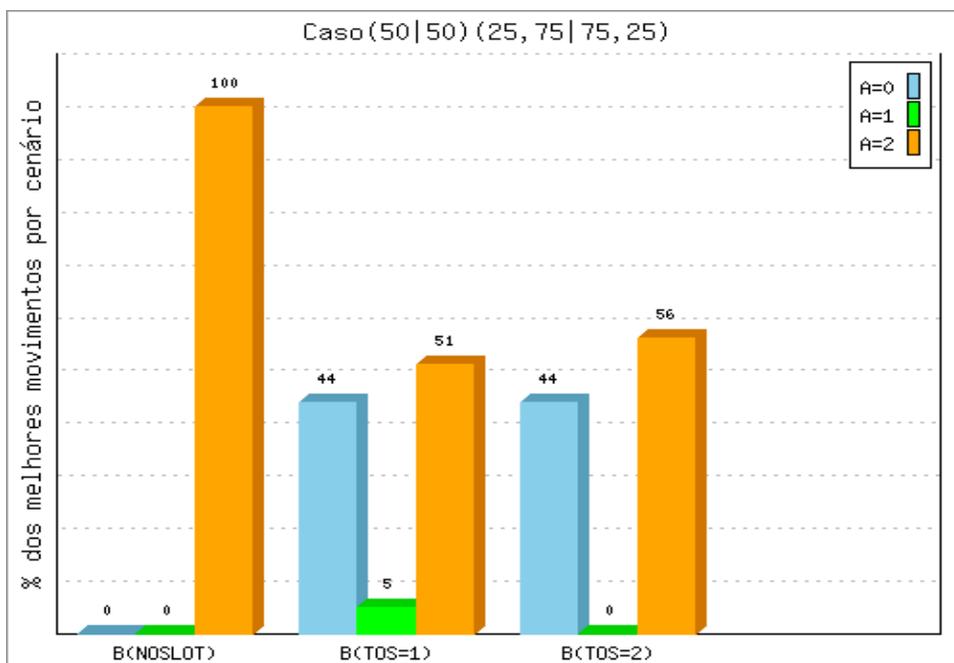


Figura 5.4: Melhores movimentos para o Caso 50-50 no cenário 1

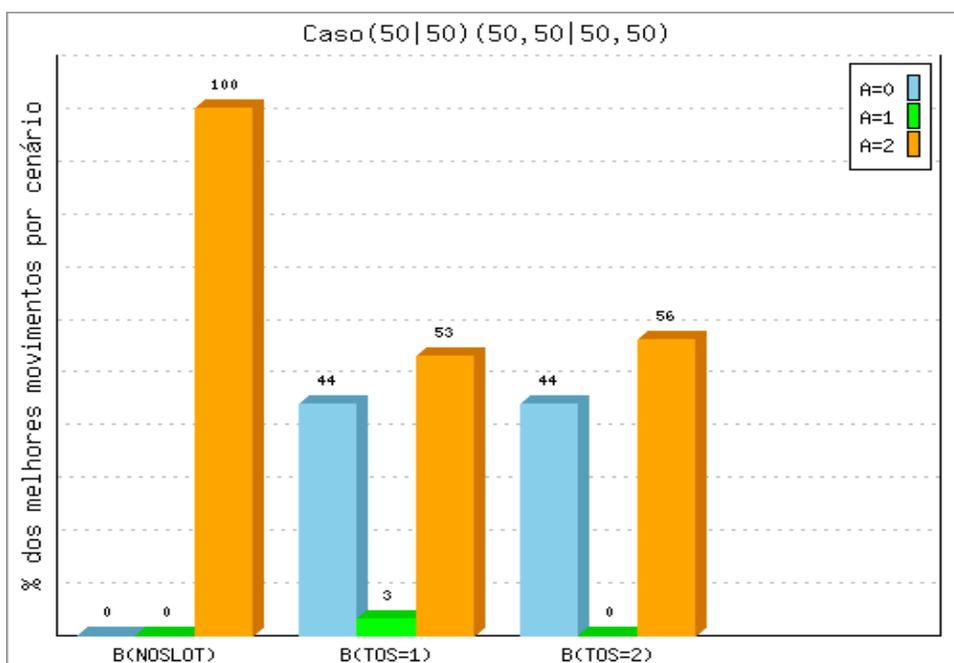


Figura 5.5: Melhores movimentos para o Caso 50-50 no cenário 2

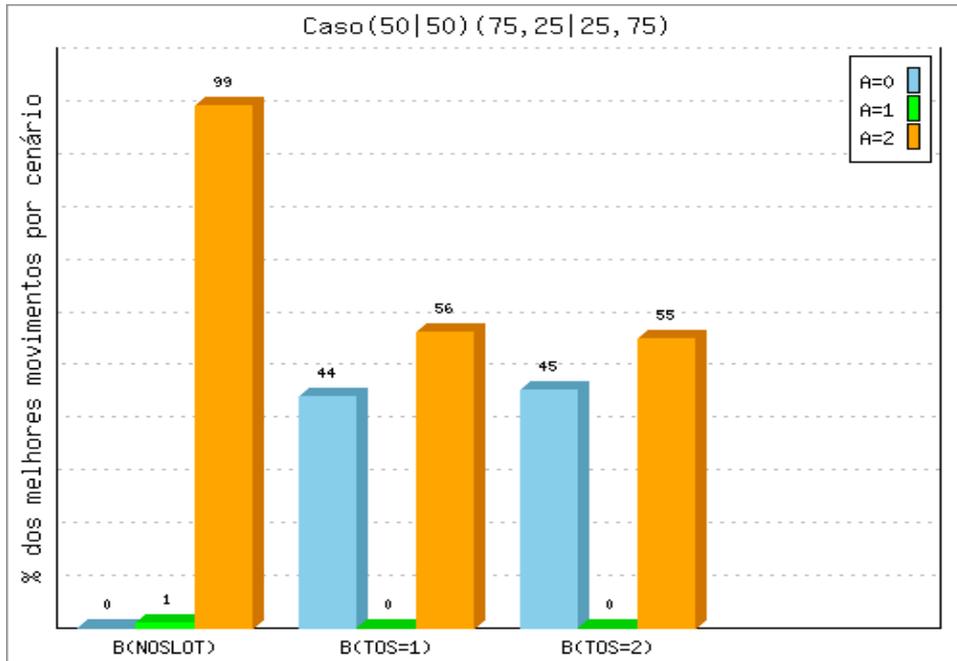


Figura 5.6: Melhores movimentos para o Caso 50-50 no cenário 3

- Considerando todos os três cenários, é possível verificar que a proporção de voos dentro da primeira ou segunda metade da fila de associação de *slots* não gerou interferência relevante na sua própria estratégia, independentemente da estratégia da Companhia Aérea B.

A Figura 5.7 apresenta a porcentagem de cada movimento, quando este alcançaria o atraso mínimo em uma determinada demanda CTOP, para o caso em que existiam 67% dos voos capturados no CTOP para a Companhia Aérea A e 33% para a Companhia Aérea B. No mesmo caso, a Figura 5.8 apresenta os resultados para o cenário 2 e a Figura 5.9 apresenta os do cenário 3. A divisão entre casos e cenários pode ser verificada na Figura 6.2.

Analisando as Figuras 5.7, 5.8 e 5.9, é possível verificar alguns pontos importantes:

- No terceiro cenário, houve uma relevante diferença ao ser enviado *NOSLOT* pelo concorrente para todos os seus voos. Em 43% das rodadas de negociação, para a Companhia Aérea A, teria sido melhor enviar *NOSLOT* para todos os seus voos também. Este fato pode ser explicado pela presença de mais voos da Companhia Aérea A na proporção global e a maior concorrência na segunda metade, fato o qual estará ligado a um atraso em cadeia.
- Em todos os cenários em que o concorrente envia uma ou duas trajetórias, os melhores resultados para a Companhia Aérea A são alcançados em uma mesma proporção, tendo uma maior diferença no primeiro cenário, no qual

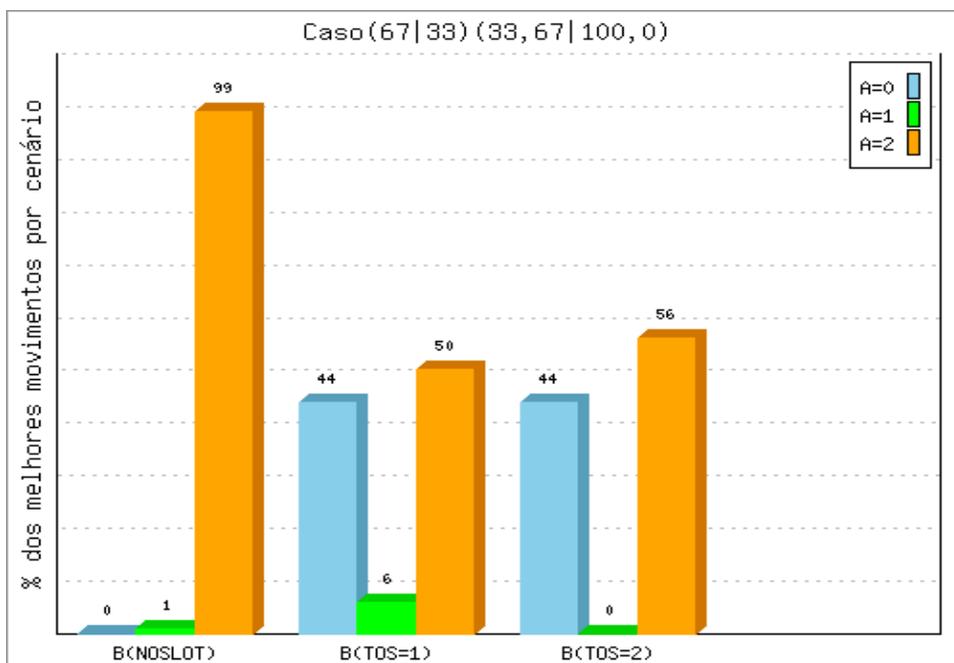


Figura 5.7: Melhores movimentos para o Caso 67-33 no cenário 1

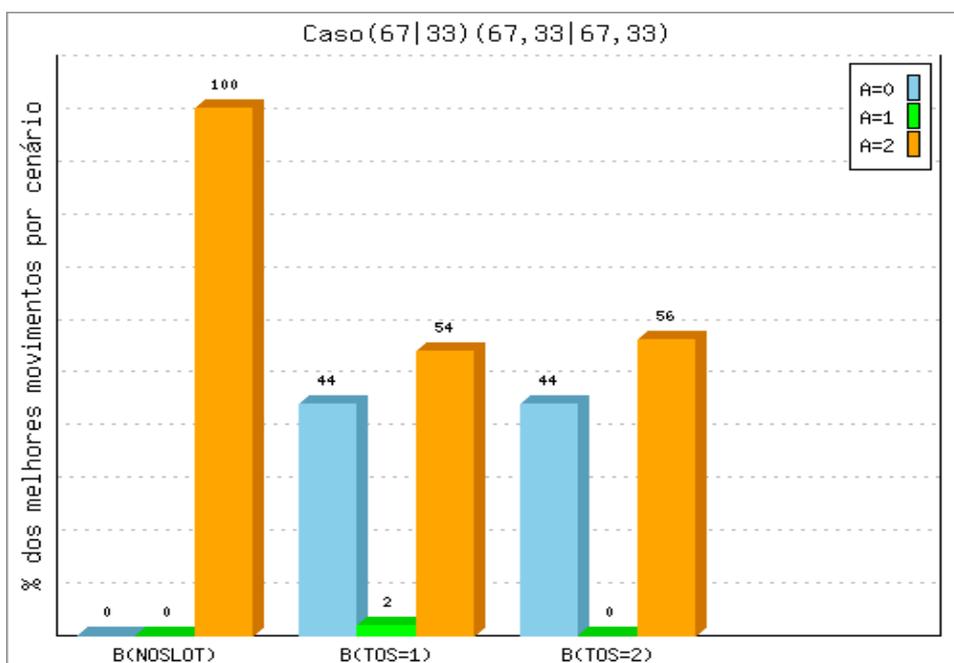


Figura 5.8: Melhores movimentos para o Caso 67-33 no cenário 2

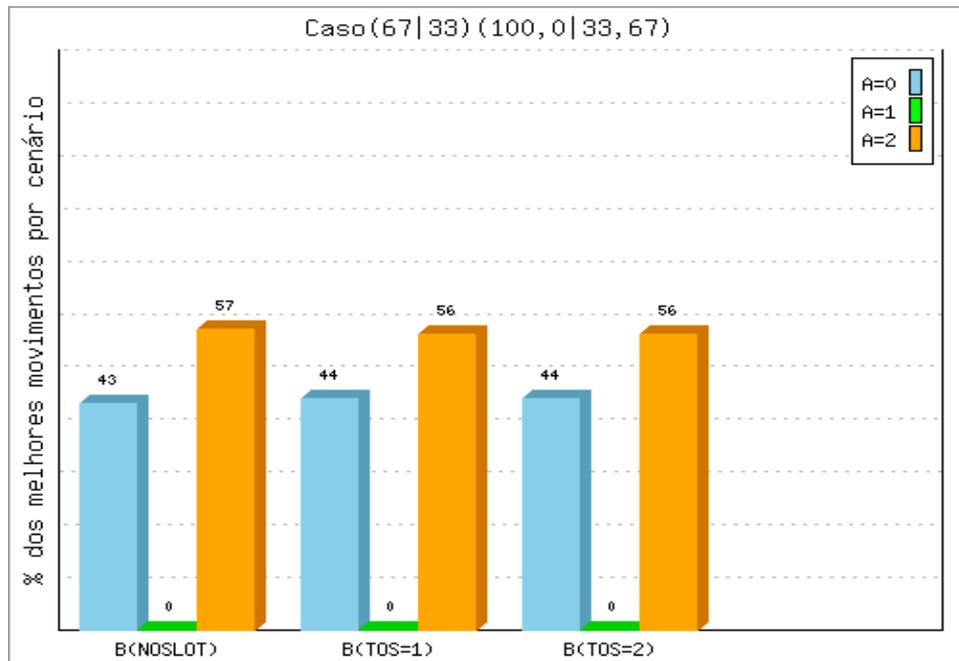


Figura 5.9: Melhores movimentos para o Caso 67-33 no cenário 3

em 6% das demandas CTOP era melhor enviar uma trajetória para cada um dos voos da Companhia Aérea A.

A Figura 5.10 apresenta a porcentagem de cada movimento, quando este alcançaria o atraso mínimo em uma determinada demanda CTOP, para o caso em que existiam 75% dos voos capturados no CTOP para a Companhia Aérea A e 25% para a Companhia Aérea B. No mesmo caso, a Figura 5.11 apresenta os resultados para o cenário 2 e a Figura 5.12 apresenta os do cenário 3. A divisão entre casos e cenários pode ser verificada na Figura 6.2.

Analisando as Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, é possível verificar alguns pontos importantes:

- Conforme observado no caso 67-33, existe uma relação também neste caso no cenário 3, no qual em 43% das demandas CTOP seria melhor, para a Companhia Aérea A, enviar *NOSLOT* quando o concorrente enviava a mesma opção.
- É possível verificar que independentemente da estratégia utilizada pelo concorrente, a proporção de ganho dada suas próprias estratégias segue praticamente a mesma.

Considerando o que foi apresentado, pode-se inferir que, de maneira geral, a estratégia de se enviar K trajetórias, onde K é a quantidade de FCA's, alcança melhores resultados, porém em grande parte dos cenários existe uma concorrência com a opção *NOSLOT* para a melhor estratégia de cada jogo. E dado que em uma primeira rodada de um jogo único, ou seja, em uma primeira negociação CTOP

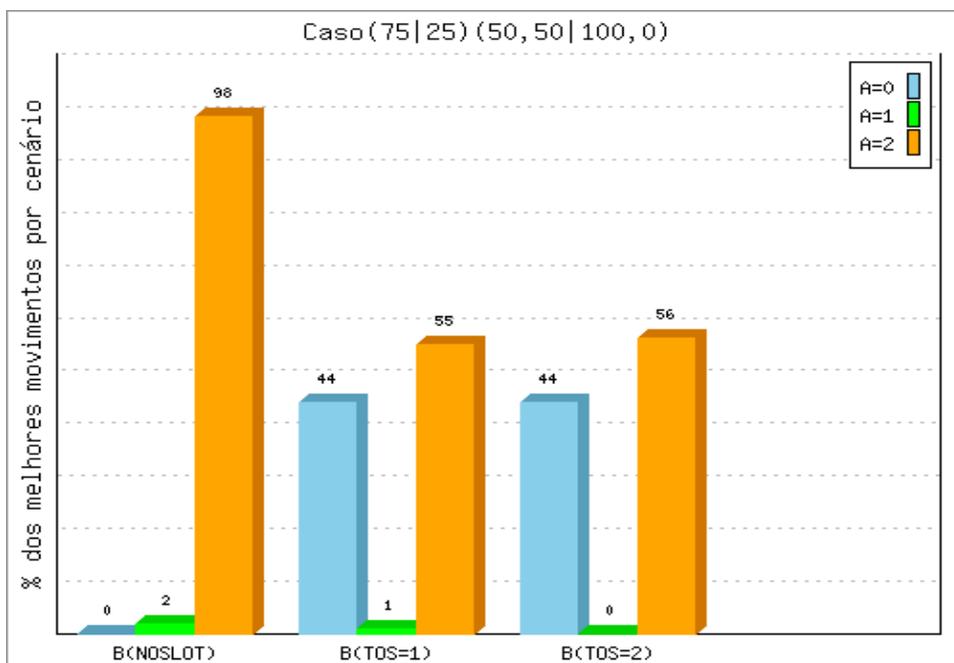


Figura 5.10: Melhores movimentos para o Caso 75-25 no cenário 1

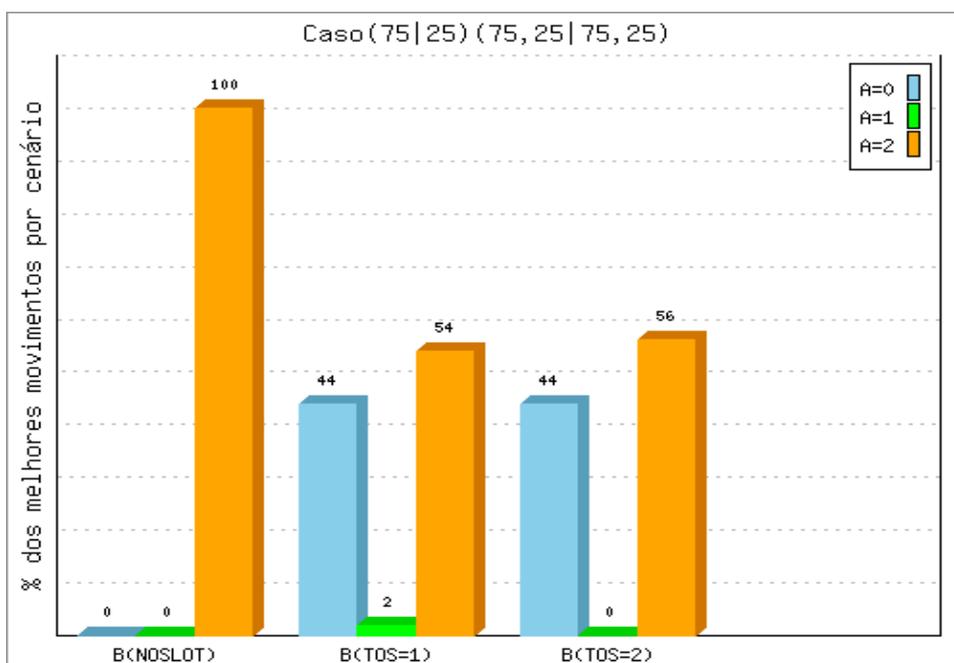


Figura 5.11: Melhores movimentos para o Caso 75-25 no cenário 2

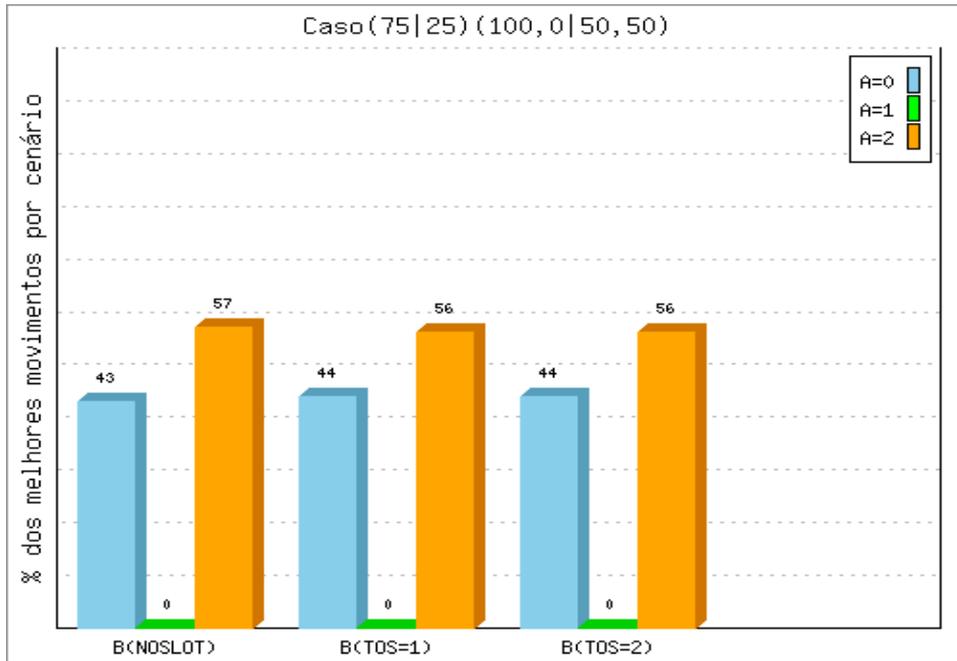


Figura 5.12: Melhores movimentos para o Caso 75-25 no cenário 3

a Companhia Aérea A não possui nenhuma informação do jogo ou da reputação do seu concorrente, como modelar um sistema de suporte à decisão que possa dinamicamente analisar seus voos e reduzir os possíveis riscos para a redução do atraso nos seus voos.

Assim, o SG-CTOP foi modelado para agir na primeira rodada de uma negociação entre duas companhias aéreas, a fim de reduzir, no geral, os atrasos com seus voos a partir do posicionamento de cada voo na fila de associação de *slots* a ser utilizada pela FAA.

A Figura 5.13 apresenta o atraso mínimo estimado pela Companhia Aérea A e o resultado final do jogo. É possível verificar alguns importantes pontos: o atraso associado é, em geral, maior do que o atraso mínimo estimado pela companhia; os maiores atrasos mínimos estavam quando a proporção de voos era maior que o concorrente, 67% (C2) e 75% (C4); e o atraso mínimo global estava, no geral, relacionado ao caso em que a Companhia Aérea A possuía 25% (C5) e 33% (C3). O caso de 50% da proporção dos voos foi representado como C1.

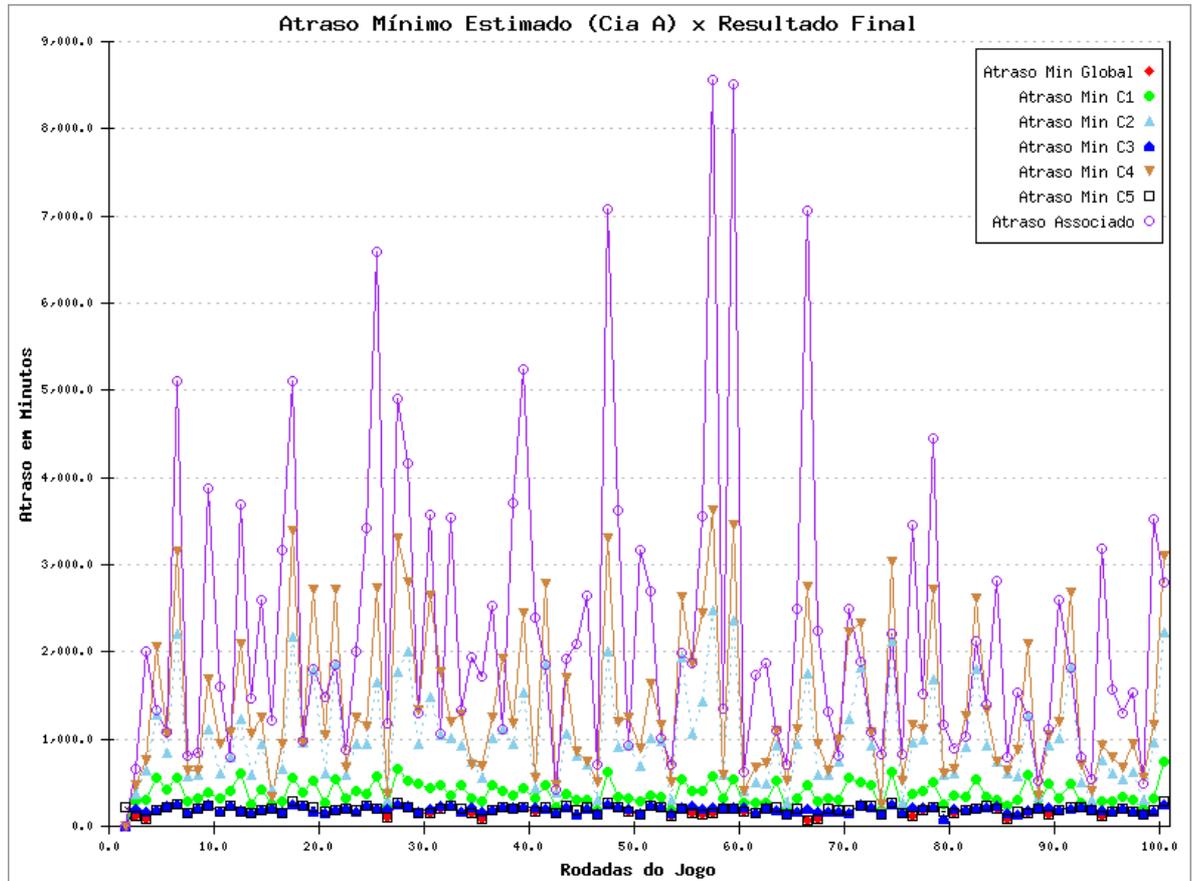


Figura 5.13: Atrasos Mínimo Estimado (Cia A) x Resultado Final

Analisando a Figura 5.13 é possível verificar que a estimativa realizada pela Companhia Aérea A em uma primeira rodada de negociação em cada demanda CTOP é, geralmente, menor do que as estimativas realizadas ao se enviar o TOS de cada voo.

Assim, o RG-CTOP se apresenta como um modelo que consegue aprender e se adaptar, no dia a dia, a fim de melhorar as estimativas realizadas conforme as interações acontecem e melhorar os resultados alcançados pela Companhia Aérea A pela adaptação das estratégias utilizadas.

Capítulo 6

Modelos de Teoria de Jogos para o CTOP

O capítulo irá apresentar duas soluções para a negociação e decisão do conjunto de opções de trajetórias para a *CompanhiaAéreaA*, a qual disputa com outra companhia os *slots* disponíveis no CTOP. Será utilizada a Teoria dos Jogos para otimizar o processo de decisão em ambientes incertos; Sistemas Multiagentes para o controle, análise e gerenciamento das entidades e processos envolvidos; e Aprendizagem por Reforço para possibilitar a adaptação das estratégias de jogo.

6.1 Single Games for CTOP

Considerando o que foi apresentado até o momento, o primeiro problema foi definido como uma companhia aérea pode melhorar seu processo de definição de estratégias para envio do TOS, quando não se existe conhecimento prévio de como os demais concorrentes irão se comportar no processo de negociação de *slots* disponíveis no CTOP.

Para o processo de decisão envolvido no CTOP quanto a quantidade de opções de trajetórias devem ser enviadas para cada negociação, foi apresentado uma metodologia de como este problema pode ser resolvido pela Figura 5.1, no qual o SG-CTOP atua na primeira negociação entre os jogadores e sem a utilização de conhecimento prévio dos concorrentes como reputações; estratégias; horário de voos capturados no CTOP; dentre outros.

Assim, o SG-CTOP foi desenvolvido para sugerir dinamicamente, ao gestor de operações de uma companhia aérea, quantas opções de trajetórias irão possibilitar que a companhia aérea reduza os riscos de ter um maior atraso nos voos capturados pelo CTOP. A Figura 6.1 apresenta a visão geral do SG-CTOP.

Analisando a Figura 6.1, foram definidos 4 passos primordiais para o processo de tomada de decisão de uma companhia aérea, neste caso a *CompanhiaAéreaA* foi definida como a companhia que fará uso do SG-CTOP.

1. Definir casos e estratégias: Baseado na proporção real de voos em que cada companhia aérea pode ter dentro do CTOP, foram definidos alguns possíveis casos e as estratégias mais usuais pelas companhias aéreas atualmente.

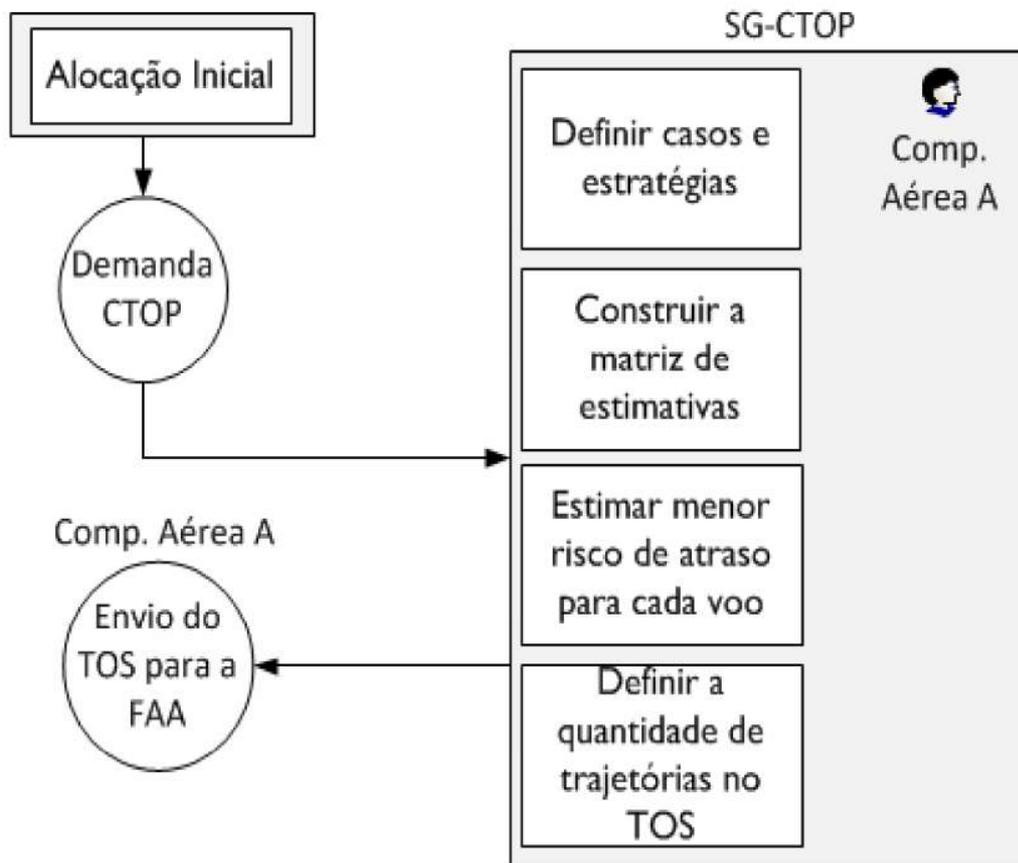


Figura 6.1: *Single Games for CTOP*

2. Construir a matriz de estimativas: O modelo possui na sua base uma matriz que relaciona todos os possíveis casos e estratégias para encontrar qual estratégia terá maior possibilidade de alcançar um menor atraso para uma determinada demanda do CTOP.
3. Estimar menor risco de atraso para cada voo: A função *payoff* do SG-CTOP irá retratar este relacionamento e normalizar os valores, a fim de buscar sempre o melhor resultado possível.
4. Definir a quantidade de trajetórias no TOS: Enviar a sugestão final, ao gestor de operações da companhia aérea, de quantas opções de trajetórias devem ser enviadas naquele CTOP.

Para o desenvolvimento do SG-CTOP, algumas premissas foram assumidas:

- O jogo terá dois jogadores denominados como *CompanhiaAéreaA* e *CompanhiaAéreaB*. A *CompanhiaAéreaA* foi escolhida como o jogador principal, e a *CompanhiaAéreaB* como o concorrente.
- Foram definidas duas FCA's para cada CTOP.

- Cada jogador possui três movimentos para o jogo:
 1. Enviar *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.
 2. Enviar duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
 3. Enviar três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
- O jogo desenvolvido é não-cooperativo, não-repetitivo e com informação incompleta.

6.1.1 Casos e Cenários de Jogo

Considerando a proporção de voos que cada um dos jogadores possui dentro do conjunto de voos capturados no CTOP, foram definidos três possíveis casos:

1. A *CompanhiaAéreaA* possui 50% e a *CompanhiaAéreaB* possui 50% dos voos capturados no CTOP.
2. A *CompanhiaAéreaA* possui 67% e a *CompanhiaAéreaB* possui 33% dos voos capturados no CTOP.
3. A *CompanhiaAéreaA* possui 75% e a *CompanhiaAéreaB* possui 25% dos voos capturados no CTOP.

Os casos apresentados acima englobam na prática as 5 proporções em que cada companhia aérea norte americana se encaixava nas demandas reais do CTOP.

A Figura 6.2 apresenta os possíveis casos definidos e cenários relacionados com a fila para a associação de *slots* pela FAA.

Analisando a Figura 6.2 e baseado em observações, é possível verificar que existem 3 possíveis cenários para cada caso, quanto a fila de associação dos *slots* disponíveis da FAA.

1. Caso 50% - 50%:
 - Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
 - Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

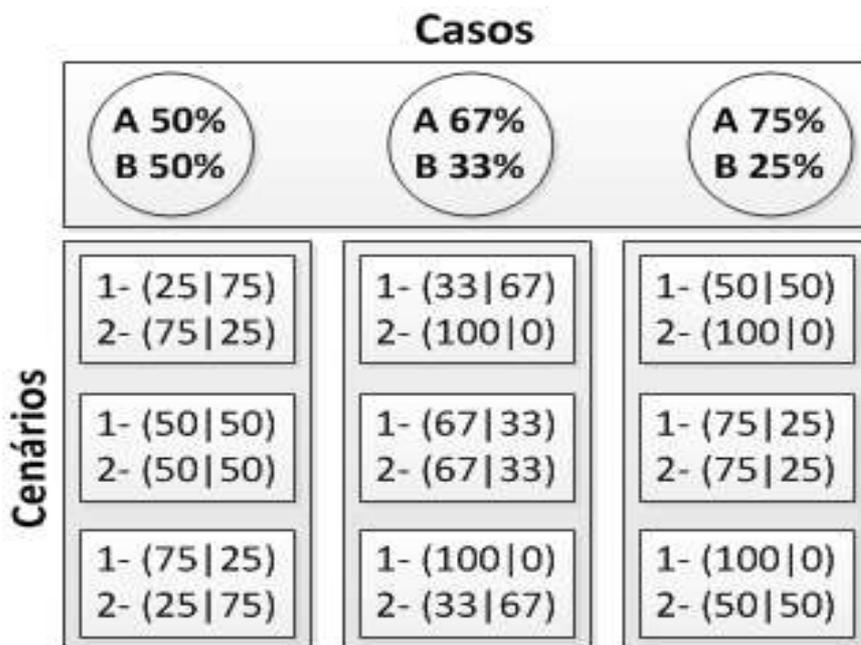


Figura 6.2: Casos e cenários no SG-CTOP

- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
2. Caso 67% - 33%:
- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
 - Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
 - Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
3. Caso 75% - 25%:
- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *Companhia Aérea A* e 25% de voos da *Companhia Aérea B*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *Companhia Aérea A* e 25% de voos da *Companhia Aérea B*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *Companhia Aérea A* e 0% de voos da *Companhia Aérea B*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *Companhia Aérea A* e 50% de voos da *Companhia Aérea B*.

Os nove cenários apresentados acima foram escolhidos observando-se as possíveis distribuições dos voos de cada companhia aérea dentro da lista de associação, que será utilizada pela FAA para atribuir cada *slot* disponível à cada voo.

6.1.2 Estratégias de Jogo

O SG-CTOP foi modelado, analogamente, ao Dilema dos Prisioneiros. A Figura 6.3 apresenta a organização do modelo de jogo utilizado pelo SG-CTOP.

		Cia. Aérea B		
Cia. Aérea A		NOSLOT (1054)	NOSLOT (1054)	NOSLOT (1054)
		NOSLOT (510)	1 Trajetória + NOSLOT (513)	2 Trajetórias + NOSLOT (471)
	1 Trajetória + NOSLOT (1012)	NOSLOT (510)	1 Trajetória + NOSLOT (1033)	1 Trajetória + NOSLOT (1102)
		NOSLOT (510)	1 Trajetória + NOSLOT (477)	2 Trajetórias + NOSLOT (489)
	2 Trajetórias + NOSLOT (980)	NOSLOT (510)	2 Trajetórias + NOSLOT (1002)	2 Trajetórias + NOSLOT (1007)
		NOSLOT (510)	1 Trajetória + NOSLOT (511)	2 Trajetórias + NOSLOT (481)

Figura 6.3: Modelo de jogo SG-CTOP

Analisando a Figura 6.3, é possível verificar que em cada jogo existem 9 possíveis combinações para as estratégias. Em cada possível combinação para este jogo, é apresentada a quantidade de atrasos em minutos para todos os voos que foram capturados pelo CTOP para cada uma das companhias aéreas.

Assim, considerando que na primeira negociação todos os casos e cenários possuem a mesma probabilidade de ocorrer e que existem 3 casos e 3 cenários para cada caso, totalizará 81 possíveis resultados finais para cada jogo.

Levando-se em consideração que o SG-CTOP somente trata as informações conhecidas por cada um dos envolvidos no processo, a Figura 6.4 apresenta as estimativas no modelo de jogo que a *CompanhiaAéreaA* tem acesso no momento em que a demanda CTOP é iniciada.

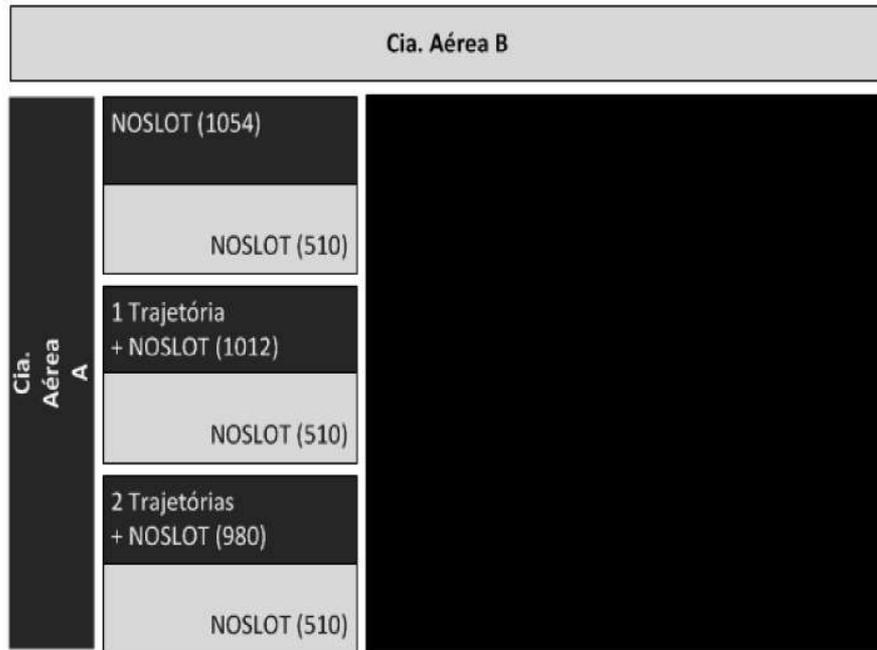


Figura 6.4: Estimativa conhecida pela *CompanhiaAéreaA*

Analisando a Figura 6.4, é possível verificar que a *CompanhiaAéreaA* consegue estimar três casos, quando a *CompanhiaAéreaB* envia *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP:

1. Movimento 0: *CompanhiaAéreaA* envia *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.
2. Movimento 1: *CompanhiaAéreaA* envia duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
3. Movimento 2: *CompanhiaAéreaA* três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.

Assim, ao considerar que existem 3 casos e 3 cenários para cada caso, é criado uma matriz de estimativas baseada nas estimativas disponíveis, apresentadas acima. A Figura 6.5 apresenta a matriz de estimativas para a *CompanhiaAéreaA*.

Analisando a Figura 6.5, é possível verificar que cada linha da matriz apresenta os minutos de atraso nos voos da *CompanhiaAéreaA*, para a relação caso; cenário; movimento da *CompanhiaAéreaA* e movimento da *CompanhiaAéreaB*.

Caso 1 – Cenário 1 (A = 0, B = 0) 1202	Caso 1 – Cenário 1 (A = 1, B = 0) 1107	Caso 1 – Cenário 1 (A = 2, B = 0) 1109
Caso 1 – Cenário 2 (A = 0, B = 0) 1202	Caso 1 – Cenário 2 (A = 1, B = 0) 1091	Caso 1 – Cenário 2 (A = 2, B = 0) 1110
Caso 1 – Cenário 3 (A = 0, B = 0) 1202	Caso 1 – Cenário 3 (A = 1, B = 0) 1201	Caso 1 – Cenário 3 (A = 2, B = 0) 1256
Caso 2 – Cenário 1 (A = 0, B = 0) 1480	Caso 2 – Cenário 1 (A = 1, B = 0) 1507	Caso 2 – Cenário 1 (A = 2, B = 0) 1217
Caso 2 – Cenário 2 (A = 0, B = 0) 1480	Caso 2 – Cenário 2 (A = 1, B = 0) 1602	Caso 2 – Cenário 2 (A = 2, B = 0) 1299
Caso 2 – Cenário 3 (A = 0, B = 0) 1480	Caso 2 – Cenário 3 (A = 1, B = 0) 1598	Caso 2 – Cenário 3 (A = 2, B = 0) 1314
Caso 3 – Cenário 1 (A = 0, B = 0) 1802	Caso 3 – Cenário 1 (A = 1, B = 0) 1347	Caso 3 – Cenário 1 (A = 2, B = 0) 1281
Caso 3 – Cenário 2 (A = 0, B = 0) 1802	Caso 3 – Cenário 2 (A = 1, B = 0) 1280	Caso 3 – Cenário 2 (A = 2, B = 0) 1019
Caso 3 – Cenário 3 (A = 0, B = 0) 1802	Caso 3 – Cenário 3 (A = 1, B = 0) 1273	Caso 3 – Cenário 3 (A = 2, B = 0) 1125

Figura 6.5: Matriz de estimativas

Assim, existem 27 possíveis estimativas para a *Companhia Aérea A* no momento em que ela precisa definir quantas opções de trajetórias serão enviadas em uma determinada demanda CTOP.

Com esta matriz de estimativas o SG-CTOP irá avaliar para cada jogador como reduzir o risco de atrasos em um determinado conjunto de voos capturados no CTOP, e, assim, enviar a sugestão ao gestor de operações.

6.1.3 Função de Payoff

A função de *payoff* realiza alguns cálculos na matriz de estimativas, a fim de informar ao jogador o quão melhor será uma decisão em detrimento da outra.

Para tal, foi definido que não existe informação histórica para o SG-CTOP, ou seja, cada jogador irá lidar somente com as informações disponíveis naquela rodada do jogo. Este jogo terá uma rodada única, na qual ao final será apresentado o resultado para cada jogador, ou seja, cada um terá conhecimento somente dos seus próprios resultados.

Para verificar o atraso de cada voo dentro das estimativas realizadas para cada

caso, cenário e movimento da *CompanhiaAéreaA*, a Equação 6.1 apresentará o resultado em +minutos de atraso.

$$D(C, S, M) = dy \quad (6.1)$$

Onde:

- $D(C,S,M)$ = atraso estimado em minutos dado por dy , para a *CompanhiaAéreaA*, para cada caso (C); cenário (S) e movimento da companhia (M), quando a *CompanhiaAéreaB* envia seu movimento igual a 0 (*NOSLOT*). O movimento da *CompanhiaAéreaA* é dado por: 0 (*NOSLOT*), 1 (1 trajetória + *NOSLOT*) e 2 (2 trajetórias + *NOSLOT*).

O relacionamento entre os atrasos estimados é dado pelas Equações 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5.

$$M(C, S) = \left(\frac{D(C, S, \alpha) + (4 * D(C, S, \beta)) + D(C, S, \chi)}{6} \right) \quad (6.2)$$

$$S(C, S) = M(C, S) - (D(C, S, \alpha) - D(C, S, \chi)) \quad (6.3)$$

$$H(C, TS) = \frac{\sum_{K_1 \rightarrow TS} [\sum_{M_0 \rightarrow 2} D(C, K, M)]}{TS} \quad (6.4)$$

$$F(TC, TS) = \sum_{C_1 \rightarrow TC} [H(C, TS) - |S(C, S)|] \quad (6.5)$$

Onde:

- TC = Total de casos, o qual é definido neste modelo igual a 3: caso 1 (A=50%,B=50%), caso 2 (A=67%,B=33%) e caso 3 (A=75%,B=25%).
- TS = Total de cenários, o qual é definido neste modelo como 3 por cada caso, como representado na Figura 6.2
- $M(C,S)$ = Atraso estimado por cada caso e cenário. O α representa o movimento 0, β representa o movimento 1 e χ representa o movimento 2.
- $S(C,S)$ = Desvio estimado para cada caso e cenário. O α representa o movimento 0 e χ representa o movimento 2.
- $H(C,TS)$ = Atraso médio estimado por caso, considerando os seus possíveis cenários e movimentos.

- $F(TC,TS)$ = Relacionamento do atraso estimado dentre as possíveis combinações de caso e cenário, conforme os três movimentos da *CompanhiaAéreaA* e o movimento da *CompanhiaAéreaB* igual a 0 (*NOSLOT*).

A função de *payoff* é dado pelas Equações 6.6 e 6.7, onde o valor de SG_{Payoff} irá apresentar o movimento que deve ser sugerido ao gestor de operação da companhia aérea. O valor previsto é restrito em duas possibilidades: enviar 1 opção de trajetória + *NOSLOT* ou enviar 2 opções de trajetórias + *NOSLOT*.

Conforme os estudos apresentados no capítulo 5, a opção de enviar somente *NOSLOT* não será utilizada, no SG-CTOP, devido a grande probabilidade de receber atrasos maiores, ao se perder um jogo. Assim, este modelo tende a ser mais equilibrado para o uso real pelas companhias aéreas.

$$E(TC,TS) = \sum_{C_1 \rightarrow TC} \left[\sum_{S_1 \rightarrow TS} (D(C, S, \chi) - D(C, S, \beta)) \right] \quad (6.6)$$

$$SG_{Payoff} = \left[E(TC,TS) + \left(|E(TC,TS)| * \frac{F(TC,TS)}{10^{-4}} \right) \right] \quad (6.7)$$

$$\begin{cases} SG_{Payoff} \leq 0, \text{ GM} = 2 \text{ Trajetórias} + \text{NOSLOT} \\ SG_{Payoff} > 0, \text{ GM} = 1 \text{ Trajetória} + \text{NOSLOT} \end{cases}$$

Onde:

- $E(TC,TS)$ = A diferença do atraso entre uma trajetória + *NOSLOT* e duas trajetórias + *NOSLOT*, para cada caso e cenário. O β representa o movimento 1 e o χ representa o movimento 2.
- SG_{Payoff} = Representa o valor de *payoff* do SG-CTOP, pelo envio do movimento de jogo (GM). Quando o valor de SG_{Payoff} for maior que 0, será sugerido o envio de 1 opção de trajetória + *NOSLOT*. No caso em que o valor de SG_{Payoff} for menor ou igual a 0, será sugerido o envio de 2 opções de trajetórias + *NOSLOT*.

Com o não envio da opção *NOSLOT* sozinha, o SG-CTOP buscou equilibrar os seus possíveis ganhos com os riscos associados, limitando-se a enviar $K - 1$ ou K opções de trajetórias, onde K é a quantidade de FCA's utilizadas no modelo.

6.2 Repeated Games for CTOP

Considerando o que foi apresentado até o momento, o segundo problema foi definido em como uma companhia aérea poderia aumentar a alocação dos seus voos nos *slots* disponíveis em um processo repetitivo, que ocorre com a inicialização do CTOP, através da adaptação de suas estratégias conforme as alterações dos seus concorrentes.

Para o processo de decisão envolvido no CTOP quanto a quantidade de opções de trajetórias devem ser enviadas para cada negociação, foi apresentada uma metodologia de como este problema pode ser resolvido pela Figura 5.1, no qual o RG-CTOP atua a partir da primeira negociação entre os jogadores e com a utilização de conhecimento prévio dos concorrentes como reputações; estratégias; estimativa de resultados de jogos; dentre outros.

Assim, o RG-CTOP foi desenvolvido para sugerir dinamicamente, ao gestor de operações de uma companhia aérea, quantas opções de trajetórias irão possibilitar que a companhia aérea reduza os riscos de ter um maior atraso nos voos capturados pelo CTOP. A Figura 6.6 apresenta a visão geral do SG-CTOP.

Analisando a Figura 6.6, foram definidos 8 passos primordiais para o processo de tomada de decisão de uma companhia aérea, neste caso a *CompanhiaAéreaA* foi definida como a companhia que fará uso do RG-CTOP.

1. Estimar último jogo: Após a primeira rodada, estimar qual foi o resultado do último jogo, considerando que existia uma estimativa inicial comparado com o resultado final conhecido.
2. Definir casos e estratégias: Baseado na proporção real de voos em que cada companhia aérea pode ter dentro do CTOP, foram definidos alguns possíveis casos e as estratégias mais usuais pelas companhias aéreas atualmente.
3. Construir a matriz de estimativas: O modelo possui na sua base uma matriz que relaciona todos os possíveis casos e estratégias para encontrar qual estratégia terá maior possibilidade de alcançar um menor atraso para uma determinada demanda do CTOP.
4. Estimar menor risco de atraso para cada voo: A função *payoff* do SG-CTOP irá retratar este relacionamento e normalizar os valores, a fim de buscar sempre o melhor resultado possível.
5. Definir a quantidade de trajetórias no TOS: Enviar a sugestão final, ao gestor de operações da companhia aérea, de quantas opções de trajetórias devem ser enviadas naquele CTOP.
6. Verificar histórico do concorrente: Analisar os últimos jogos, para verificar uma possível alteração de estratégia do concorrente. Esta análise é dada ao se comparar o estimado pela *CompanhiaAéreaA* com o atraso global associado pela FAA à companhia.
7. Analisar possíveis ajustes: Verificar se o histórico que foi estimado tem alta probabilidade para alterar, ou não, a sugestão de saída do SG-CTOP.

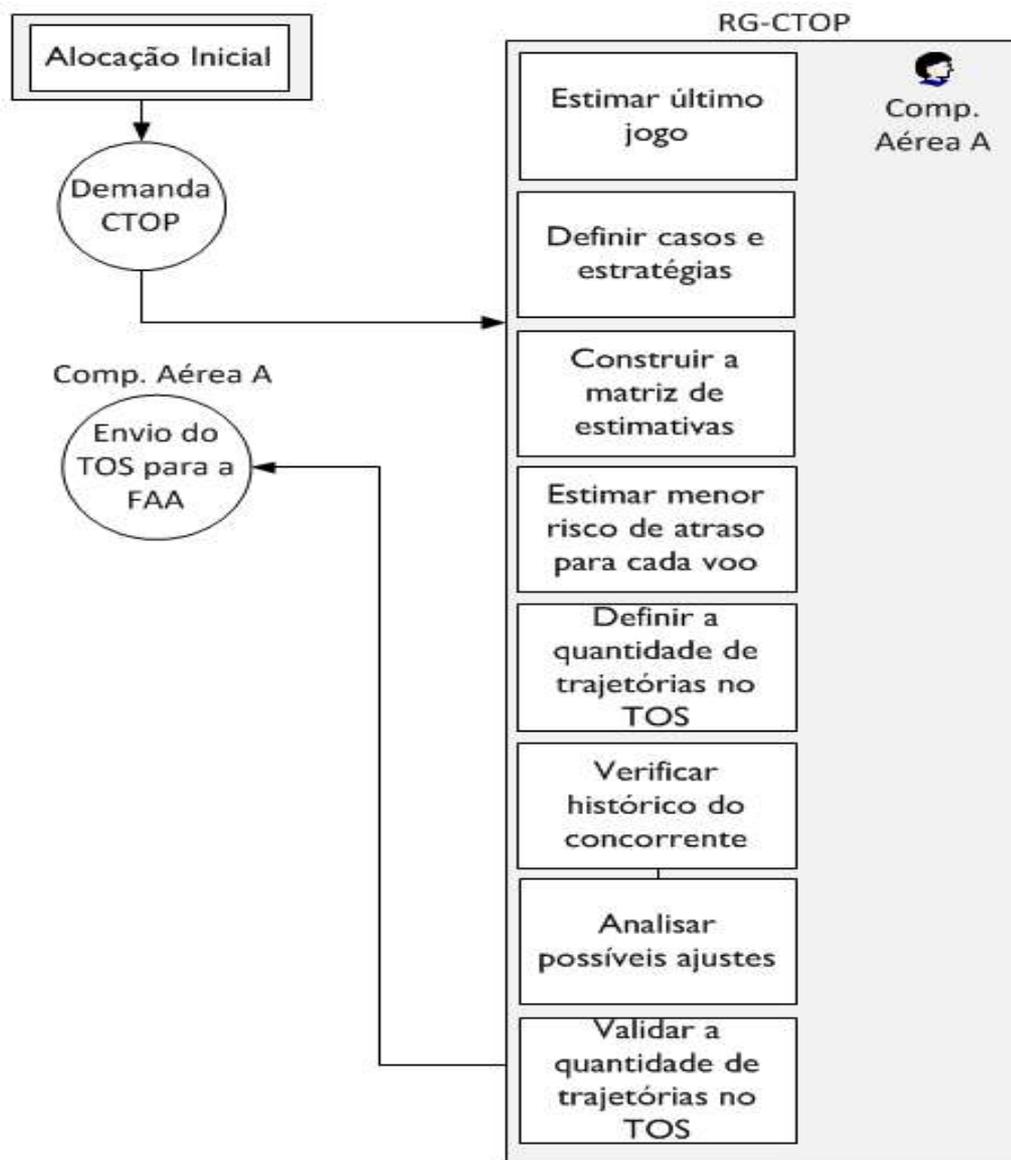


Figura 6.6: *Repeated Games for CTOP*

8. Validar a quantidade de trajetórias no TOS: Conforme a análise do histórico, alterar a sugestão, com o RG-CTOP, ou manter o que foi identificado.

Para o desenvolvimento do RG-CTOP, algumas premissas foram assumidas:

- O jogo terá dois jogadores denominados como *CompanhiaAéreaA* e *CompanhiaAéreaB*. A *CompanhiaAéreaA* foi escolhida como o jogador principal, e a *CompanhiaAéreaB* como o concorrente.
- Foram definidas duas FCA's para cada CTOP.
- Cada jogador possui três movimentos para o jogo:
 1. Enviar *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.
 2. Enviar duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
 3. Enviar três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
- O jogo desenvolvido é não-cooperativo, não-repetitivo e com informação incompleta.

6.2.1 Casos e Cenários de Jogo

Considerando a proporção de voos que cada um dos jogadores possui dentro do conjunto de voos capturados no CTOP, foram definidos cinco possíveis casos:

1. A *CompanhiaAéreaA* possui 50% e a *CompanhiaAéreaB* possui 50% dos voos capturados no CTOP.
2. A *CompanhiaAéreaA* possui 67% e a *CompanhiaAéreaB* possui 33% dos voos capturados no CTOP.
3. A *CompanhiaAéreaA* possui 33% e a *CompanhiaAéreaB* possui 67% dos voos capturados no CTOP.
4. A *CompanhiaAéreaA* possui 75% e a *CompanhiaAéreaB* possui 25% dos voos capturados no CTOP.
5. A *CompanhiaAéreaA* possui 25% e a *CompanhiaAéreaB* possui 75% dos voos capturados no CTOP.

Para cada um dos cinco casos, existiam três cenários considerando a ordem da fila de associação de *slots* utilizada pela FAA. A Figura 6.7 apresenta a relação de casos e estratégias.

1. Caso 50% - 50%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

2. Caso 67% - 33%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

3. Caso 33% - 67%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaA*.

4. Caso 75% - 25%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda

metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

5. Caso 25% - 75%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaA*.

Quanto ao modelo de jogo do RG-CTOP e matriz de estimativas, é importante ressaltar que o SG-CTOP sempre realizará esta primeira previsão, assim sendo, continua valendo o que foi apresentado na Figura 6.3, 6.4 e 6.5.

6.2.2 Função de Payoff e dos Agentes

A função de *payoff* do jogo realiza alguns cálculos, a fim de informar ao jogador o quão melhor será uma decisão em detrimento da outra. O RG-CTOP irá considerar o resultado da função *SGPayoff*, uma vez que este passo inicial, de análise de estimativas e riscos, é feito somente pelo SG-CTOP.

Cada agente possui sua função de avaliação, a fim de verificar o quão boa é uma decisão em detrimento da outra. As Equações 6.8, 6.9 e 6.10 apresentam a função de avaliação do *Agente Detetive*.

$$DR(C, S, M) = dy \quad (6.8)$$

$$J(C, TS) = \frac{\sum_{K_1 \rightarrow TS} [\sum_{M_0 \rightarrow 2} DR(C, K, M)]}{(DR(C, S, \alpha) - DR(C, S, \chi))} \quad (6.9)$$

		Casos				
		A 50% B 50%	A 67% B 33%	A 33% B 67%	A 75% B 25%	A 25% B 75%
Cenários	1	(25 75)	(33 67)	(67 33)	(50 50)	(50 50)
	2	(75 25)	(100 0)	(0 100)	(100 0)	(0 50)
	1	(50 50)	(67 33)	(33 67)	(75 25)	(25 75)
2	(50 50)	(67 33)	(33 67)	(75 25)	(25 75)	
1	(75 25)	(100 0)	(0 100)	(100 0)	(0 100)	
2	(25 75)	(33 67)	(67 33)	(50 50)	(50 50)	

Figura 6.7: Casos e cenários no RG-CTOP

$$\text{AgenteDetetive} = \frac{\sum_{C_1 \rightarrow TC} [J(C,TS)]}{\sum_{K_1 \rightarrow TS} [\sum_{M_0 \rightarrow 2} DR(C,K,M)]} \quad (6.10)$$

$$\begin{cases} \text{AgenteDetetive} \leq -3, \text{AgenteDetetive} = 0 \\ -2 \leq \text{AgenteDetetive} < 2, \text{AgenteDetetive} = 2 \\ 2 \leq \text{AgenteDetetive} < 5, \text{AgenteDetetive} = 3 \\ \text{AgenteDetetive} \geq 5, \text{AgenteDetetive} = 1 \end{cases}$$

Onde:

- *AgenteDetetive*: Estimativa de qual foi o caso e estratégia que ocorreu na última rodada.
- $J(C,TS)$ = Atraso médio estimado por caso, considerando os seus possíveis cenários e movimentos do último jogo.
- $DR(C,S,M)$ = atraso real do último jogo, em minutos, dado por dy , para a *CompanhiaAéreaA*, para cada caso (C); cenário (S) e movimento da companhia (M), quando a *CompanhiaAéreaB* enviou seu movimento igual a 0 (*NOSLOT*). O movimento da *CompanhiaAéreaA* é dado por: 0 (*NOSLOT*), 1 (1 trajetória + *NOSLOT*) e 2 (2 trajetórias + *NOSLOT*). O α representa o movimento 0, β representa o movimento 1 e χ representa o movimento 2.
- TC = Total de casos no último jogo, o qual é definido neste modelo igual a 5: caso 1 (A=50%,B=50%), caso 2 (A=67%,B=33%), caso 3 (A=33%,B=67%), caso 4 (A=75%,B=25%) e caso 5 (A=25%,B=75%).

- TS = Total de cenários no último jogo, o qual é definido neste modelo como 3 por cada caso, como representado na Figura 6.7.

As Equações 6.11 e 6.12 apresentam a função de avaliação do *Agente Aprendiz*.

$$P(C, K, M) = \frac{\sum_{K_{\alpha \rightarrow \beta}} [\sum_{M_{0 \rightarrow 2}} DR(C, K, M)]}{DR(C, K, M)} \quad (6.11)$$

$$\text{AgenteAprendiz} = P(C, K, M) * (DR(C, \delta, \alpha) / DR(C, \epsilon, \chi)) \quad (6.12)$$

$$\begin{cases} \text{AgenteAprendiz} < 0, \text{AgenteAprendiz} = 0 \\ 0 \leq \text{AgenteAprendiz} < 2, \text{AgenteAprendiz} = 1 \\ \text{AgenteAprendiz} \geq 2, \text{AgenteAprendiz} = 2 \end{cases}$$

Onde:

- *AgenteAprendiz*: Estimativa dos resultados das últimas 5 estratégias da *CompanhiaAéreaB*.
- $P(C, K, M)$ = Atraso médio estimado por caso das últimas 5 jogadas, considerando os movimentos da *CompanhiaAéreaA* para cada caso. Como serão contadas as últimas 5, o K varia com o δ valendo – 1 até ϵ valendo – 5. $O\alpha$ representa o movimento 0, β representa o movimento 1 e χ representa o movimento 2.

Assim, a função de *payoff* do RG-CTOP será dado pela Equação 6.13.

$$RG_{Payoff} = SG_{Payoff} + (\text{AgenteDetetive} * \text{AgenteAprendiz}) \quad (6.13)$$

$$\begin{cases} RG_{Payoff} \leq 0, \text{GM} = 2 \text{ Trajetórias} + \text{NOSLOT} \\ RG_{Payoff} > 0, \text{GM} = 1 \text{ Trajetória} + \text{NOSLOT} \end{cases}$$

Onde:

- RG_{Payoff} = Representa o valor de *payoff* do RG-CTOP, pelo envio do movimento de jogo (GM). Quando o valor de RG_{Payoff} for maior que 0, será sugerido o envio de 1 opção de trajetória + *NOSLOT*. No caso em que o valor de RG_{Payoff} for menor ou igual a 0, será sugerido o envio de 2 opções de trajetórias + *NOSLOT*.
- *AgenteAprendiz* = Representa o valor de *payoff* do *AgenteAprendiz*.
- *AgenteDetetive* = Representa o valor de *payoff* do *AgenteDetetive*.
- SG_{Payoff} = Representa o valor de *payoff* do SG-CTOP, pelo envio do movimento de jogo (GM). Quando o valor de SG_{Payoff} for maior que 0, será sugerido o envio de 1 opção de trajetória + *NOSLOT*. No caso em que o valor de SG_{Payoff} for menor ou igual a 0, será sugerido o envio de 2 opções de trajetórias + *NOSLOT*.

É válido lembrar, que assim como o SG-CTOP, não será sugerido o envio de *NOSLOT* pelo RG-CTOP devido ao alto custo, caso a estratégia não funcione para a demanda em particular.

Capítulo 7

Arquitetura e Implementação

O capítulo irá apresentar o detalhamento da arquitetura computacional utilizada no desenvolvimento dos dois modelos inteligentes, *Single Games for CTOP* e *Repeated Games for CTOP*.

7.1 Definições Iniciais

Algumas definições básicas se fazem pertinentes de serem informadas por ser comum para ambos os modelos computacionais. Uma das premissas iniciais é que as aplicações fossem desenvolvidas utilizando linguagens e tecnologias *open source*.

Para o desenvolvimento de ambos os *software* foi utilizado a linguagem *Personal Home Page* (PHP) e, para alguns códigos, houve a necessidade da utilização da linguagem *C* para alcançar um melhor desempenho computacional.

Para o armazenamento das informações, foi utilizado a tecnologia de banco de dados *My Structured Query Language* (MySQL).

Os modelos computacionais foram projetados para terem uma saída única, sendo a sugestão de quantas opções de trajetórias devem ser enviadas para uma determinada demanda CTOP; e como entrada é utilizado um banco de informações de voos, os quais entram em um processo de sorteio de diversos dados para gerar demandas diferentes a cada rodada.

7.2 SG-CTOP

O *Single Games for CTOP* possui uma arquitetura baseada em Teoria dos Jogos, a qual é apresentada na Figura 7.1.

O fluxo de informações apresentado na Figura 7.1 é explicado a seguir.

- Sorteio do horário CTOP, no qual é definido para cada demanda CTOP um período de forma aleatória.
- Sorteio da FCA, no qual é definido quais as FCA's serão utilizadas naquela demanda CTOP.

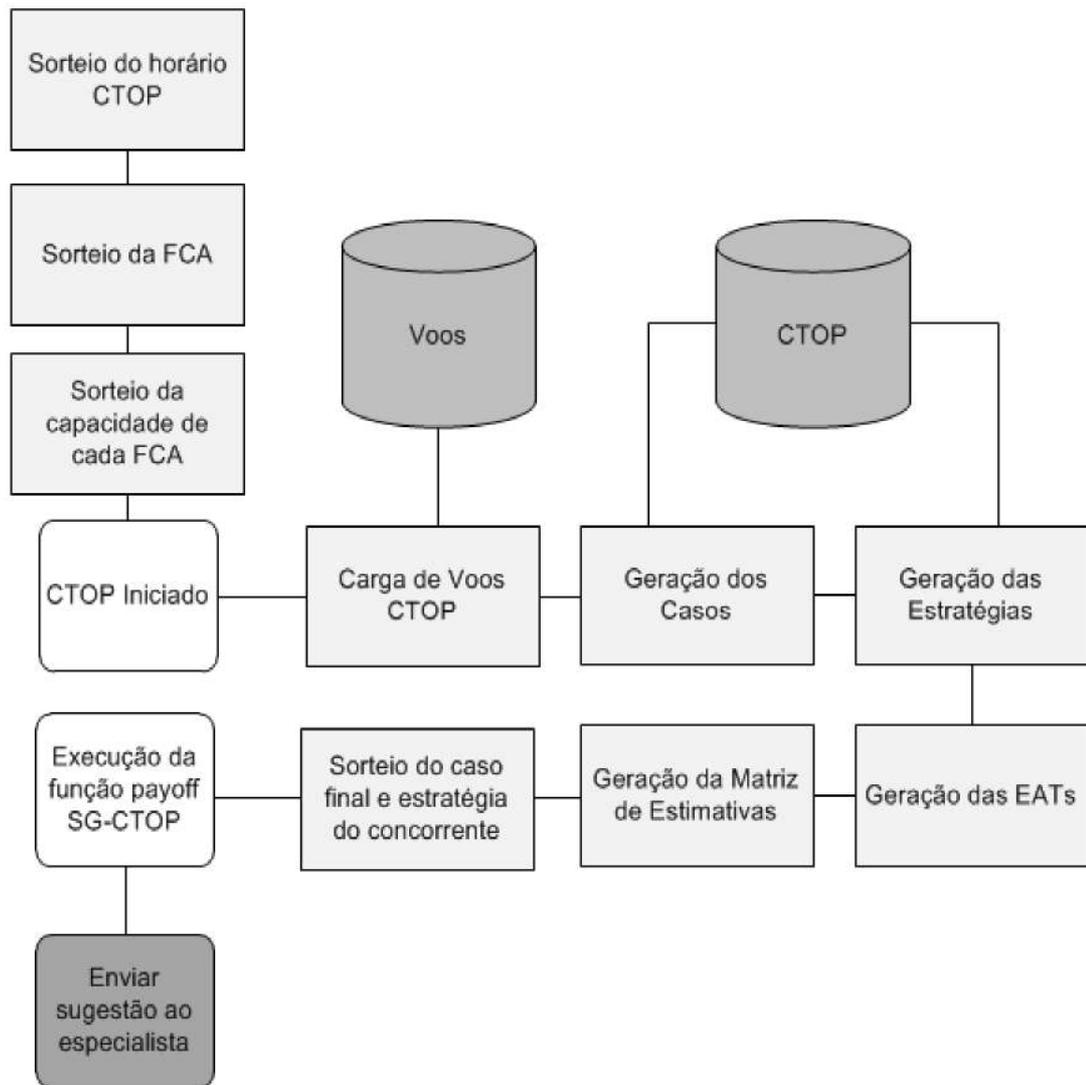


Figura 7.1: Arquitetura do SG-CTOP

- Sorteio da capacidade de cada FCA, na qual é definida quantas aeronaves poderão voar por cada FCA em uma janela de tempo. Esta janela é definida, pela FAA, em 15 minutos.
- O CTOP, com todas as informações acima, é iniciado e cada companhia aérea tem conhecimento dos seus voos capturados.
- Conforme os dados iniciais do CTOP, é feita uma carga de dados dos voos que estão armazenados no banco de dados *Voos*.
- Conforme o modelo apresentado, são definidos os casos e cenários para cada rodada e armazenados no banco de dados *CTOP*.
- As estratégias que serão utilizadas naquele jogo são definidas para ambos os jogadores e armazenadas no banco de dados *CTOP*.

- Para cada voo, de ambos os jogadores, é estimado o valor de entrada mínimo de entrada (EAT) em cada FCA.
- A matriz de estimativas é gerada considerando somente as informações que o jogador principal tem acesso no momento do início da demanda CTOP.
- Como o modelo precisa fazer uma simulação, uma vez que não existe outro jogador real, é sorteado, aleatoriamente, um caso final para o jogo e a estratégia que o oponente teria jogado naquela rodada.
- É executada a função *payoff* do SG-CTOP, a fim de se chegar a sugestão final do modelo.
- A sugestão final é apresentada ao especialista.

A Figura 7.2 apresenta uma tela do SG-CTOP, na qual é apresentado um conjunto de jogos. É possível verificar em destaque o jogo 2, no qual o CTOP possuía 2 horas de duração, existiam 5 casos e 7 cenários para cada caso, e o resultado final do jogo foi dado pelo caso 2 no cenário 1 quando a *CompanhiaAéreaA* enviou 2 trajetórias + NOSLOT e a *CompanhiaAéreaB* enviou NOSLOT.

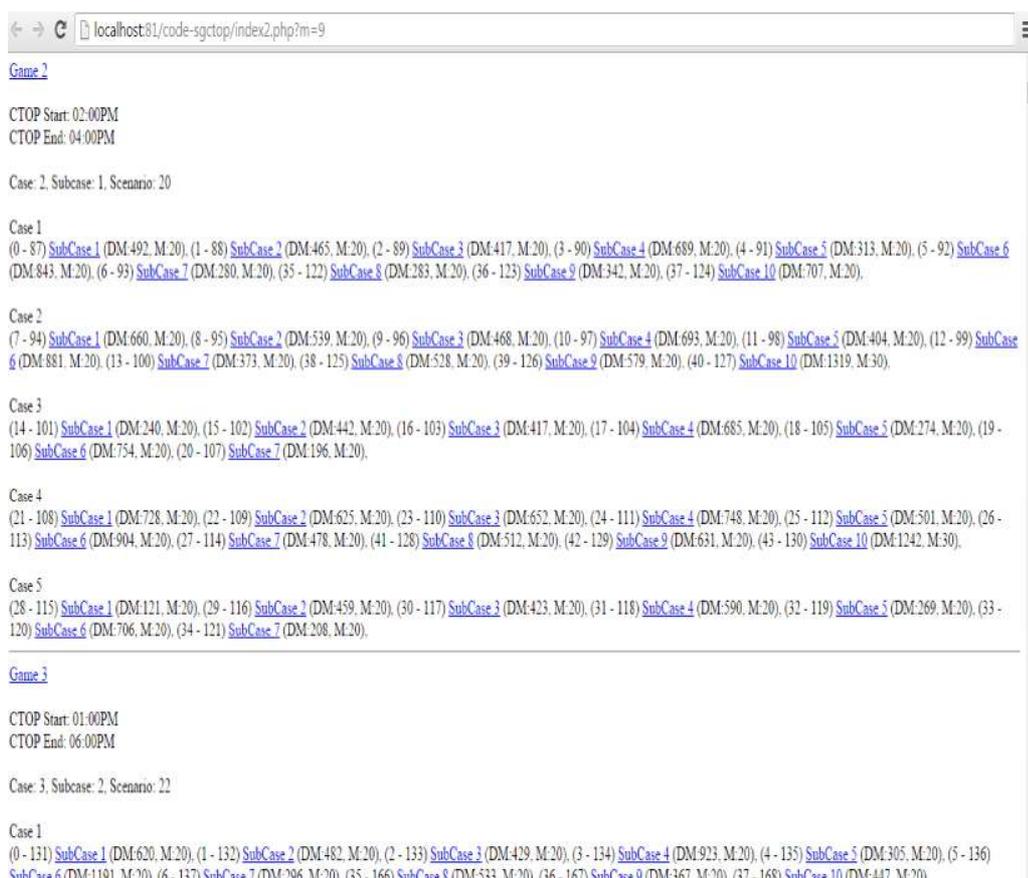


Figura 7.2: Tela do conjunto de jogadas no SG-CTOP

A Figura 7.3 apresenta uma tela do SG-CTOP, na qual são apresentados os atrasos globais da rodada para cada jogador. É possível verificar que neste caso

o resultado final se deu pela jogada 11, ou seja, ambas as companhias aéreas enviaram 1 trajetória + NOSLOT.

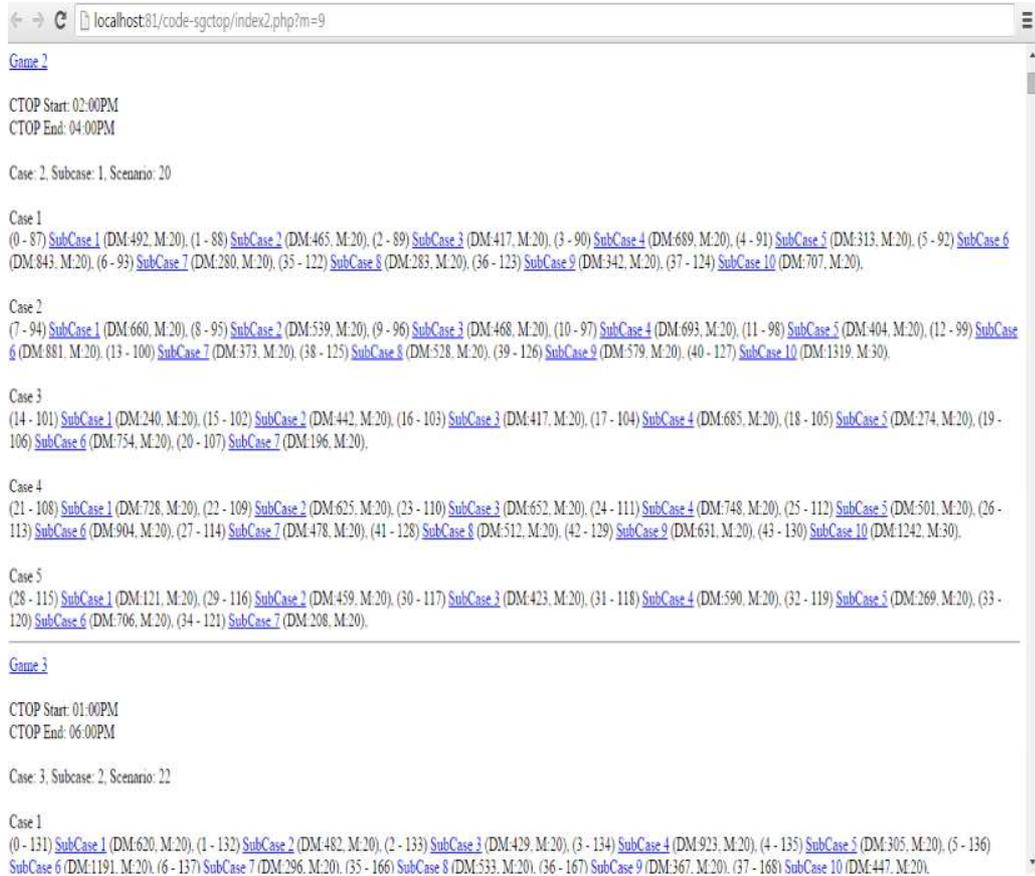


Figura 7.3: Tela individual da jogada no SG-CTOP

7.3 RG-CTOP

O *Repeated Games for CTOP* possui uma arquitetura baseada em Teoria dos Jogos; Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço, a qual é apresentada na Figura 7.4.

O fluxo de informações apresentado na Figura 7.4 é explicado a seguir.

- É realizado uma estimativa de qual foi o resultado do último jogo, uma vez que ao final do jogo cada companhia aérea somente tem informações sobre seus voos.
- Sorteio do horário CTOP, no qual é definido para cada demanda CTOP um período de forma aleatória.
- Sorteio da FCA, no qual é definido quais as FCA's serão utilizadas naquela demanda CTOP.

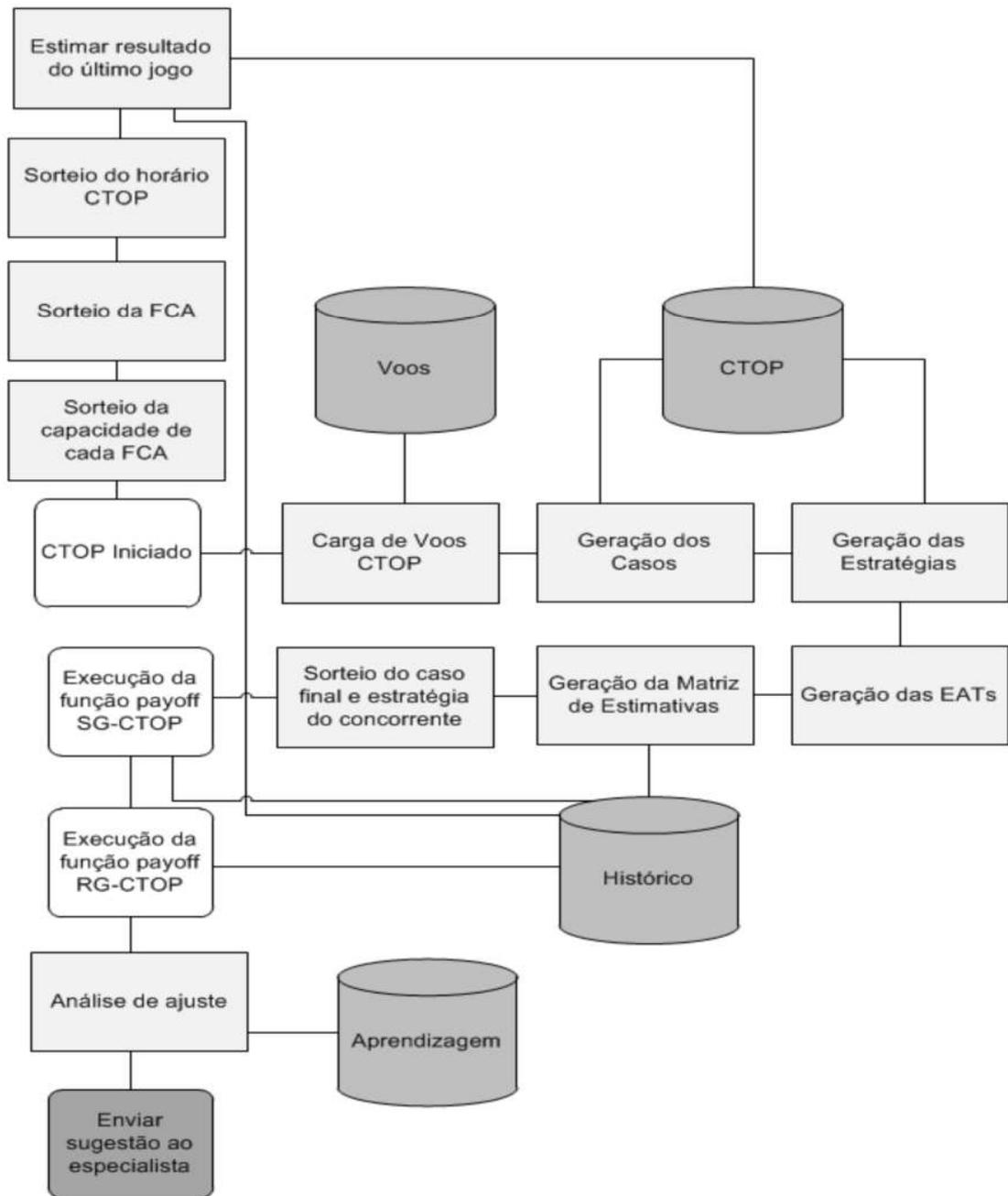


Figura 7.4: Arquitetura do RG-CTOP

- Sorteio da capacidade de cada FCA, na qual é definida quantas aeronaves poderão voar por cada FCA em uma janela de tempo. Esta janela é definida, pela FAA, em 15 minutos.
- O CTOP, com todas as informações acima, é iniciado e cada companhia aérea tem conhecimento dos seus voos capturados.
- Conforme os dados iniciais do CTOP, é feita uma carga de dados dos voos que estão armazenados no banco de dados *Voos*.
- Conforme o modelo apresentado, são definidos os casos e cenários para cada rodada e armazenados no banco de dados *CTOP*.
- As estratégias que serão utilizadas naquele jogo são definidas para ambos os jogadores e armazenadas no banco de dados *CTOP*.
- Para cada voo, de ambos os jogadores, é estimado o valor de entrada mínimo de entrada (EAT) em cada FCA.
- A matriz de estimativas é gerada considerando somente as informações que o jogador principal tem acesso no momento do início da demanda CTOP e armazenada no banco de dados *Histórico*.
- Como o modelo precisa fazer uma simulação, uma vez que não existe outro jogador real, é sorteado, aleatoriamente, um caso final para o jogo e a estratégia que o oponente teria jogado naquela rodada.
- É executada a função *payoff* do SG-CTOP, a fim de se chegar a sugestão final do modelo e armazenado no banco de dados *Histórico*.
- É executada a função *payoff* do RG-CTOP, a fim de se chegar a sugestão final do modelo e armazenado no banco de dados *Histórico*.
- É realizada uma análise final de ajuste para verificar se a sugestão do SG-CTOP será alterada ou não.
- A sugestão final é apresentada ao especialista.

A Figura 7.5 apresenta a arquitetura dos agentes utilizados no RG-CTOP. É possível verificar os quatro agentes:

- *Agente Detetive*: Agente responsável por estimar o ambiente do último jogo.
- *Agente Aprendiz*: Agente responsável por verificar os últimos ambientes e ações acontecidos, assim como seus resultados para verificar uma possível mudança de estratégia do concorrente.

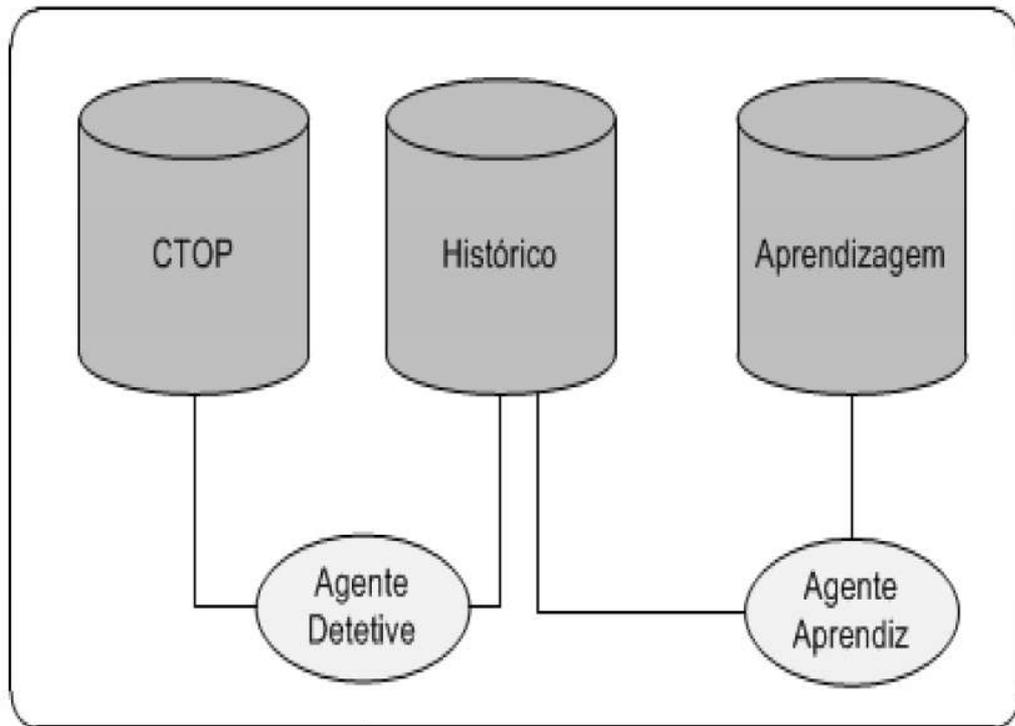


Figura 7.5: Arquitetura dos agentes no RG-CTOP

A seguir serão apresentadas algumas telas do RG-CTOP. A Figura 7.6 apresenta a visão geral de um estudo de caso, o qual possui 5 casos e 7 cenários para cada um deles.

A Figura 7.7 apresenta a execução dos *scripts* de sorteio de voos para cada caso a ser gerado.

A Figura 7.8 apresenta os *slots* disponíveis por cada FCA, é possível verificar que na FCA1 a capacidade era de 3 aeronaves a cada 15 minutos e na FCA2 de 5 aeronaves.

A Figura 7.9 apresenta parte dos voos capturados da *CompanhiaAéreaB*, incluindo a EAT de cada FCA.

A Figura 7.10 apresenta o preenchimento da primeira jogada com o resultado global de atraso, em minutos após uma demanda CTOP, dentro do modelo, combinando cada caso e seu cenário com as jogadas quem ambas as companhias aéreas poderiam tomar. A Figura 7.11 apresenta as mesmas informações após a última rodada.

A Figura 7.12 apresenta para cada *slot* disponível, por FCA, o voo que foi alocado.



Figura 7.6: Tela de visão geral de um estudo de caso no RG-CTOP

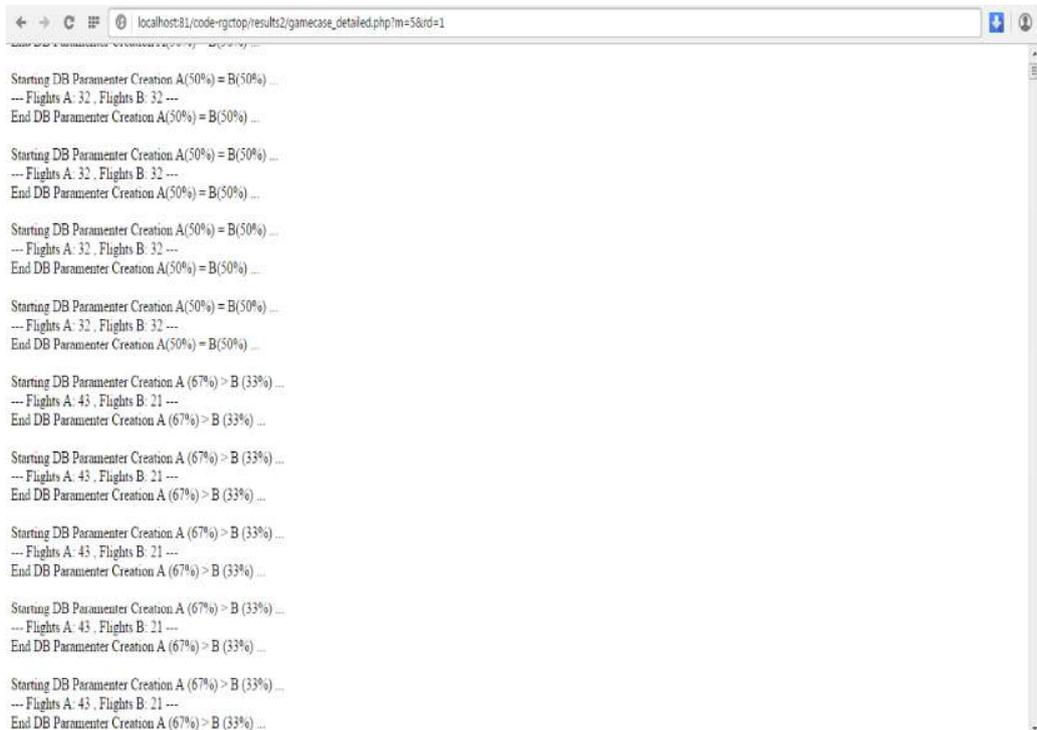


Figura 7.7: Tela de sorteio dos voos no RG-CTOP

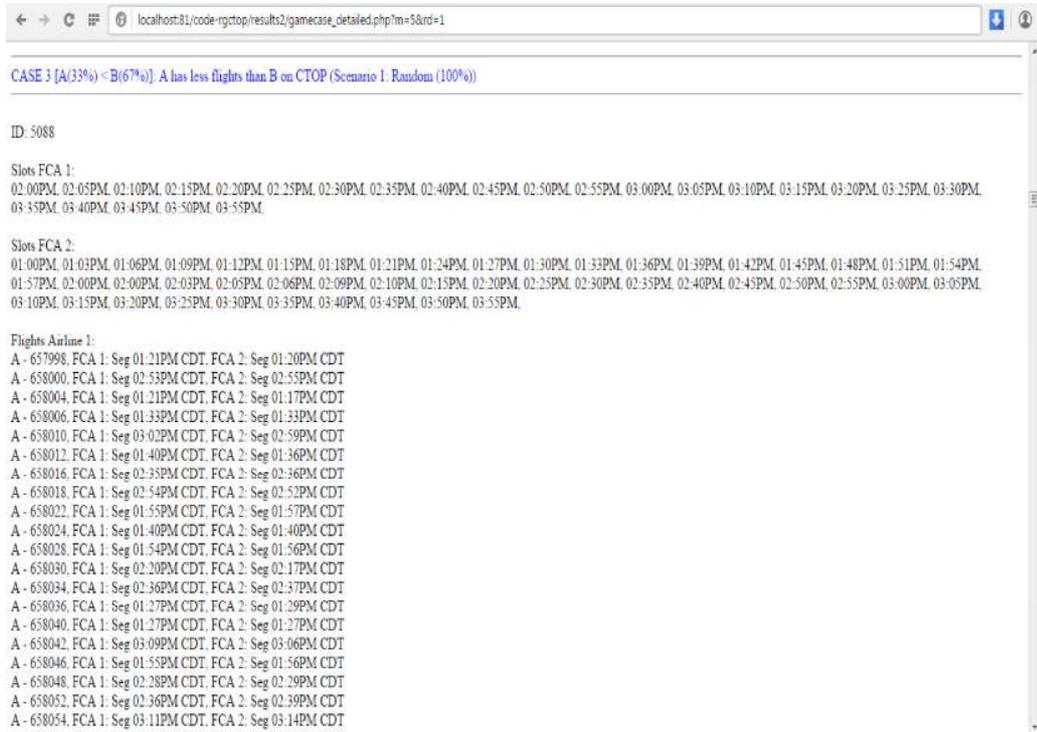


Figura 7.8: Telas com slots disponíveis por FCA no RG-CTOP

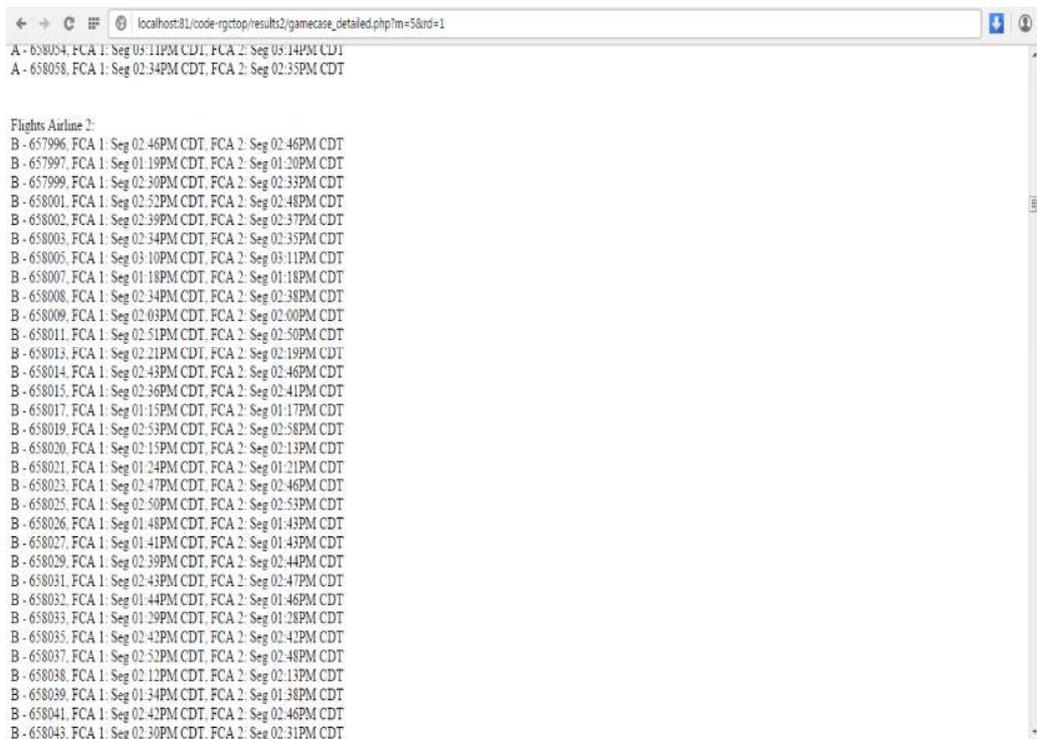


Figura 7.9: Tela com as EAT's de cada voo no RG-CTOP

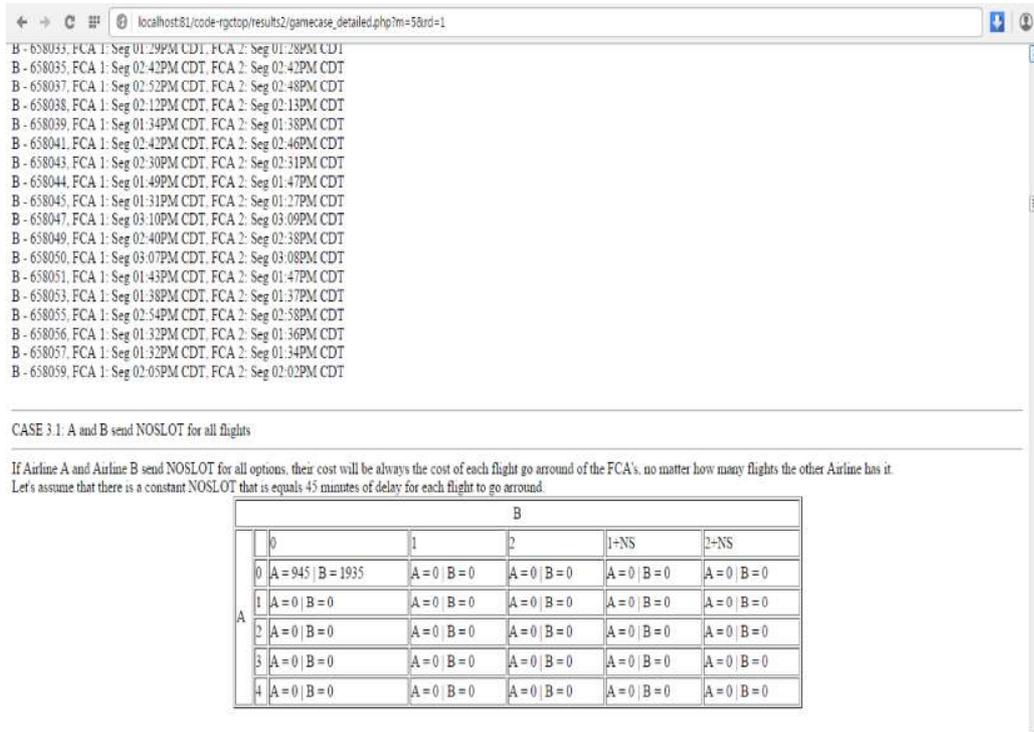


Figura 7.10: Telas RG-CTOP

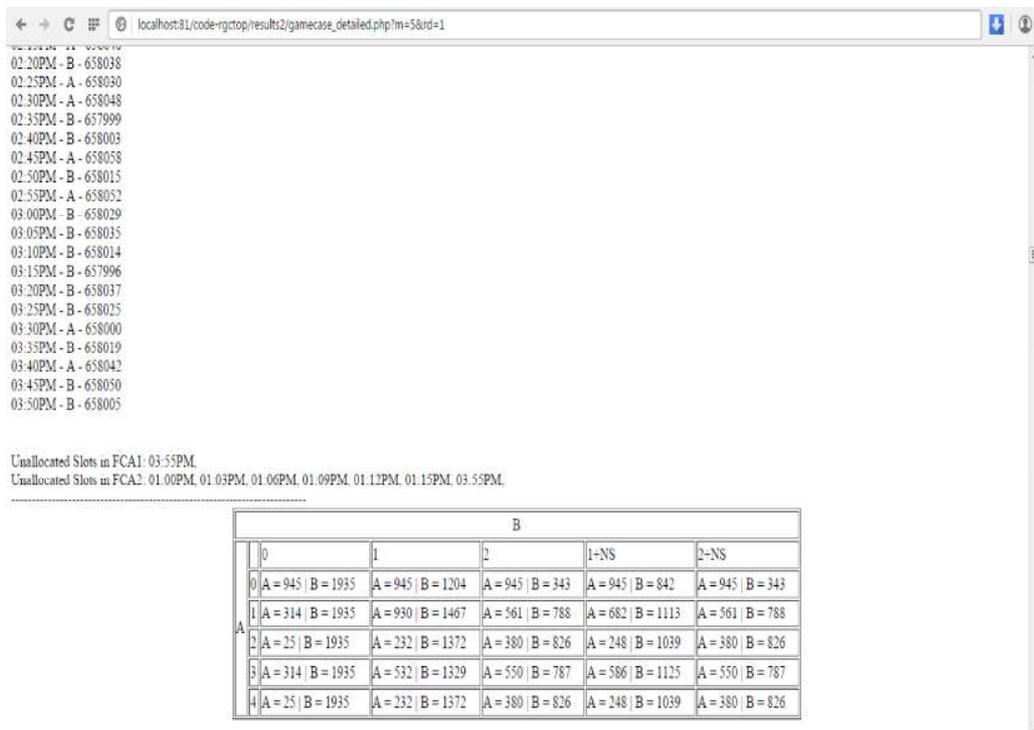


Figura 7.11: Telas RG-CTOP

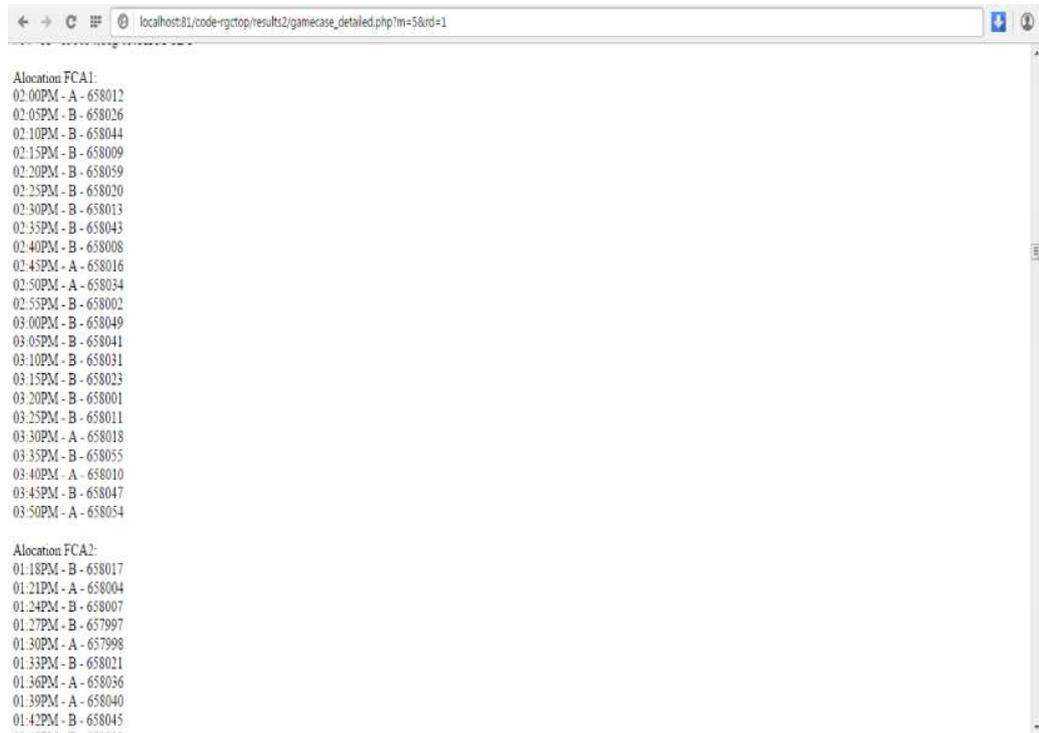


Figura 7.12: Telas RG-CTOP

7.4 Bancos de Dados

O modelo entidade-relacionamento resumido do banco de dados de *Voos*, é apresentado na Figura 7.13. Este banco de dados possui a base necessária para a utilização como entrada, assim como outras informações que servem como parâmetros para as análises.

A Figura 7.14 apresenta o modelo entidade-relacionamento resumido do banco de dados de *CTOP*. Este banco de dados é responsável por armazenar as informações internas de cada estudo de caso, algumas informações históricas são transferidas para o banco de dados *Histórico*.

training2_tafturbulence taforecastid VARCHAR(255) intensity VARCHAR(255) minimumaltitudefeet VARCHAR(255) maximumaltitudefeet VARCHAR(255)	training2_tafsky taforecastid VARCHAR(255) cloudbasefeet VARCHAR(255) cloudtype VARCHAR(255) cloudcover VARCHAR(255)	training2_taficing taforecastid VARCHAR(255) intensity VARCHAR(255) minimumaltitudefeet VARCHAR(255) maximumaltitudefeet VARCHAR(255)	training2_fdwindair... fbwindairportid VARCHAR(255) fbwindreportid VARCHAR(255) airportcode VARCHAR(255)	training2_fdwind fbwindairportid VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) bearing VARCHAR(255) knots VARCHAR(255) temperature VARCHAR(255)
training2_taftemperature taforecastid VARCHAR(255) validtimeutc VARCHAR(255) mintemperaturecelcius VARCHAR(255) maxtemperaturecelcius VARCHAR(255) surfacetemperaturecelcius VARCHAR(255)	training2_flighthistoryevents id VARCHAR(255) flighthistory_id VARCHAR(255) date_time_recorded VARCHAR(255) event VARCHAR(255) data_updated VARCHAR(255)	training2_metar_presentconditions id VARCHAR(255) metar_reports_id VARCHAR(255) present_condition VARCHAR(255)	training2_asdiposition id VARCHAR(255) received VARCHAR(255) callsign VARCHAR(255) altitude VARCHAR(255) ground_speed VARCHAR(255) latitude_degrees VARCHAR(255) longitude_degrees VARCHAR(255) flighthistory_id VARCHAR(255)	training2_taf tafid VARCHAR(255) station VARCHAR(255) airport VARCHAR(255) rawtext VARCHAR(255) latitude VARCHAR(255) longitude VARCHAR(255) elevationmeters VARCHAR(255) remarks VARCHAR(255) bulletintimeutc VARCHAR(255) issueutc VARCHAR(255) validtimefromutc VARCHAR(255) validtimetoutc VARCHAR(255)
training2_tafforecast taforecastid VARCHAR(255) tafid VARCHAR(255) altimeter VARCHAR(255) changeindicator VARCHAR(255) forecasttimefromutc VARCHAR(255) forecasttimetoutc VARCHAR(255) probability VARCHAR(255) timebecomingutc VARCHAR(255) verticalvisibility VARCHAR(255) visibilitystatutemiles VARCHAR(255) windspeedknots VARCHAR(255) winddirectiondegrees VARCHAR(255) windgustspeedknots VARCHAR(255) windsheardirectiondegrees VARCHAR(255) windshearheightfeet VARCHAR(255) windshearspeedknots VARCHAR(255) weatherstring VARCHAR(255) notdecoded VARCHAR(255)	training2_airsignet airsignetid VARCHAR(255) timevalidfromutc VARCHAR(255) timevalidtoutc VARCHAR(255) movementdirdegrees VARCHAR(255) movementspeedknots VARCHAR(255) hazardtype VARCHAR(255) hazardseverity VARCHAR(255) airsignettype VARCHAR(255) altitudeminft VARCHAR(255) altitudemaxft VARCHAR(255) rawtext VARCHAR(255)	training2_metar_runwaygroups approach_direction VARCHAR(255) id VARCHAR(255) is_varying VARCHAR(255) max_prefix VARCHAR(255) max_visible VARCHAR(255) metar_reports_id VARCHAR(255) min_prefix VARCHAR(255) min_visible VARCHAR(255) runway VARCHAR(255)	training2_fldwindaltitude fbwindreportid VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) altitude VARCHAR(255)	training2_fldwindreport fbwindreportid VARCHAR(255) createdutc VARCHAR(255) reporttype1 VARCHAR(255) reporttype2 VARCHAR(255) reporttype3 VARCHAR(255) generated VARCHAR(255) basedon VARCHAR(255) valid VARCHAR(255) forusestart VARCHAR(255) foruseend VARCHAR(255) negativeabove VARCHAR(255) altitudescale VARCHAR(255) altitudeunits VARCHAR(255)
training2_asdifpsector id VARCHAR(255) asdiflightplan_id VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) sector VARCHAR(255)	training2_metar_reports altimeter VARCHAR(255) date_time_issued VARCHAR(255) dewpoint VARCHAR(255) is_visibility_less_than VARCHAR(255) is_wind_direction_variable VARCHAR(255) id VARCHAR(255) original_report VARCHAR(255) remark VARCHAR(255) report_modifier VARCHAR(255) sea_level_pressure VARCHAR(255) station_type VARCHAR(255) temperature VARCHAR(255) variable_wind_direction VARCHAR(255) visibility VARCHAR(255) weather_station_code VARCHAR(255) wind_direction VARCHAR(255) wind_gusts VARCHAR(255) wind_speed VARCHAR(255)	training2_metar_skyconditions id VARCHAR(255) metar_reports_id VARCHAR(255) sky_condition VARCHAR(255)	training2_asdifcenter id VARCHAR(255) asdiflightplan_id VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) center VARCHAR(255)	training2_asdifpfix id VARCHAR(255) asdiflightplan_id VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) fix VARCHAR(255)
	training2_asdifpwaypoint id VARCHAR(255) asdiflightplan_id VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) latitude VARCHAR(255) longitude VARCHAR(255)	training2_asdiarway id VARCHAR(255) asdiflightplan_id VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255) airway VARCHAR(255)	training2_airsignetarea airsignetid VARCHAR(255) latitude VARCHAR(255) longitude VARCHAR(255) ordinal VARCHAR(255)	

Figura 7.13: MER do banco de dados Voo

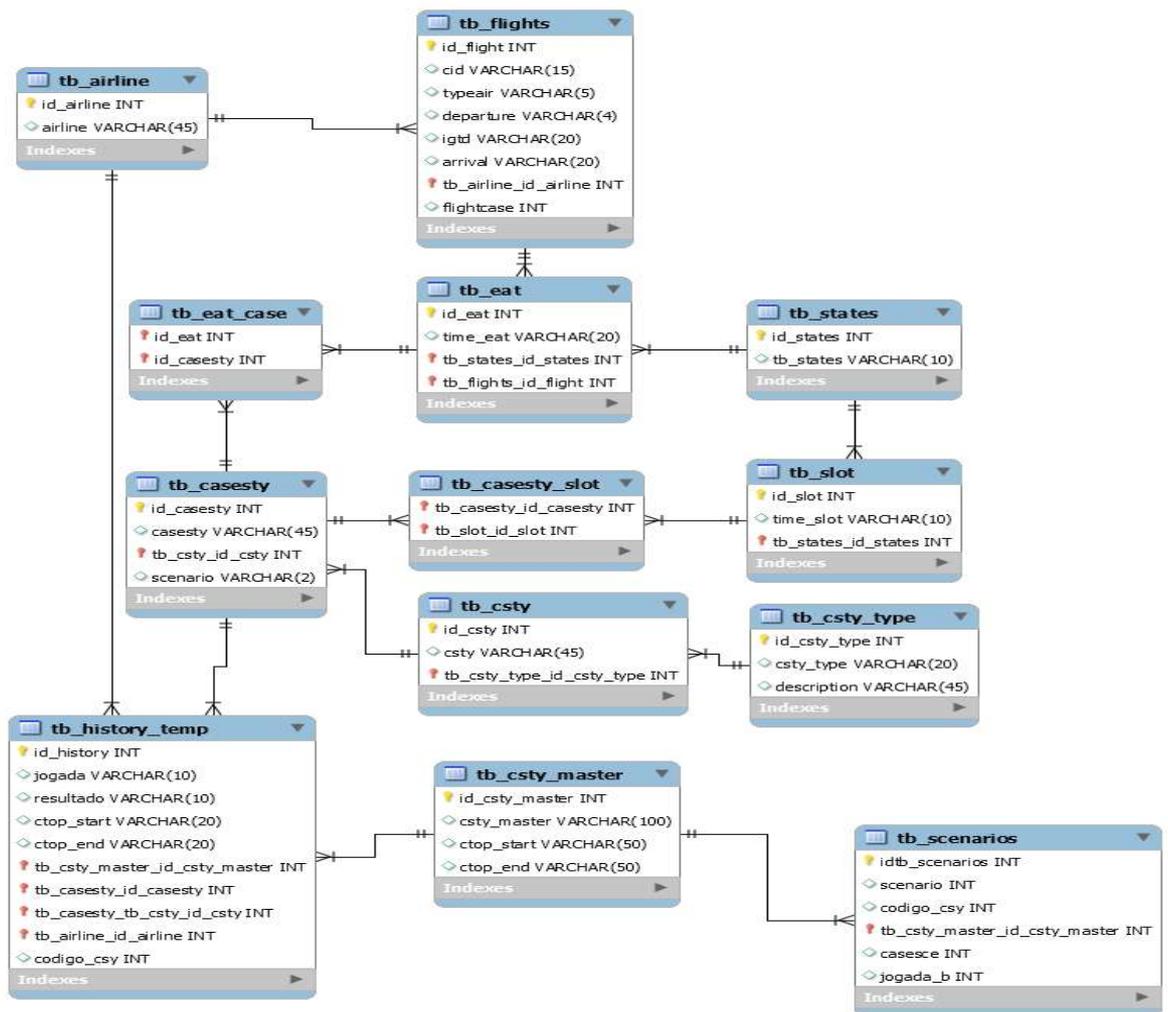


Figura 7.14: MER do banco de dados *CTOP*

Capítulo 8

Estudo de Caso

O capítulo irá apresentar dois estudos de caso desenvolvidos para verificar os modelos apresentados e validar os resultados da pesquisa para o *Single Games for CTOP* e *Repeated Games for CTOP*.

8.1 Planejamento

Levando em consideração que as negociações no âmbito do CTOP ocorrem com alta frequência no cenário aéreo dos EUA e os conceitos apresentados até o momento, qual seria a melhor decisão para a *CompanhiaAéreaA* jogar na primeira rodada do jogo, e como seria possível melhorar os resultados alcançados com o aprendizado de como o jogo e seus jogadores se comportam com o tempo.

Assim, foram definidos dois estudos de caso, o primeiro para validar o modelo SG-CTOP, quanto a questão do primeiro jogo; e o segundo para validar o modelo RG-CTOP, quanto as negociações a partir da primeira rodada.

Para ambos os estudos de caso, foram assumidas algumas premissas que serão apresentadas a seguir. Dentre os possíveis cenários, para simplificação, será assumido que existem duas companhias aéreas disputando os *slots* disponíveis em duas FCA's, englobando os seguintes casos:

- A *CompanhiaAéreaA* possui mais voos capturados do que a *CompanhiaAéreaB* no CTOP. Foram definidos dois casos: 67% dos voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% da *CompanhiaAéreaB* ou 75% dos voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% da *CompanhiaAéreaB*.
- A *CompanhiaAéreaA* possui menos voos capturados do que a *CompanhiaAéreaB* no CTOP. Foram definidos dois casos: 67% dos voos da *CompanhiaAéreaB* e 33% da *CompanhiaAéreaA* ou 75% dos voos da *CompanhiaAéreaB* e 25% da *CompanhiaAéreaA*.
- A *CompanhiaAéreaA* possui a mesma quantidade de voos capturados do que a *CompanhiaAéreaB* no CTOP, sendo 50% dos voos de cada uma das duas companhias aéreas.

Apesar de a estratégia do concorrente não ser conhecida, serão consideradas três estratégias reais em cada caso para a *CompanhiaAéreaB*. Estas estratégias

foram identificadas como os melhores conjuntos de ações no dia a dia. As estratégias para a *CompanhiaAéreaA* serão detalhadas em cada um dos modelos.

- A *CompanhiaAéreaB* irá enviar $TOS = 1 + NOSLOT$ para cada voo.
- A *CompanhiaAéreaB* irá enviar $TOS = FCA + NOSLOT$ para cada voo.
- A *CompanhiaAéreaB* irá enviar $NOSLOT$ para cada voo.

A Figura 8.1 apresenta a árvore de decisão utilizada nos estudos de caso para a *CompanhiaAéreaA*.

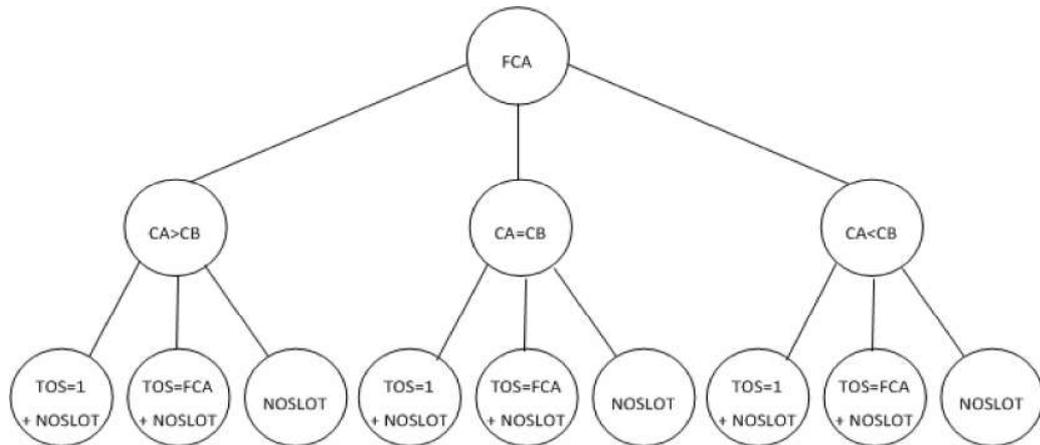


Figura 8.1: Árvore de decisão dos estudos de caso

8.1.1 Condições Iniciais (SG-CTOP)

Para este estudo de caso serão consideradas duas FCA's: FCA001 e FCA002, e duas companhias aéreas disputando os *slots* disponíveis. Conforme a realidade no CTOP, foi assumido que não é conhecida a quantidade de voos capturados no CTOP da companhia aérea concorrente.

As duas FCA's definidas estão próximas do ponto de união das rotas em direção à região metropolitana de *New York*, a Figura 8.2 apresenta o espaço aéreo da FCA001 e FCA002 com algumas possíveis rotas.

Foram selecionados 232 voos partindo dos aeroportos: *Chicago O'Hare International Airport* (ORD), *Miami International Airport* (MIA), *Dallas/Fort Worth International Airport* (DFW), *Los Angeles International Airport* (LAX), *McCarren International Airport* (LAS) e *San Francisco International Airport* (SFO); e com direção aos aeroportos: *LaGuardia Airport* (LGA), *Newark Liberty International Airport* (EWR) e *John F. Kennedy International Airport* (JFK). A lista de todos os voos é apresentada no Apêndice A.

Considerando a *CompanhiaAéreaA* como a jogadora principal e *CompanhiaAéreaB* como a jogadora concorrente, foram definidos três casos:

1. A *CompanhiaAéreaA* possui 50% e a *CompanhiaAéreaB* possui 50% dos voos capturados no CTOP.

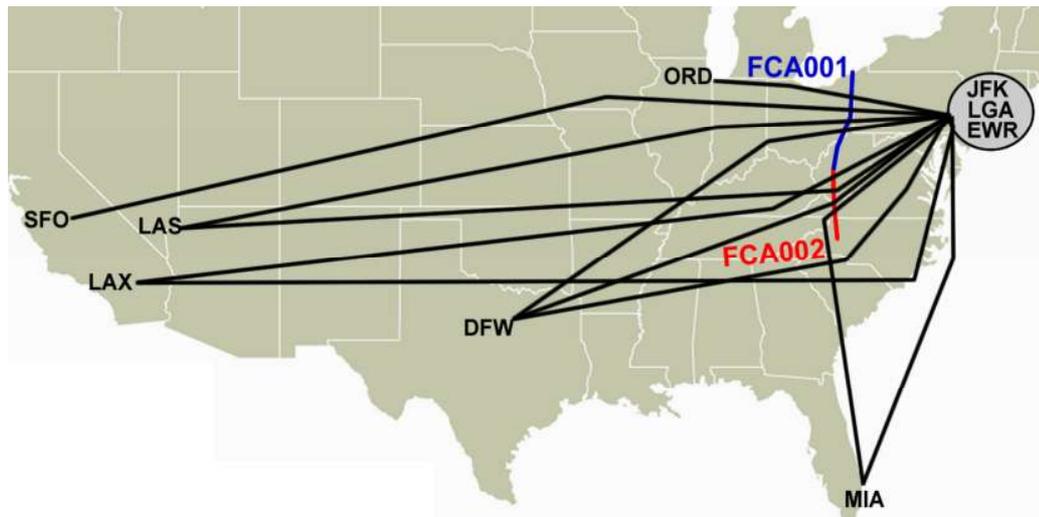


Figura 8.2: Espaço aéreo da FCA001 e FCA002

2. A *CompanhiaAéreaA* possui 67% e a *CompanhiaAéreaB* possui 33% dos voos capturados no CTOP.
3. A *CompanhiaAéreaA* possui 75% e a *CompanhiaAéreaB* possui 25% dos voos capturados no CTOP.

Para cada um dos três casos, existiam três cenários considerando a ordem da fila de associação de *slots* utilizada pela FAA.

1. Caso 50% - 50%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

2. Caso 67% - 33%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

3. Caso 75% - 25%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

O SG-CTOP possui um mecanismo de sorteio em cada demanda do CTOP, no qual são definidas informações como:

- Tempo da demanda CTOP: É sorteado um valor entre 6 e 8 horas para determinar a duração da janela de tempo da demanda, considerando o histórico de cada demanda CTOP.
- Capacidade de voo: É sorteado um valor dentre 3 e 5 para cada 15 minutos, assim é determinado a capacidade disponível para cada FCA. O valor de 15 minutos é dado pelas diretrizes atuais do CTOP.
- Voos capturados no CTOP: Dentre os voos que estavam programados para a janela que foi sorteada e um dos três casos relacionados com a proporção de voos, são distribuídos aleatoriamente os voos para cada uma das duas companhias aéreas.
- Criação da lista de associação: Para cada um dos três cenários, são sorteados aleatoriamente os voos de cada companhia aérea para serem alocados na primeira ou segunda metade da lista.
- Resultado final do jogo: Considerando que na primeira rodada de negociações no CTOP todos os casos e cenários possuem a mesma probabilidade, é sorteado um caso e um cenário como o ambiente final daquele jogo. Complementando o resultado final, é sorteada, também, uma estratégia

para a *CompanhiaAéreaB* naquela rodada. Assim, é possível comparar o resultado que cada negociação CTOP teria, conforme cada estratégia da *CompanhiaAéreaA*.

Para uma melhor análise foram definidos quatro casos, para a primeira rodada, quanto a probabilidade de ocorrer cada proporção. A Figura 8.3 apresenta os quatro casos e suas probabilidades.

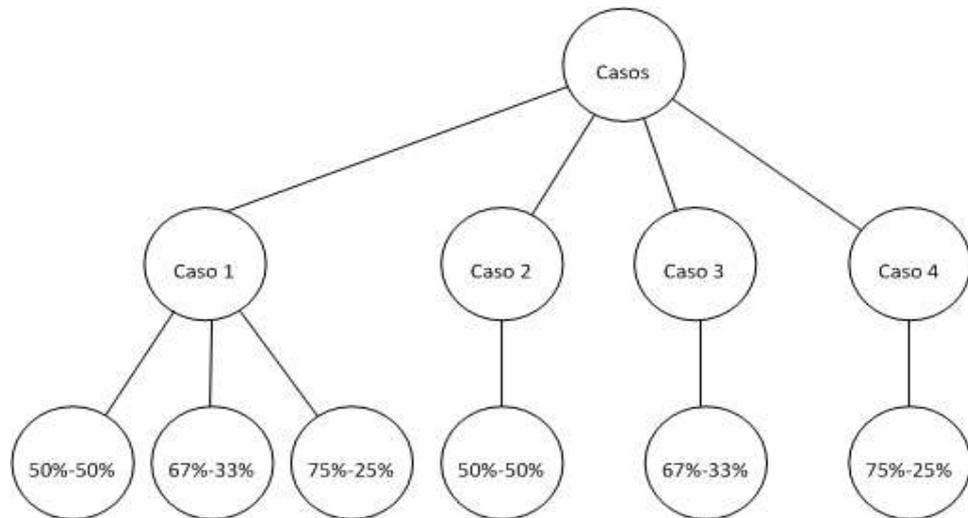


Figura 8.3: Probabilidade para ocorrência de cada caso

Analisando a Figura 8.3 verifica-se que para o caso 1, cada uma das opções possui a mesma probabilidade de ocorrer; e para os casos 2, 3 e 4, a mesma proporção de voos irá acontecer em todas as rodadas do estudo de caso.

8.1.2 Condições Iniciais (RG-CTOP)

Para este estudo de caso serão consideradas duas FCA's: FCAJEN e FCACQY, e duas companhias aéreas disputando os *slots* disponíveis. Conforme a realidade no CTOP, foi assumido que não é conhecida a quantidade de voos capturados no CTOP da companhia aérea concorrente.

Assumindo-se que as FCA's estão na região do *Dallas/Fort Worth International Airport* (DFW), a Figura 8.4 apresenta o espaço aéreo do aeroporto DFW, considerando as FCA's FCACQY e FCAJEN.

A Figura 8.5 apresenta o espaço aéreo da FCACQY e a Figura 8.6 apresenta o espaço aéreo da FCAJEN.

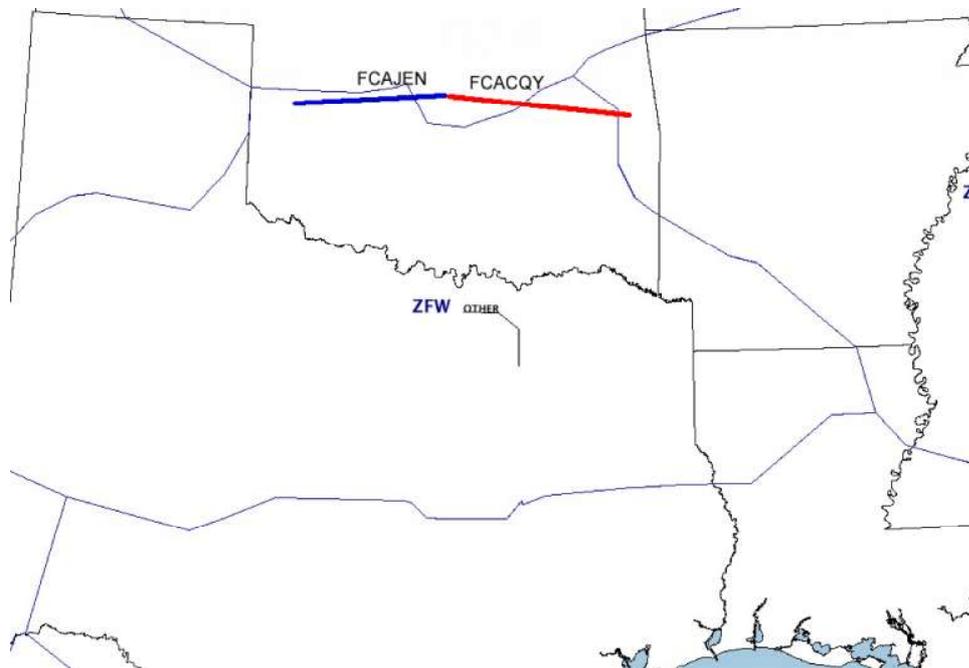


Figura 8.4: Espaço aéreo do aeroporto DFW considerando as duas FCA's, adaptado (FAA, 2015)

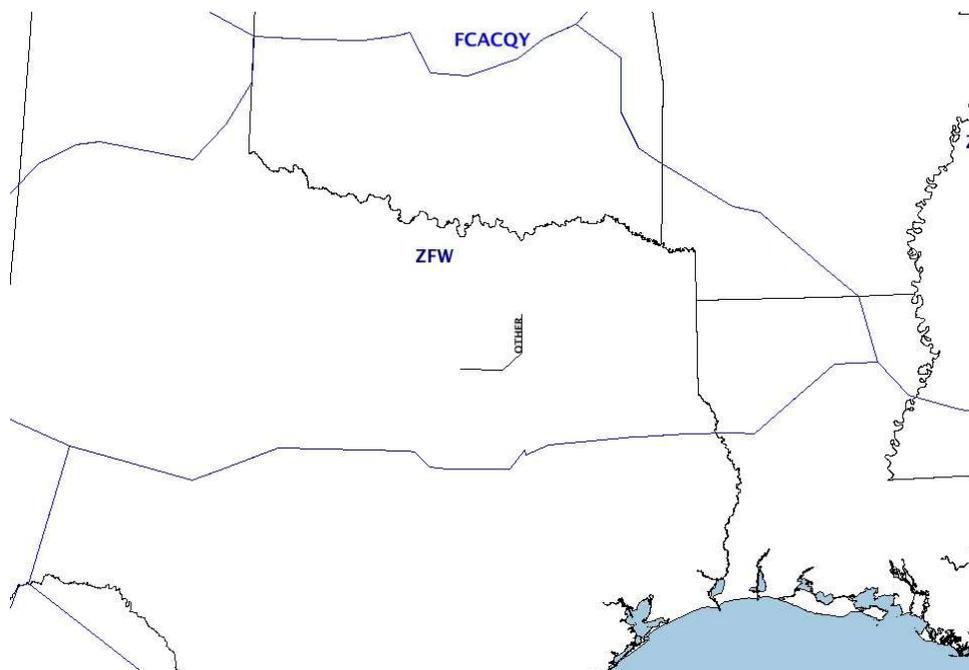


Figura 8.5: Espaço aéreo da FCACQY (FAA, 2015)

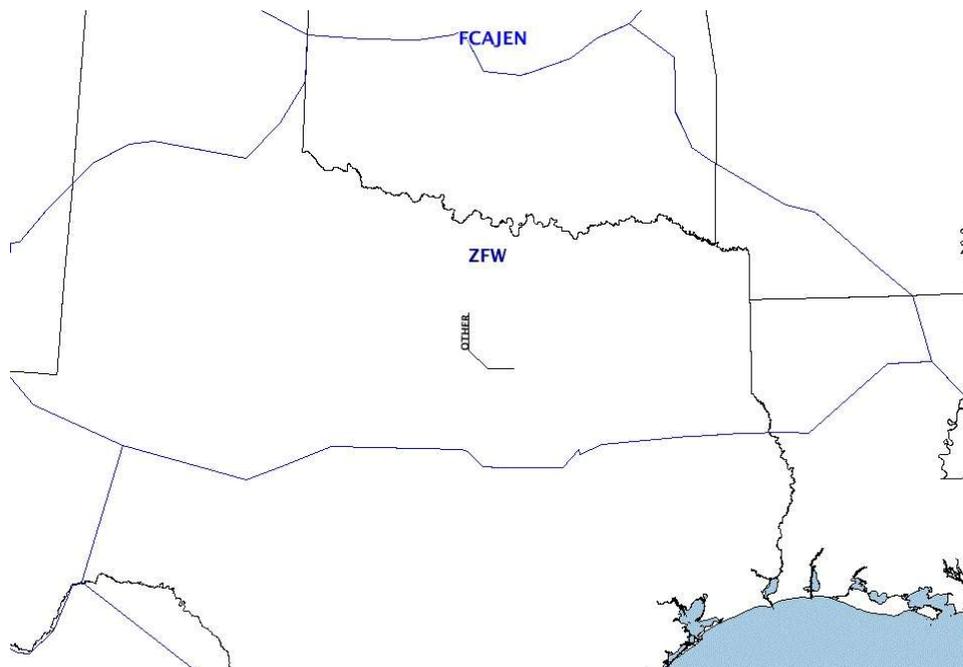


Figura 8.6: Espaço aéreo da FCAJEN (FAA, 2015)

A Tabela 8.1 apresenta as restrições da FCACQY e a Tabela 8.2 apresenta as restrições da FCAJEN.

FCA	FCACQY
Escopo	ZSE ZAB ZLC ZAU ZLA ZDC ZFW ZKC ZME ZHU ZMP ZDV ZBW ZOB ZOA ZJX ZMA ZID ZTL ZNY CYYJ CYVR CYLW CYYC CYEG CYYZ CYTZ CYOW CYUL CYQB CYHZ
Início/Final	1200/0200
Altitude Piso/Teto	0/600
Resumo	Para DFW

Tabela 8.1: Restrições na FCACQY

Analisando as Tabelas 8.1 e 8.2, verifica-se o escopo de todos os voos capturados, passando em qualquer um dos setores envolvidos; o horário inicial e final da demanda CTOP; a altitude definida para captura dos voos; e o resumo, que neste caso captura todos os voos em direção ao aeroporto DFW.

FCA	FCAJEN
Escopo	ZSE ZAB ZLC ZAU ZLA ZDC ZFW ZKC ZME ZHU ZMP ZDV ZBW ZOB ZOA ZJX ZMA ZID ZTL ZNY CYYJ CYVR CYLW CYEG CYYC CYYZ CYTZ CYOW CYUL CYQB CYHZ
Início/Final	1200/0200
Altitude Piso/Teto	0/600
Resumo	Para DFW

Tabela 8.2: Restrições na FCAJEN

Considerando a *CompanhiaAéreaA* como a jogadora principal e *CompanhiaAéreaB* como a jogadora concorrente, foram definidos cinco casos:

1. A *CompanhiaAéreaA* possui 50% e a *CompanhiaAéreaB* possui 50% dos voos capturados no CTOP.
2. A *CompanhiaAéreaA* possui 67% e a *CompanhiaAéreaB* possui 33% dos voos capturados no CTOP.
3. A *CompanhiaAéreaA* possui 33% e a *CompanhiaAéreaB* possui 67% dos voos capturados no CTOP.
4. A *CompanhiaAéreaA* possui 75% e a *CompanhiaAéreaB* possui 25% dos voos capturados no CTOP.
5. A *CompanhiaAéreaA* possui 25% e a *CompanhiaAéreaB* possui 75% dos voos capturados no CTOP.

Para cada um dos cinco casos, existiam três cenários considerando a ordem da fila de associação de *slots* utilizada pela FAA.

1. Caso 50% - 50%:
 - Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
 - Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
 - Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 25% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 75% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

2. Caso 67% - 33%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

3. Caso 33% - 67%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 67% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 33% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 33% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 67% de voos da *CompanhiaAéreaA*.

4. Caso 75% - 25%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaB*.

5. Caso 25% - 75%:

- Cenário 1: A primeira metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaA*.
- Cenário 3: A primeira metade da fila possuía 100% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 0% de voos da *CompanhiaAéreaA*. A segunda metade da fila possuía 50% de voos da *CompanhiaAéreaB* e 50% de voos da *CompanhiaAéreaA*.

O RG-CTOP possui um mecanismo de sorteio em cada demanda do CTOP, no qual são definidas informações como:

- Tempo da demanda CTOP: É sorteado um valor entre 2 e 12 horas para determinar a duração da janela de tempo da demanda.
- Capacidade de voo: É sorteado um valor dentre 3 e 5 para cada 15 minutos, assim é determinado a capacidade disponível para cada FCA. O valor de 15 minutos é dado pelas diretrizes atuais do CTOP.
- Voos capturados no CTOP: Dentre os voos que estavam programados para a janela que foi sorteada e um dos cinco casos relacionados com a proporção de voos, são distribuídos aleatoriamente os voos para cada uma das duas companhias aéreas.
- Criação da lista de associação: Para cada um dos três cenários, são sorteados aleatoriamente os voos de cada companhia aérea para serem colocados na primeira ou segunda metade da lista.
- Resultado final do jogo: Considerando o caso geral em que todos os casos e cenários possuem a mesma probabilidade, é sorteado um caso e um cenário como o ambiente final daquele jogo. Complementando o resultado final, é sorteada, também, uma estratégia para a *CompanhiaAéreaB* naquela rodada. Assim, é possível comparar o resultado que cada negociação CTOP teria, conforme cada estratégia da *CompanhiaAéreaA*.
- Estimativa do resultado do último jogo: Considerando que ao final de cada demanda CTOP cada companhia aérea somente tem conhecimento sob seus voos, é realizada uma estimativa de qual caso e cenário aconteceu no último jogo. Esta estimativa é baseada no que a companhia aérea estimou antes de enviar o TOS e o resultado final, após a associação dos voos pela FAA.
- Adaptação do sistema: Considerando a melhor ação a ser tomada para um determinado jogo e o histórico do seu concorrente, é realizada uma possível

adaptação na ação que será tomada no jogo corrente, a fim de melhorar os resultados.

Para uma melhor análise foram definidos quatro casos, para a primeira rodada, quanto a probabilidade de ocorrer cada proporção. A Figura 8.7 apresenta os seis casos e suas probabilidades.

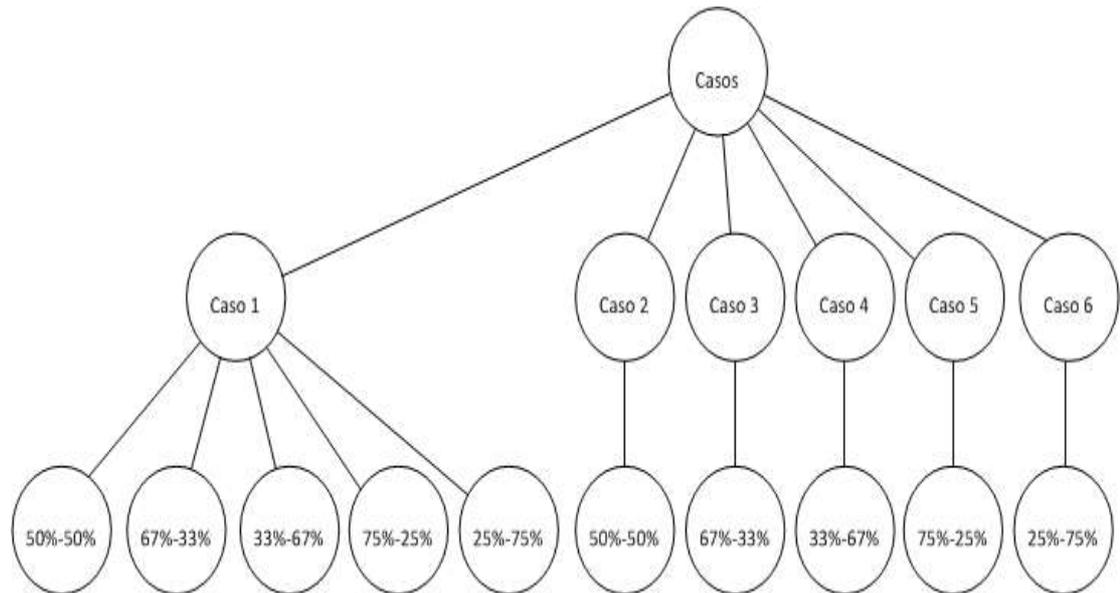


Figura 8.7: Probabilidade para ocorrência de cada caso

Analisando a Figura 8.7 verifica-se que para o caso 1, cada uma das opções possui a mesma probabilidade de ocorrer; e para os casos 2, 3, 4, 5 e 6, a mesma proporção de voos irá acontecer em todas as rodadas do estudo de caso.

8.1.3 Agentes Inteligentes do RG-CTOP

Para o *Agente Detetive* foram definidos três casos para identificar a mudança de estratégia da companhia aérea concorrente, além de uma que será utilizada para todos os casos. A Figura 8.8 apresenta a estrutura utilizada para detectar a mudança de estratégia da *CompanhiaAéreaB*.

Analisando a Figura 8.8 é possível verificar que existem quatro estratégias básicas:

- Enviar em 100% dos casos a mesma estratégia, sendo elas:
 - *CompanhiaAéreaB* envia *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.
 - *CompanhiaAéreaB* envia duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.

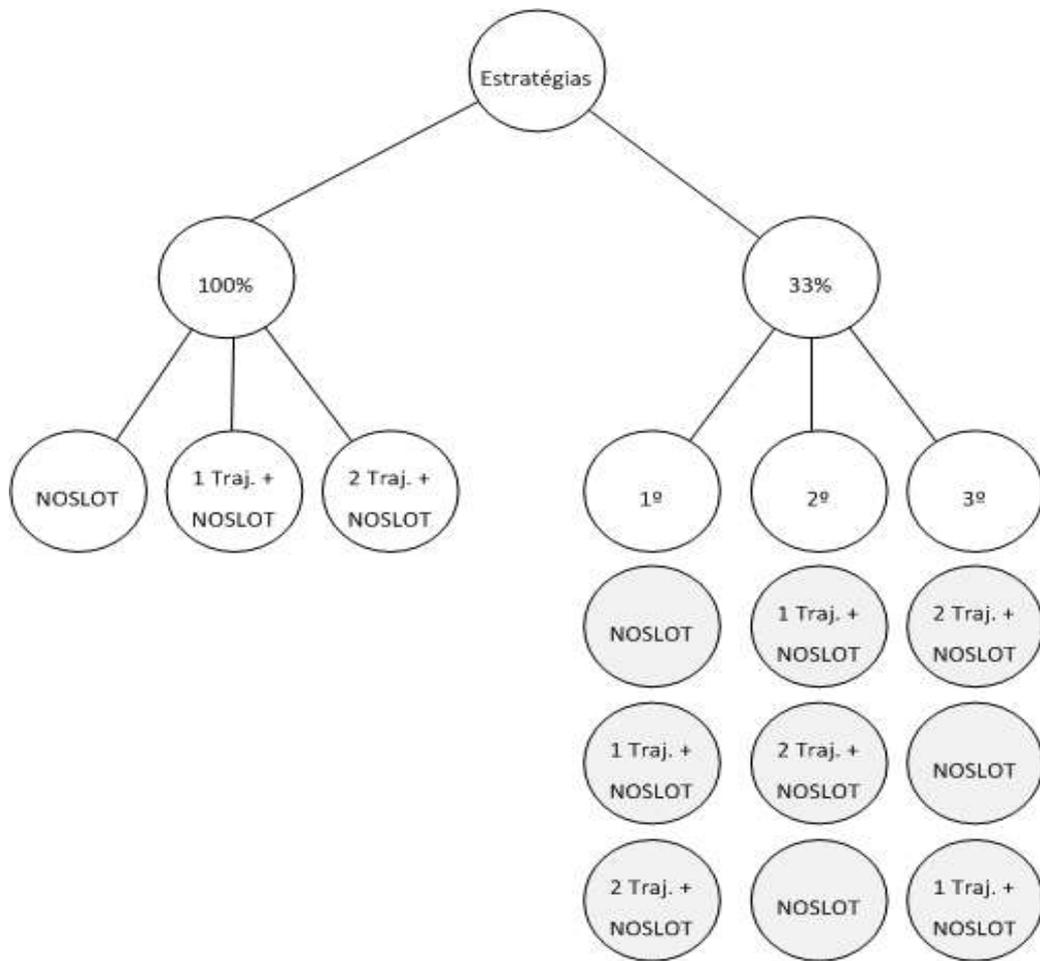


Figura 8.8: Estrutura de detecção de mudança de estratégia pelo Agente Detetive

– *CompanhiaAéreaB* envia três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.

- Enviar em cada 33.3% dos casos a mesma estratégia, sendo a sequência: NOSLOT; 1 opção de trajetória + NOSLOT e 2 opções de trajetórias + NOSLOT.
- Enviar em cada 33.3% dos casos a mesma estratégia, sendo a sequência: 1 opção de trajetória + NOSLOT; 2 opções de trajetórias + NOSLOT e NOSLOT.
- Enviar em cada 33.3% dos casos a mesma estratégia, sendo a sequência: 2 opções de trajetórias + NOSLOT; 1 opção de trajetória + NOSLOT e NOSLOT.

O *Agente Aprendiz* irá considerar as cinco últimas negociações para fazer os ajustes necessários na função de avaliação. Assim, espera-se que ao final de cinco CTOP's o RG-CTOP consiga aprender e alterar sua estratégia.

8.2 Execução

Para validar cada estudo de caso foi definido o seguinte método, o qual é apresentado na Figura 8.9:

- São criadas 100 demandas CTOP, as quais são definidas como um ciclo do SG-CTOP ou do RG-CTOP.
- São executados 100 ciclos para cada estudo de caso, resultando em 10.000 demandas CTOP.
- São executados cada um dos 100 ciclos conforme cada caso, quanto a probabilidade de ocorrência apresentadas nas Figuras 8.3 para o SG-CTOP e 8.7 para o RG-CTOP. Assim ao apresentar os resultados, terão sido gerados 100 ciclos para cada caso apresentado.
- Cada demanda CTOP possui uma configuração diferente, ou seja, janela de tempo da demanda; capacidade de cada FCA; voos capturados; ordem da lista de associação; dentre outros.
- Ao final de cada ciclo é somado a quantidade de atraso global para ser comparado com as demais estratégias.

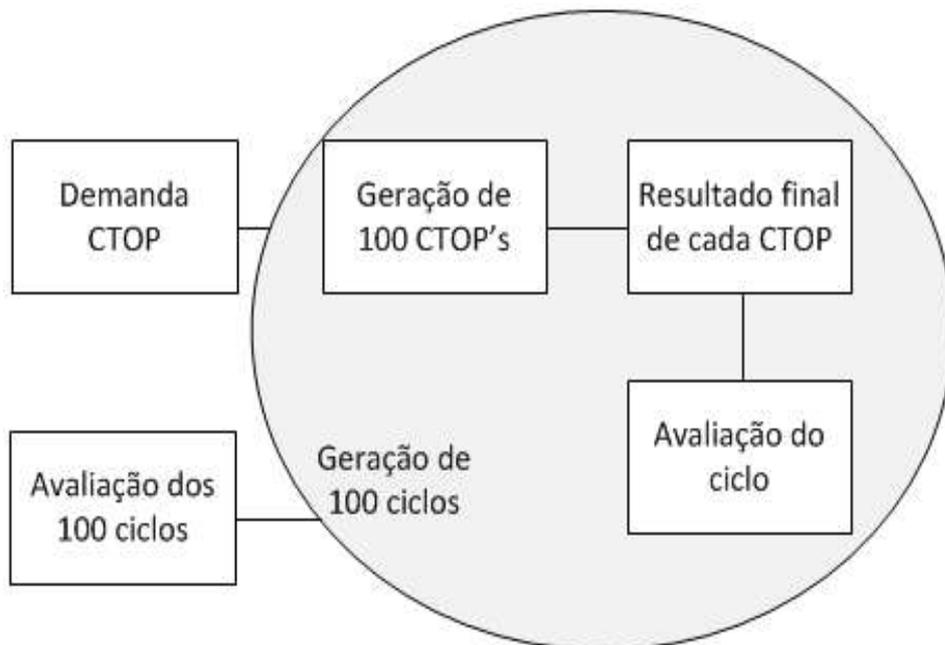


Figura 8.9: Método de criação e avaliação dos ciclos

Foram definidas 4 estratégias de jogo para a *CompanhiaAéreaA*:

1. Estratégia 1: *CompanhiaAéreaA* envia *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.

2. Estratégia 2: *CompanhiaAéreaA* envia duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
3. Estratégia 3: *CompanhiaAéreaA* envia três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
4. Estratégia 4: *CompanhiaAéreaA* define quantas estratégias enviar conforme a função *payoff* do SG-CTOP ou do RG-CTOP, conforme cada estudo de caso.

Nesta seção será apresentado, para cada modelo, um exemplo de algumas informações utilizadas para uma demanda aleatória do CTOP.

8.2.1 Validação do Modelo SG-CTOP

Foi capturada aleatoriamente uma demanda CTOP, para ser apresentada abaixo. Assumindo-se que foram capturados 128 voos no CTOP da *CompanhiaAéreaA*, entre 01:30PM CDT e 10:00PM CDT com destino aos aeroportos EWR; LGA e JFK, os quais são descritos na Tabela 8.3.

Considerando que o tempo gasto entre o acesso ao *slot* na FCA e o destino varia entre 30 e 40 minutos para as FCA001 e FCA002, estão sendo apresentados somente os voos que estão previstos passarem em uma das FCA's após o horário de 02:00PM CDT. Os demais voos podem ser verificados no Apêndice A.

Voo	Tipo	Dest.	Origem	Partida	Chegada
A1	B738	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 10:02AM CST	Qua 02:11PM EST
A2	B752	EWR	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 06:00AM PST	Qua 02:22PM EST
A3	E170	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 09:58AM CST	Qua 02:30PM EST
A4	A320	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:20AM CST	Qua 02:31PM EST
A5	E170	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:30AM CST	Qua 02:32PM EST
A6	B752	EWR	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:22PM EST
A7	B752	EWR	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:24PM EST
A8	B738	EWR	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 07:31AM PST	Qua 03:28PM EST
A9	B738	EWR	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 12:35PM EST	Qua 03:36PM EST
A10	B752	EWR	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:52AM PST	Qua 04:16PM EST

A11	B763	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:00PM CST	Qua 04:17PM EST
A12	B738	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 12:05PM CST	Qua 04:21PM EST
A13	B752	EWR	Int'l de São Fran- cisco (KSFO)	Qua 08:00AM PST	Qua 04:22PM EST
A14	A320	EWR	Int'l de São Fran- cisco (KSFO)	Qua 08:05AM PST	Qua 04:30PM EST
A15	A320	EWR	Int'l de Los Ange- les (KLAX)	Qua 08:25AM PST	Qua 04:30PM EST
A16	B738	EWR	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:15PM EST	Qua 05:09PM EST
A17	A320	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:55PM CST	Qua 05:16PM EST
A18	B752	EWR	Int'l de Los Ange- les (KLAX)	Qua 09:00AM PST	Qua 05:20PM EST
A19	B752	EWR	Int'l de São Fran- cisco (KSFO)	Qua 09:00AM PST	Qua 05:28PM EST
A20	B752	EWR	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 09:50AM PST	Qua 05:46PM EST
A21	B738	EWR	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:45PM EST	Qua 05:55PM EST
A22	B752	EWR	Int'l de São Fran- cisco (KSFO)	Qua 10:00AM PST	Qua 06:22PM EST
A23	E170	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:15PM CST	Qua 06:24PM EST
A24	B733	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 01:54PM CST	Qua 06:25PM EST
A25	B752	EWR	Int'l de Los Ange- les (KLAX)	Qua 10:15AM PST	Qua 06:29PM EST
A26	B752	EWR	Int'l de São Fran- cisco (KSFO)	Qua 10:45AM PST	Qua 07:15PM EST
A27	B739	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:05PM CST	Qua 07:16PM EST
A28	A306	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 03:10PM CST	Qua 07:17PM EST
A29	E170	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 03:05PM CST	Qua 07:29PM EST
A30	A320	EWR	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 04:23PM EST	Qua 07:29PM EST
A31	CRJ7	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:44PM CST	Qua 07:48PM EST
A32	B752	EWR	Int'l de São Fran- cisco (KSFO)	Qua 11:31AM PST	Qua 07:53PM EST

A33	B752	EWR	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 11:30AM PST	Qua 07:54PM EST
A34	B738	EWR	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 12:17PM PST	Qua 08:10PM EST
A35	B739	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:05PM CST	Qua 08:23PM EST
A36	B739	EWR	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:20PM EST	Qua 08:23PM EST
A37	B752	EWR	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 12:16PM PST	Qua 08:29PM EST
A38	B752	EWR	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 12:35PM PST	Qua 08:51PM EST
A39	B738	EWR	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 04:45PM CST	Qua 08:56PM EST
A40	A320	EWR	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 01:00PM PST	Qua 09:05PM EST
A41	B738	EWR	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:59PM CST	Qua 09:18PM EST
A42	B752	EWR	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 01:35PM PST	Qua 09:50PM EST
A43	B763	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 06:15AM PST	Qua 02:36PM EST
A44	CRJ9	JFK	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 10:10AM CST	Qua 02:40PM EST
A45	B752	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 06:15AM PST	Qua 02:43PM EST
A46	A320	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 06:30AM PST	Qua 02:49PM EST
A47	MD88	JFK	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 12:01PM EST	Qua 02:59PM EST
A48	CRJ9	JFK	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 12:00PM CST	Qua 03:15PM EST
A49	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:23PM EST
A50	B763	JFK	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 12:40PM EST	Qua 03:32PM EST
A51	A320	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:32PM EST
A52	B752	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:30AM PST	Qua 03:49PM EST
A53	A320	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:35AM PST	Qua 03:55PM EST
A54	A321	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 07:25AM PST	Qua 04:01PM EST

A55	B738	JFK	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 11:50AM CST	Qua 04:20PM EST
A56	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:00AM PST	Qua 04:24PM EST
A57	B738	JFK	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:05PM EST	Qua 04:58PM EST
A58	B763	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 08:30AM PST	Qua 04:59PM EST
A59	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:55AM PST	Qua 05:13PM EST
A60	B763	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:45AM PST	Qua 05:14PM EST
A61	A321	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 08:40AM PST	Qua 05:17PM EST
A62	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 09:00AM PST	Qua 05:30PM EST
A63	B712	JFK	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:33PM EST	Qua 05:39PM EST
A64	A320	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 09:20AM PST	Qua 05:55PM EST
A65	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:20AM PST	Qua 06:40PM EST
A66	CRJ9	JFK	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:30PM CST	Qua 06:45PM EST
A67	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:35AM PST	Qua 07:03PM EST
A68	A320	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:40AM PST	Qua 07:05PM EST
A69	B738	JFK	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 04:55PM EST	Qua 07:51PM EST
A70	B752	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 11:30AM PST	Qua 07:55PM EST
A71	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 11:50AM PST	Qua 08:06PM EST
A72	A321	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 11:33AM PST	Qua 08:10PM EST
A73	CRJ9	JFK	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:00PM CST	Qua 08:15PM EST
A74	A321	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 11:50AM PST	Qua 08:18PM EST
A75	E190	JFK	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:25PM CST	Qua 08:40PM EST
A76	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 12:15PM PST	Qua 08:45PM EST

A77	B763	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 12:50PM PST	Qua 09:14PM EST
A78	A321	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 01:00PM PST	Qua 09:15PM EST
A79	A321	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 12:45PM PST	Qua 09:20PM EST
A80	B763	JFK	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 01:10PM PST	Qua 09:42PM EST
A81	B738	JFK	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:35PM CST	Qua 09:56PM EST
A82	A320	JFK	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 01:35PM PST	Qua 10:00PM EST
A83	A319	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 11:01AM EST	Qua 02:00PM EST
A84	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 09:55AM CST	Qua 02:05PM EST
A85	A319	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:00AM CST	Qua 02:09PM EST
A86	E170	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 10:02AM CST	Qua 02:25PM EST
A87	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:30AM CST	Qua 02:37PM EST
A88	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:56AM CST	Qua 03:00PM EST
A89	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 11:00AM CST	Qua 03:15PM EST
A90	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 12:30PM CST	Qua 03:35PM EST
A91	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 12:45PM CST	Qua 03:55PM EST
A92	A319	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:00PM CST	Qua 04:09PM EST
A93	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 11:55AM CST	Qua 04:11PM EST
A94	E170	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 12:10PM CST	Qua 04:35PM EST
A95	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:30PM CST	Qua 04:35PM EST
A96	A320	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 01:35PM EST	Qua 04:35PM EST
A97	B712	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 01:45PM EST	Qua 04:50PM EST
A98	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:45PM CST	Qua 04:53PM EST

A99	B738	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:08PM EST	Qua 05:00PM EST
A100	A320	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 02:00PM CST	Qua 05:09PM EST
A101	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 01:10PM CST	Qua 05:21PM EST
A102	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 02:30PM CST	Qua 05:35PM EST
A103	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:00PM CST	Qua 06:05PM EST
A104	A319	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:00PM CST	Qua 06:12PM EST
A105	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 02:10PM CST	Qua 06:22PM EST
A106	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:30PM CST	Qua 06:39PM EST
A107	MD88	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 03:45PM EST	Qua 06:51PM EST
A108	E170	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 02:35PM CST	Qua 06:59PM EST
A109	B738	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 04:06PM EST	Qua 06:59PM EST
A110	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:55PM CST	Qua 06:59PM EST
A111	A320	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:00PM CST	Qua 07:12PM EST
A112	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 03:15PM CST	Qua 07:30PM EST
A113	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:30PM CST	Qua 07:41PM EST
A114	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:40PM CST	Qua 07:48PM EST
A115	B738	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:04PM EST	Qua 08:00PM EST
A116	B737	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:12PM CST	Qua 08:22PM EST
A117	A319	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:30PM EST	Qua 08:31PM EST
A118	B738	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:35PM EST	Qua 08:31PM EST
A119	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:30PM CST	Qua 08:36PM EST
A120	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:30PM CST	Qua 08:41PM EST

A121	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 04:40PM CST	Qua 08:52PM EST
A122	E170	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 04:35PM CST	Qua 09:00PM EST
A123	A320	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:05PM CST	Qua 09:08PM EST
A124	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:59PM CST	Qua 09:10PM EST
A125	B738	LGA	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 05:10PM CST	Qua 09:26PM EST
A126	E170	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:30PM CST	Qua 09:44PM EST
A127	B738	LGA	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:40PM CST	Qua 09:51PM EST
A128	B738	LGA	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 06:59PM EST	Qua 09:55PM EST

Tabela 8.3: Voos capturados da *CompanhiaAéreaA* no CTOP entre 01:30pm e 10:00pm com destino ao EWR, LGA e JFK

Assumindo-se que as capacidades e o período para cada FCA são definidas na Tabela 8.4.

FCA	Período _{Minutos}	Capacidade _{Período}
FCA001	15	3
FCA002	15	5

Tabela 8.4: Capacidade por período durante o CTOP em cada FCA

Neste momento a *CompanhiaAéreaA* possui conhecimento sob todos os seus voos que foram capturados no CTOP e a capacidade de cada FCA, assim é possível realizar uma estimativa do atraso dos seus voos quando a *CompanhiaAéreaB* envia NOSLOT para todos seus voos.

Assim, é criada a matriz de estimativas para os voos que foram capturados da *CompanhiaAéreaA*. A Figura 8.10 apresenta a matriz de estimativas do exemplo apresentado.

Analisando a Figura 8.10, é possível verificar a estimativa de atraso, em minutos, para o conjunto de voos da *CompanhiaAéreaA* em uma demanda CTOP, para os casos em que a *CompanhiaAéreaB* enviava NOSLOT para todos seus voos.

Realizando-se aleatoriamente o sorteio de uma probabilidade de proporção, caso e cenário para a composição do resultado final do jogo, foi sorteado para esta demanda:

- Todas as proporções de voos teriam a mesma probabilidade de ocorrer em cada caso.

Caso 1 – Cenário 1 (A = 0, B = 0) 1202	Caso 1 – Cenário 1 (A = 1, B = 0) 1107	Caso 1 – Cenário 1 (A = 2, B = 0) 1109
Caso 1 – Cenário 2 (A = 0, B = 0) 1202	Caso 1 – Cenário 2 (A = 1, B = 0) 1091	Caso 1 – Cenário 2 (A = 2, B = 0) 1110
Caso 1 – Cenário 3 (A = 0, B = 0) 1202	Caso 1 – Cenário 3 (A = 1, B = 0) 1201	Caso 1 – Cenário 3 (A = 2, B = 0) 1256
Caso 2 – Cenário 1 (A = 0, B = 0) 1480	Caso 2 – Cenário 1 (A = 1, B = 0) 1507	Caso 2 – Cenário 1 (A = 2, B = 0) 1217
Caso 2 – Cenário 2 (A = 0, B = 0) 1480	Caso 2 – Cenário 2 (A = 1, B = 0) 1602	Caso 2 – Cenário 2 (A = 2, B = 0) 1299
Caso 2 – Cenário 3 (A = 0, B = 0) 1480	Caso 2 – Cenário 3 (A = 1, B = 0) 1598	Caso 2 – Cenário 3 (A = 2, B = 0) 1314
Caso 3 – Cenário 1 (A = 0, B = 0) 1802	Caso 3 – Cenário 1 (A = 1, B = 0) 1347	Caso 3 – Cenário 1 (A = 2, B = 0) 1281
Caso 3 – Cenário 2 (A = 0, B = 0) 1802	Caso 3 – Cenário 2 (A = 1, B = 0) 1280	Caso 3 – Cenário 2 (A = 2, B = 0) 1019
Caso 3 – Cenário 3 (A = 0, B = 0) 1802	Caso 3 – Cenário 3 (A = 1, B = 0) 1273	Caso 3 – Cenário 3 (A = 2, B = 0) 1125

Figura 8.10: Matriz de estimativas de uma demanda CTOP

- A *Companhia Aérea A* possui 75% e a *Companhia Aérea B* possui 25% dos voos capturados no CTOP.
 - Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *Companhia Aérea A* e 25% de voos da *Companhia Aérea B*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *Companhia Aérea A* e 25% de voos da *Companhia Aérea B*.

A Tabela 8.5 apresenta uma possível combinação para o resultado final do jogo, no qual é apresentada a combinação de jogadas com o atraso global, em minutos, para cada jogador.

Jogador	Jogada	Atraso Global
1	00	26210
2	00	22070
1	01	26210
2	01	13420
1	02	26210
2	02	12778

1	10	14583
2	10	22070
1	11	19836
2	11	13787
1	12	21197
2	12	13553
1	20	13213
2	20	22070
1	21	19770
2	21	13842
1	22	19823
2	22	13712

Tabela 8.5: Um dos possíveis resultados finais do jogo

Analisando a Tabela 8.5, existiam 18 combinações de movimentos:

1. Movimento 00 - Jogador 1 envia NOSLOT e Jogador 2 envia NOSLOT.
2. Movimento 00 - Jogador 1 envia NOSLOT e Jogador 2 envia NOSLOT.
3. Movimento 01 - Jogador 1 envia NOSLOT e Jogador 2 envia 1 trajetória + NOSLOT.
4. Movimento 01 - Jogador 1 envia NOSLOT e Jogador 2 envia 1 trajetória + NOSLOT.
5. Movimento 02 - Jogador 1 envia NOSLOT e Jogador 2 envia 2 trajetórias + NOSLOT.
6. Movimento 02 - Jogador 1 envia NOSLOT e Jogador 2 envia 2 trajetórias + NOSLOT.
7. Movimento 10 - Jogador 1 envia 1 trajetória + NOSLOT e Jogador 2 envia NOSLOT.
8. Movimento 10 - Jogador 1 envia 1 trajetória + NOSLOT e Jogador 2 envia NOSLOT.
9. Movimento 11 - Jogador 1 envia 1 trajetória + NOSLOT e Jogador 2 envia 1 trajetória + NOSLOT.
10. Movimento 11 - Jogador 1 envia 1 trajetória + NOSLOT e Jogador 2 envia 1 trajetória + NOSLOT.
11. Movimento 12 - Jogador 1 envia 1 trajetória + NOSLOT e Jogador 2 envia 2 trajetórias + NOSLOT.
12. Movimento 12 - Jogador 1 envia 1 trajetória + NOSLOT e Jogador 2 envia 2 trajetórias + NOSLOT.

13. Movimento 20 - Jogador 1 envia 2 trajetórias + NOSLOT e Jogador 2 envia NOSLOT.
14. Movimento 20 - Jogador 1 envia 2 trajetórias + NOSLOT e Jogador 2 envia NOSLOT.
15. Movimento 21 - Jogador 1 envia 2 trajetórias + NOSLOT e Jogador 2 envia 1 trajetória + NOSLOT.
16. Movimento 21 - Jogador 1 envia 2 trajetórias + NOSLOT e Jogador 2 envia 1 trajetória + NOSLOT.
17. Movimento 22 - Jogador 1 envia 2 trajetórias + NOSLOT e Jogador 2 envia 2 trajetórias + NOSLOT.
18. Movimento 22 - Jogador 1 envia 2 trajetórias + NOSLOT e Jogador 2 envia 2 trajetórias + NOSLOT.

Ao ser sorteada, aleatoriamente, uma estratégia para *CompanhiaAéreaB* e esta tenha sido enviar 1 trajetória + NOSLOT para todos os voos, os possíveis resultados para a *CompanhiaAéreaA*, conforme as 4 estratégias, seriam:

1. Estratégia 1: 26210 minutos de atraso.
2. Estratégia 2: 19836 minutos de atraso.
3. Estratégia 3: 19770 minutos de atraso.
4. Estratégia 4: 19770 minutos de atraso.

Assim, neste caso, o SG-CTOP teria atingido o mesmo atraso que a estratégia 3, de enviar 2 trajetórias + NOSLOT, resultando em 19770 minutos de atraso para os voos da *CompanhiaAéreaA*

8.2.2 Validação do Modelo RG-CTOP

Foi capturada aleatoriamente uma demanda CTOP, para ser apresentada abaixo. Assumindo-se que foram capturados 48 voos da *CompanhiaAéreaA* no CTOP, entre 12:00PM CDT e 02:00PM CDT com destino ao aeroporto DFW, os quais são descritos na Tabela 8.6.

Considerando que o tempo gasto entre o acesso ao *slot* na FCA e o aeroporto DFW é de 40 minutos para as FCAJEN e FCACQY, estão sendo apresentados somente os voos que estão previstos passarem em uma das FCA's após o horário de 12:00PM CDT. Os demais voos podem ser verificados no Apêndice B.

ID	Aeronave _{Tipo}	Origem _{ICAO}	IGTD	Chegada Prevista
A28	MD83	KTUS	Seg 09:57AM CDT	Seg 12:41PM CDT
A31	MD80	KLBB	Seg 12:00PM CDT	Seg 12:49PM CDT
A32	A319	KICT	Seg 11:56AM CDT	Seg 12:50PM CDT

A33	B738	KDCA	Seg 10:11AM CDT	Seg 12:51PM CDT
A34	MD83	KABQ	Seg 11:33AM CDT	Seg 12:53PM CDT
A35	A319	KSDF	Seg 11:16AM CDT	Seg 12:53PM CDT
A36	A319	CYEG	Seg 09:24AM CDT	Seg 12:54PM CDT
A38	MD83	KONT	Seg 10:32AM CDT	Seg 01:00PM CDT
A39	MD80	KORD	Seg 11:23AM CDT	Seg 01:01PM CDT
A40	B77W	EGLL	Seg 03:42AM CDT	Seg 01:05PM CDT
A43	MD80	KCOS	Seg 11:51AM CDT	Seg 01:11PM CDT
A44	MD83	KSAN	Seg 10:48AM CDT	Seg 01:13PM CDT
A45	B738	KRDU	Seg 10:45AM CDT	Seg 01:17PM CDT
A46	B752	KLAX	Seg 10:50AM CDT	Seg 01:19PM CDT
A47	B738	KSEA	Seg 09:36AM CDT	Seg 01:22PM CDT
A48	MD83	KSMF	Seg 10:26AM CDT	Seg 01:24PM CDT
A50	B738	KSNA	Seg 11:03AM CDT	Seg 01:28PM CDT
A51	B738	KLGA	Seg 10:25AM CDT	Seg 01:31PM CDT
A52	A319	KATL	Seg 11:47AM CDT	Seg 01:32PM CDT
A54	B752	KSFO	Seg 10:40AM CDT	Seg 01:34PM CDT
A57	MD80	KTUL	Seg 12:53PM CDT	Seg 01:40PM CDT
A59	MD83	KPDX	Seg 10:21AM CDT	Seg 01:41PM CDT
A60	MD83	KSJC	Seg 10:53AM CDT	Seg 01:43PM CDT
A61	MD83	KDTW	Seg 11:27AM CDT	Seg 01:44PM CDT
A62	B738	KPHX	Seg 11:01AM CDT	Seg 01:47PM CDT
A63	A319	KHSV	Seg 12:26PM CDT	Seg 01:51PM CDT
A65	MD80	KDAY	Seg 11:56AM CDT	Seg 01:54PM CDT
A66	MD80	KDEN	Seg 12:23PM CDT	Seg 01:55PM CDT
A67	B738	CYVR	Seg 10:20AM CDT	Seg 01:59PM CDT
A68	B738	KLAS	Seg 11:53AM CDT	Seg 02:00PM CDT
A69	MD80	KCMH	Seg 11:50PM CDT	Seg 02:03PM CDT
A71	MD83	KMSP	Seg 12:04PM CDT	Seg 02:04PM CDT
A72	MD83	KSTL	Seg 12:43PM CDT	Seg 02:06PM CDT
A73	MD80	KXNA	Seg 01:20PM CDT	Seg 02:07PM CDT
A75	B738	KSNA	Seg 11:53AM CDT	Seg 02:10PM CDT
A76	B752	KLAX	Seg 11:50AM CDT	Seg 02:13PM CDT
A77	MD80	KABQ	Seg 13:02PM CDT	Seg 02:15PM CDT
A79	B772	EDDF	Seg 09:10AM CDT	Seg 02:18PM CDT
A80	MD80	KRIC	Seg 11:41AM CDT	Seg 02:19PM CDT
A82	B738	KSAN	Seg 11:58AM CDT	Seg 02:20PM CDT
A83	B738	KPHL	Seg 11:24AM CDT	Seg 02:21PM CDT
A84	MD80	KDCA	Seg 11:42AM CDT	Seg 02:24PM CDT
A86	B738	KORD	Seg 12:50PM CDT	Seg 02:27PM CDT
A87	B752	KBOS	Seg 10:54AM CDT	Seg 02:30PM CDT
A88	MD80	KTUS	Seg 11:52AM CDT	Seg 02:30PM CDT
A89	B738	KLGA	Seg 11:22AM CDT	Seg 02:31PM CDT
A90	B738	KSFO	Seg 11:39AM CDT	Seg 02:32PM CDT

A91	MD83	KATL	Seg 12:48PM CDT	Seg 02:35PM CDT
-----	------	------	-----------------	-----------------

Tabela 8.6: Voos da *Companhia Aérea A* capturados no CTOP entre 12:00pm e 02:00pm com destino ao DFW

Considerando as definições para alocação dos *slots* disponíveis no CTOP e que as restrições tenham sido divulgadas às 10:00AM CDT, os voos A28, A36, A40, A47 e A79 serão considerados como exceções, por já estarem em voo no momento da divulgação, e terão preferência para a alocação. Logo, não será necessário enviar o TOS para estes voos.

Assumindo-se que as capacidades e o período para cada FCA são definidas na Tabela 8.7.

FCA	Período _{Minutos}	Capacidade _{Período}
FCACQY	15	5
FCAJEN	15	5

Tabela 8.7: Capacidade por período durante o CTOP em cada FCA

Seguindo o modelo proposto, o primeiro passo no processo de previsão é a verificação da capacidade de *slots* disponíveis em cada FCA por período e a demanda da companhia aérea *A*. A Tabela 8.8 apresenta a relação entre os voos da companhia aérea *A* e a capacidade divulgada por período.

Período de Entrada	Capacidade FCA's	Demanda CA <i>A</i>	Exceções CA <i>A</i>
1200-1214	10	7	2
1215-1229	10	5	1
1230-1244	10	5	1
1245-1259	10	7	0
0100-0114	10	5	0
0115-0129	10	7	0
0130-0144	10	7	1
0145-0159	10	5	0

Tabela 8.8: Relação entre voos da companhia aérea *A* e capacidade por período

Para os demais 43 voos capturados, é necessário que a companhia aérea defina as opções de rotas para cada voo, o que levará ao horário estimado de entrada na FCA (EAT). Será assumido o padrão *Central Daylight Time* (CDT) e será considerada uma rota para entrada em cada FCA. Assim, a Tabela 8.9 apresenta o EAT de cada voo da companhia aérea *A* para a FCAJEN e FCACQY.

ID	FCAJEN _{EAT}	FCACQY _{EAT}
A28	12:01PM CDT	-
A31	12:05PM CDT	12:09PM CDT

A32	12:08PM CDT	12:09PM CDT
A33	12:13PM CDT	12:10PM CDT
A34	12:12PM CDT	12:17PM CDT
A35	12:14PM CDT	12:13PM CDT
A36	12:14PM CDT	-
A38	12:18PM CDT	12:21PM CDT
A39	12:20PM CDT	12:16PM CDT
A40	-	12:22PM CDT
A43	12:28PM CDT	12:33PM CDT
A44	12:29PM CDT	12:35PM CDT
A45	12:40PM CDT	12:37PM CDT
A46	12:40PM CDT	12:43PM CDT
A47	12:42PM CDT	-
A48	12:43PM CDT	12:50PM CDT
A50	12:44PM CDT	12:53PM CDT
A51	12:54PM CDT	12:49PM CDT
A52	12:57PM CDT	12:50PM CDT
A54	12:54PM CDT	12:58PM CDT
A57	12:59PM CDT	12:58PM CDT
A59	12:58PM CDT	01:04PM CDT
A60	12:57PM CDT	01:02PM CDT
A61	12:59PM CDT	12:59PM CDT
A62	01:03PM CDT	01:08PM CDT
A63	01:05PM CDT	01:09PM CDT
A65	01:14PM CDT	01:09PM CDT
A66	01:12PM CDT	01:16PM CDT
A67	01:14PM CDT	01:19PM CDT
A68	01:15PM CDT	01:20PM CDT
A69	01:21PM CDT	01:16PM CDT
A71	01:24PM CDT	01:20PM CDT
A72	01:26PM CDT	01:21PM CDT
A73	01:26PM CDT	01:25PM CDT
A75	01:27PM CDT	01:33PM CDT
A76	01:29PM CDT	01:34PM CDT
A77	01:34PM CDT	01:40PM CDT
A79	-	01:36PM CDT
A80	01:42PM CDT	01:37PM CDT
A82	01:41PM CDT	01:48PM CDT
A83	01:44PM CDT	01:39PM CDT
A84	01:49PM CDT	01:42PM CDT
A86	01:45PM CDT	01:44PM CDT
A87	01:49PM CDT	01:45PM CDT
A88	01:50PM CDT	01:53PM CDT
A89	01:54PM CDT	01:51PM CDT

A90	01:58PM CDT	02:02PM CDT
A91	02:04PM CDT	01:59PM CDT

Tabela 8.9: EAT de entrada na FCAJEN e FCACQY para os voos capturados da *CompanhiaAéreaA*

Considerando as capacidades apresentadas para cada FCA, a Tabela 8.10 apresenta os *slots* disponíveis para cada FCA.

Considerando o processo utilizado pela FAA para alocação dos *slots* no CTOP, a alocação inicia-se pelas exceções, ou seja, os voos já em rota no momento em que o CTOP foi divulgado:

- O voo A28 (FCAJEN-12:01PMCDT) será alocado no *slot* (FCAJEN-12:02).
- O voo A36 (FCAJEN-12:14PMCDT) será alocado no *slot* (FCAJEN-12:14).
- O voo A40 (FCACQY-12:22PMCDT) será alocado no *slot* (FCACQY-12:24).
- O voo A47 (FCAJEN-12:42PMCDT) será alocado no *slot* (FCAJEN-12:44).
- O voo A79 (FCACQY-01:36PMCDT) será alocado no *slot* (FCACQY-01:36).

FCA	<i>Slots</i>
FCACQY	12:00, 12:03, 12:05, 12:08, 12:11 12:15, 12:18, 12:21, 12:24, 12:27 12:30, 12:33, 12:36, 12:39, 12:42 12:45, 12:48, 12:51, 12:54, 12:57 01:00, 01:03, 01:05, 01:08, 01:11 01:15, 01:18, 01:21, 01:24, 01:27 01:30, 01:33, 01:36, 01:39, 01:42 01:45, 01:48, 01:51, 01:54, 01:57
FCAJEN	12:02, 12:05, 12:08, 12:11, 12:14 12:17, 12:20, 12:23, 12:26, 12:29 12:32, 12:35, 12:38, 12:41, 12:44 12:47, 12:50, 12:53, 12:56, 12:59 01:02, 01:05, 01:08, 01:11, 01:14 01:17, 01:20, 01:23, 01:26, 01:29 01:32, 01:35, 01:38, 01:41, 01:44 01:47, 01:50, 01:53, 01:56, 01:59

Tabela 8.10: *Slots* disponíveis para cada FCA

A Tabela 8.11 apresenta o exemplo de um dos TOS, na qual o voo A71 envia duas rotas, com o tempo de rota válido para o início e fim entre 01:00pm e 04:00pm, o tempo mínimo requisitado para ser alocado não foi informado, a

altitude, a velocidade e o RTC que, de certa forma, informa até quanto tempo de atraso é aceito para a utilização daquela rota específica.

ID	Rota	TVST	TVET	RMNT	Altitude	Velocidade	RTC
A71	1	01:00pm	04:00pm	-	360	470	0
A71	2	01:00pm	04:00pm	-	360	470	15
A71	3	01:00pm	04:00pm	-	370	490	30

Tabela 8.11: Exemplo do envio do TOS

Assim, os voos são organizados, de maneira crescente, pelo horário inicial de chegada (IAT) em uma FCA. A Tabela 8.12 apresenta os voos ordenados da *CompanhiaAéreaA*, conforme cada IAT. Esta será a ordem de preferência utilizada pela FAA para fazer a alocação de acordo com o TOS de cada voo.

#	ID	FCAJEN _{IAT}	FCACQY _{IAT}
1	A31	12:05PM CDT	-
2	A32	12:08PM CDT	-
3	A33	-	12:10PM CDT
4	A34	12:12PM CDT	-
5	A35	-	12:13PM CDT
6	A39	-	18:16PM CDT
7	A38	12:18PM CDT	-
8	A43	12:28PM CDT	-
9	A44	12:29PM CDT	-
10	A45	-	12:37PM CDT
11	A46	12:40PM CDT	-
12	A48	12:43PM CDT	-
13	A50	12:44PM CDT	-
14	A51	-	12:49PM CDT
15	A52	-	12:50PM CDT
16	A54	12:54PM CDT	-
17	A60	12:57PM CDT	-
18	A57	-	12:58PM CDT
19	A59	12:58PM CDT	-
20	A61	12:59PM CDT	-
21	A62	01:03PM CDT	-
22	A63	01:05PM CDT	-
23	A65	-	01:09PM CDT
24	A66	01:12PM CDT	-
25	A67	01:14PM CDT	-
26	A68	01:15PM CDT	-
27	A69	-	01:16PM CDT
28	A71	-	01:20PM CDT
29	A72	-	01:21PM CDT
30	A73	-	01:25PM CDT
31	A75	01:27PM CDT	-

32	A76	01:29PM CDT	-
33	A77	01:34PM CDT	-
34	A80	-	01:37PM CDT
35	A83	-	01:39PM CDT
36	A82	01:41PM CDT	-
37	A84	-	01:42PM CDT
38	A86	-	01:44PM CDT
39	A87	-	01:45PM CDT
40	A88	01:50PM CDT	-
41	A89	-	01:51PM CDT
42	A90	01:58PM CDT	-
43	A91	-	01:59PM CDT

Tabela 8.12: Voos da *CompanhiaAéreaA* ordenados pelo IAT

Assumindo-se que, neste exemplo, os cenários sorteados foram:

- A *CompanhiaAéreaA* possui 33% e a *CompanhiaAéreaB* possui 67% dos voos capturados no CTOP.
- Cenário 2: A primeira metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*. A segunda metade da fila possuía 75% de voos da *CompanhiaAéreaA* e 25% de voos da *CompanhiaAéreaB*.
- A *CompanhiaAéreaB* enviou $TOS = 1 + NOSLOT$ para cada voo.

Após a criação da lista IAT, ou seja, a lista de associação de *slots*, e baseado no TOS de cada voo e *slots* disponíveis, a associação é realizada pela FAA. A Tabela 8.13 apresenta a lista IAT para os voos da *CompanhiaAéreaA*.

	ID	FCAJEN _{EAT}	FCACQY _{EAT}	FCA _{Slot}	Atraso
1	A28	12:01PM CDT	-	FCAJEN-12:02	1
2	A31	12:05PM CDT	12:09PM CDT	FCAJEN-12:05	0
4	A32	12:08PM CDT	12:09PM CDT	FCAJEN-12:08	0
5	A33	12:13PM CDT	12:10PM CDT	FCAJEN-12:11	1
6	A34	12:12PM CDT	12:17PM CDT	FCACQY-12:18	1
8	A35	12:14PM CDT	12:13PM CDT	FCACQY-12:13	0
9	A36	12:14PM CDT	-	FCAJEN-12:14	0
10	A39	12:20PM CDT	12:16PM CDT	FCAJEN-12:20	0
11	A38	12:18PM CDT	12:21PM CDT	FCACQY-12:21	0
14	A40	-	12:22PM CDT	FCACQY-12:24	2
15	A43	12:28PM CDT	12:33PM CDT	FCACQY-12:33	0
17	A44	12:29PM CDT	12:35PM CDT	FCAJEN-12:29	0
18	A45	12:40PM CDT	12:37PM CDT	FCAJEN-12:41	1
19	A46	12:40PM CDT	12:43PM CDT	FCACQY-12:45	2
20	A47	12:42PM CDT	-	FCAJEN-12:44	2

21	A48	12:43PM CDT	12:50PM CDT	FCACQY-12:51	1
22	A50	12:44PM CDT	12:53PM CDT	FCACQY-12:53	1
26	A51	12:54PM CDT	12:49PM CDT	FCACQY-12:57	8
28	A52	12:57PM CDT	12:50PM CDT	FCAJEN-01:02	5
31	A54	12:54PM CDT	12:58PM CDT	FCAJEN-01:05	9
32	A57	12:59PM CDT	12:58PM CDT	FCAJEN-01:08	9
34	A59	12:58PM CDT	01:04PM CDT	FCACQY-01:15	11
37	A60	12:57PM CDT	01:02PM CDT	FCACQY-01:18	16
38	A61	12:59PM CDT	12:59PM CDT	FCAJEN-01:17	18
39	A62	01:03PM CDT	01:08PM CDT	FCACQY-01:21	13
42	A63	01:05PM CDT	01:09PM CDT	FCAJEN-01:20	15
44	A65	01:14PM CDT	01:09PM CDT	FCACQY-01:27	18
47	A66	01:12PM CDT	01:16PM CDT	FCAJEN-01:35	23
48	A67	01:14PM CDT	01:19PM CDT	FCAJEN-01:38	24
49	A68	01:15PM CDT	01:20PM CDT	FCACQY-01:39	19
50	A69	01:21PM CDT	01:16PM CDT	FCAJEN-01:47	26
52	A71	01:24PM CDT	01:20PM CDT	FCACQY-01:51	31
55	A72	01:26PM CDT	01:21PM CDT	FCAJEN-01:53	27
57	A73	01:26PM CDT	01:25PM CDT	FCACQY-01:57	32
59	A75	01:27PM CDT	01:33PM CDT	FCAJEN-01:59	26
64	A76	01:29PM CDT	01:34PM CDT	NOSLOT	46
67	A77	01:34PM CDT	01:40PM CDT	NOSLOT	37
71	A79	-	01:36PM CDT	FCACQY-01:36	0
73	A80	01:42PM CDT	01:37PM CDT	NOSLOT	34
75	A82	01:41PM CDT	01:48PM CDT	NOSLOT	31
78	A83	01:44PM CDT	01:39PM CDT	NOSLOT	26
79	A84	01:49PM CDT	01:42PM CDT	NOSLOT	32
84	A86	01:45PM CDT	01:44PM CDT	NOSLOT	48
85	A87	01:49PM CDT	01:45PM CDT	NOSLOT	32
89	A88	01:50PM CDT	01:53PM CDT	NOSLOT	51
92	A89	01:54PM CDT	01:51PM CDT	NOSLOT	47
96	A90	01:58PM CDT	02:02PM CDT	NOSLOT	39
97	A91	02:04PM CDT	01:59PM CDT	NOSLOT	42

Tabela 8.13: Lista final dos voos associados em cada FCA da *CompanhiaAéreaA*

Analisando a Tabela 8.13, é possível verificar alguns pontos:

- O atraso nos primeiros voos foi menor, devido à demanda na primeira metade ter sido maior da *CompanhiaAéreaA* e o envio de somente uma opção de trajetória pela *CompanhiaAéreaB*, reduzindo a disputa.
- Apesar de na segunda metade os atrasos terem aumentado, somente 12 voos da *CompanhiaAéreaA* receberam NOSLOT, ou seja, não tiveram *slots* disponíveis dentro do CTOP. Neste caso, eles podem ser alocados após o

período do CTOP ou voar por fora da área restrita, o caso que alcançar melhor resultado para a companhia aérea.

- Neste exemplo, a demanda CTOP foi composta por 147 voos, sendo 99 voos da *CompanhiaAéreaB*.
- Conforme sorteio, a *CompanhiaAéreaB* enviou $TOS = FCA + NOSLOT$ para cada voo.
- O atraso global para a *CompanhiaAéreaA*, ao utilizar a estratégia 4 com o RG-CTOP, foi de 807 minutos de atraso nos seus voos, e quando comparado às outras três estratégias:
 - Estratégia 1: Obteve 1184 minutos de atraso, 31.8% acima que o RG-CTOP.
 - Estratégia 2: Obteve 974 minutos de atraso, 17% acima que o RG-CTOP.
 - Estratégia 3: Obteve 862 minutos de atraso, 6.3% acima que o RG-CTOP.

8.3 Resultados

Os resultados serão apresentados por cada um dos dois modelos e ao final será realizada uma análise sobre o que foi alcançado com esta tese.

Conforme foi apresentado no planejamento do estudo de caso, os resultados serão divididos por cada um dos casos, conforme as Figuras 8.3 e 8.7.

8.3.1 SG-CTOP

Para verificar os resultados, mesmo considerando a incerteza inerente na primeira negociação, foi considerado que poderia ocorrer um dos três casos abaixo com a mesma probabilidade ou que somente um caso poderia ocorrer em cada ciclo do SG-CTOP.

Assim, a abordagem principal irá tratar que todos os casos podem ocorrer na mesma probabilidade, porém irá considerar as outras três heurísticas separadamente, a fim de apresentar o desempenho do SG-CTOP em cada caso específico.

1. Caso 1: a *CompanhiaAéreaA* possui 50% e a *CompanhiaAéreaB* possui 50% dos voos capturados no CTOP.
2. Caso 2: a *CompanhiaAéreaA* possui 67% e a *CompanhiaAéreaB* possui 33% dos voos capturados no CTOP.
3. Caso 3: a *CompanhiaAéreaA* possui 75% e a *CompanhiaAéreaB* possui 25% dos voos capturados no CTOP.

A Tabela 8.14 apresenta o atraso após um ciclo do SG-CTOP, ou seja, 100 negociações do CTOP, para cada estratégia. Assim, o atraso é apresentado, em horas, para os voos da *CompanhiaAéreaA*, conforme cada decisão tomada por ela:

1. Estratégia 1: *CompanhiaAéreaA* envia *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.
2. Estratégia 2: *CompanhiaAéreaA* envia duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
3. Estratégia 3: *CompanhiaAéreaA* envia três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
4. Estratégia 4: *CompanhiaAéreaA* define quantas estratégias enviar conforme a função *payoff* do SG-CTOP, conforme cada estudo de caso.

Tabela 8.14: Atraso após um ciclo do SG-CTOP para cada estratégia e caso

	Estratégias TOS			
	NOSLOT	1 + NS	2 + NS	SG-CTOP
Atraso em horas (Case 1,2,3)	6149	4086	3950	3950
Atraso em horas (Case 1)	5196	3193	2992	2795
Atraso em horas (Case 2)	6960	4572	4479	4339
Atraso em horas (Case 3)	7791	5240	5182	4580

Analisando a Tabela 8.14 é possível verificar que após um ciclo do SG-TOP:

- No caso em que os três casos aconteciam com a mesma proporção para cada companhia aérea em cada rodada, o SG-CTOP conseguiu igualar os seus resultados globais com a estratégia 3. Assim, ao se enviar 2 opções de trajetória + NOSLOT, que seria a melhor estratégia local, a função de *payoff* do SG-CTOP consegue lidar com a demanda sem prejuízos.
- No caso em que o caso 1 aconteceria em todas as demandas CTOP, o SG-CTOP conseguiu reduzir em 197 horas ao ser comparado com a segunda melhor estratégia.
- No caso em que o caso 2 aconteceria em todas as demandas CTOP, o SG-CTOP conseguiu reduzir em 140 horas ao ser comparado com a segunda melhor estratégia.
- No caso em que o caso 3 aconteceria em todas as demandas CTOP, o SG-CTOP conseguiu reduzir em 602 horas ao ser comparado com a segunda melhor estratégia. Este resultado mostrou que conforme a quantidade de voos de uma companhia aérea aumenta dentro da demanda CTOP, o SG-CTOP conseguiu reduzir em 12% o atraso global.

Considerando a função densidade de probabilidade gaussiana (PDF), serão apresentados resultados mais detalhados para cada caso, referentes aos voos capturados, da *CompanhiaAéreaA*, no CTOP ao ser utilizada umas das quatro estratégias apresentadas e após 100 ciclos do CTOP, ou seja, 10.000 demandas CTOP para cada caso apresentado.

A Figura 8.11 apresenta o resultado da função PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a *CompanhiaAéreaA* nos casos 1, 2 e 3. É possível verificar que a média de atraso da estratégia 1, ao se enviar NOSLOT para todos os voos, está acima de 50% das demais médias.

Além disso, verifica-se que os resultados da função para a estratégia 3, ao se enviar 2 opções de trajetórias + NOSLOT, e a estratégia 4, definida pela função *payoff* do SG-CTOP, seguem um mesmo padrão, provando que o SG-CTOP atinge resultados equilibrados.

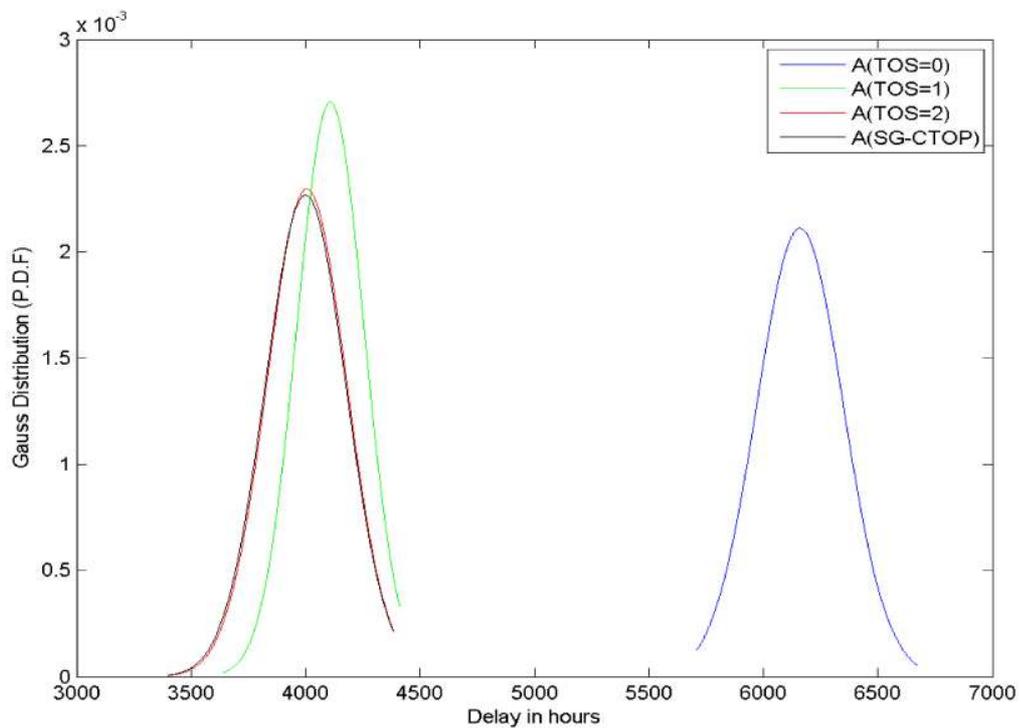


Figura 8.11: PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a *CompanhiaAéreaA* nos casos 1, 2 e 3

A Figura 8.12 apresenta o resultado da função PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a *CompanhiaAéreaA* no caso 1. É possível verificar que os resultados atingidos pelo SG-CTOP se destacam frente as demais estratégias. Mais uma vez é verificada a alta média de atrasos ao se enviar NOSLOT para todos os voos.

A Figura 8.13 apresenta o resultado da função PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a *CompanhiaAéreaA* no caso 3. É interessante verificar o quão alta é a média de atraso da estratégia 1 ao se comparar com as demais estratégias, verifica-se que as estratégias 2 e 3 seguiram com resultados próximos e a estratégia do SG-CTOP alcançou resultados melhores.

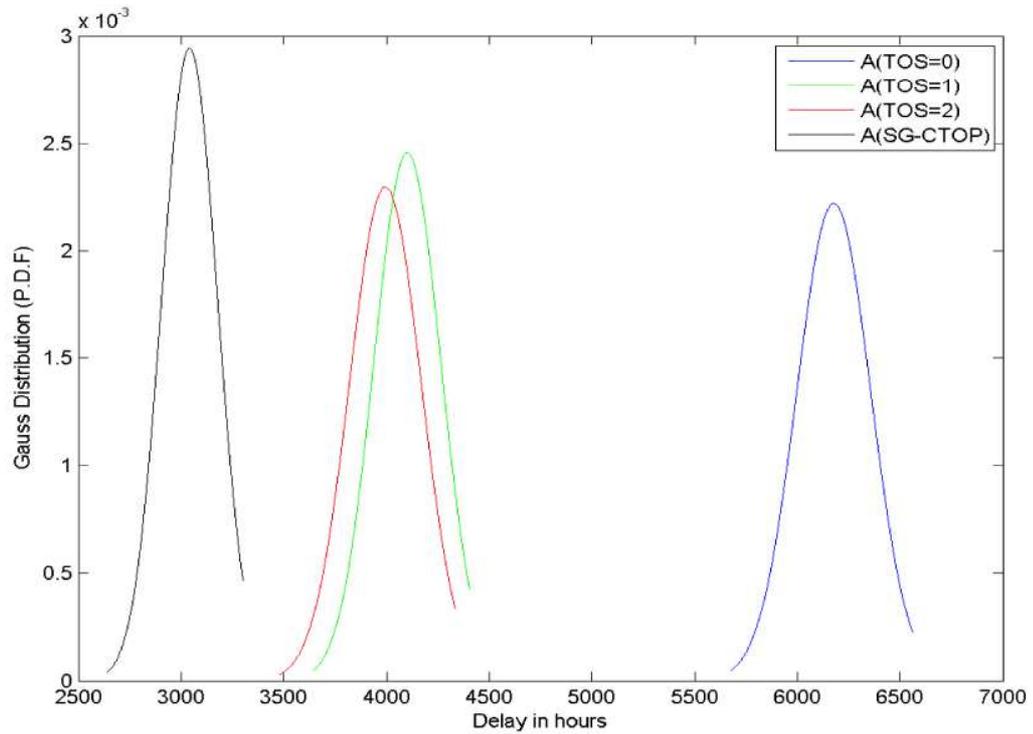


Figura 8.12: PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 1

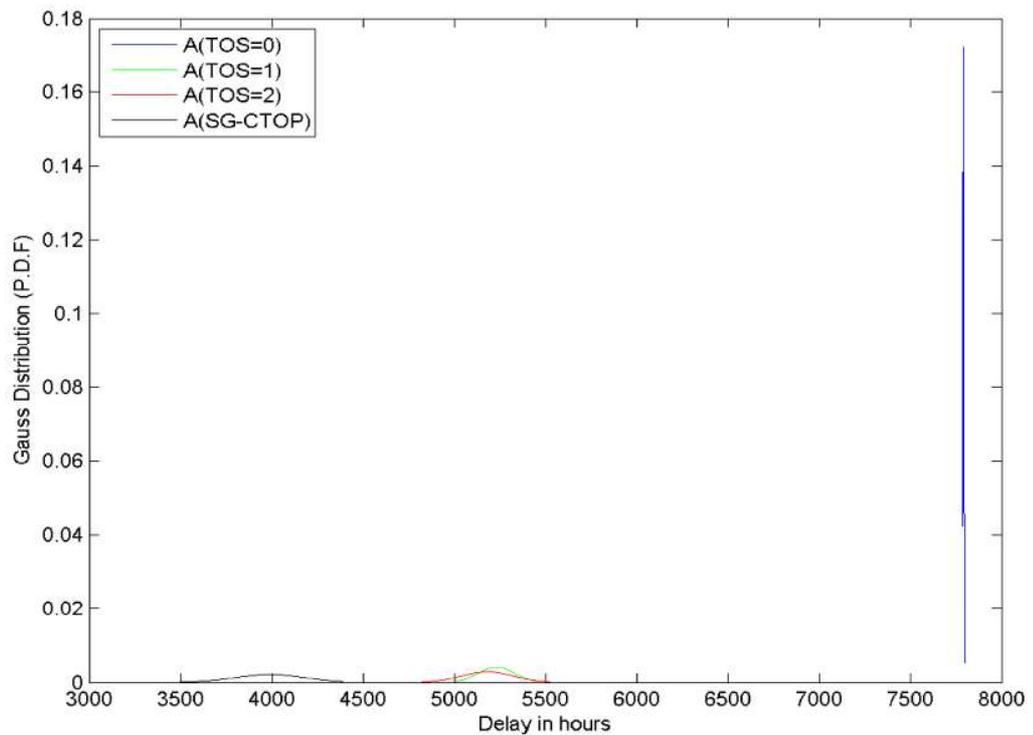


Figura 8.13: PDF para o SG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 3

Considerando que a Figura 8.11 apresenta o caso principal, no qual todos os casos tem a mesma probabilidade de ocorrer em uma primeira negociação do CTOP, foi alcançado ao final de 100 ciclos 537 horas de redução no atraso dos voos capturados no CTOP da *CompanhiaAéreaA*. Ao se analisar as Figuras 8.12 e 8.13 e a Tabela 8.14, é possível verificar que os ganhos alcançados no caso principal podem alcançar uma melhoria ainda mais expressiva.

8.3.2 RG-CTOP

Para verificar os resultados, serão apresentados os resultados de 100 ciclos do RG-CTOP, no qual foram considerados cinco casos:

1. A *CompanhiaAéreaA* possui 50% e a *CompanhiaAéreaB* possui 50% dos voos capturados no CTOP.
2. A *CompanhiaAéreaA* possui 67% e a *CompanhiaAéreaB* possui 33% dos voos capturados no CTOP.
3. A *CompanhiaAéreaA* possui 33% e a *CompanhiaAéreaB* possui 67% dos voos capturados no CTOP.
4. A *CompanhiaAéreaA* possui 75% e a *CompanhiaAéreaB* possui 25% dos voos capturados no CTOP.
5. A *CompanhiaAéreaA* possui 25% e a *CompanhiaAéreaB* possui 75% dos voos capturados no CTOP.

Em cada rodada do RG-CTOP, quatro estratégias estavam disponíveis para a *CompanhiaAéreaA*:

1. Estratégia 1: *CompanhiaAéreaA* envia *NOSLOT* para todos os seus voos capturados pelo CTOP.
2. Estratégia 2: *CompanhiaAéreaA* envia duas opções: uma trajetória para voar pela FCA que possui o menor atraso estimado e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior do que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
3. Estratégia 3: *CompanhiaAéreaA* envia três opções: uma trajetória para voar por cada FCA e *NOSLOT*, caso o atraso pela FCA seja maior que voar por fora das FCA's, para cada um dos seus voos capturados pelo CTOP.
4. Estratégia 4: *CompanhiaAéreaA* define quantas estratégias enviar conforme a função *payoff* do RG-CTOP, conforme cada estudo de caso.

Conforme que foi apresentado na Figura 8.7 que existiam 5 casos quanto a distribuição dos voos do CTOP para cada companhia aérea e que na Figura 8.8 existiam 4 casos quanto a mudança de estratégia da *CompanhiaAéreaB*, assim poderia ser verificado quando a *CompanhiaAéreaA* deveria mudar sua estratégia.

Após 100 ciclos do RG-CTOP, a Figura 8.14 mostra a função PDF para o RG-CTOP, para o caso 1 quanto a probabilidade de ocorrência da proporção, ou seja, os 5 casos apresentados na Figura 8.7 poderiam acontecer com a mesma probabilidade em qualquer rodada e para o caso em que qualquer estratégia teria a mesma probabilidade de ocorrer, apresentado na Figura 8.8.

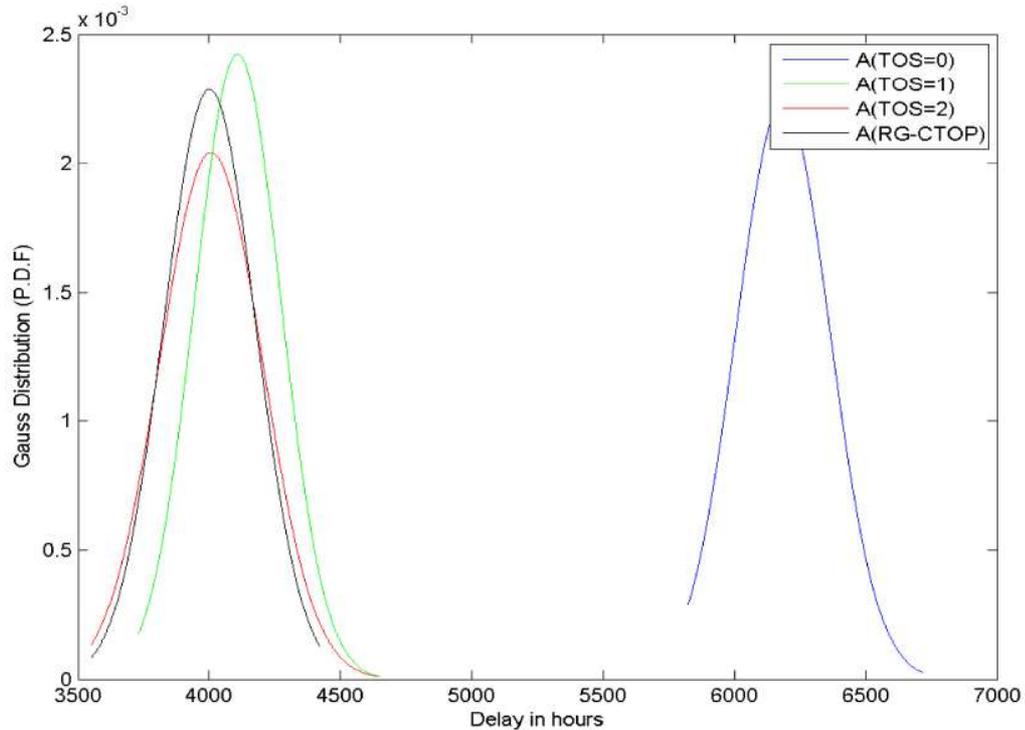


Figura 8.14: PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 1 e estratégia 100%

Analisando a Figura 8.14 é possível verificar que o RG-CTOP conseguiu equilibrar os resultados alcançados, quando comparado com a segunda melhor estratégia para a *Companhia Aérea A*, e teve uma redução de 4% no atraso global.

A Figura 8.15 apresenta os resultados para o caso 1, conforme Figura 8.7, e a estratégia 33% no 2º caso, conforme a Figura 8.8. Em média, a utilização do RG-CTOP atingiu 16% na redução do atraso global.

A Figura 8.16 apresenta os resultados para o caso 2, conforme Figura 8.7, e a estratégia de 100%, conforme a Figura 8.8. Em média, a utilização do RG-CTOP atingiu 14% na redução do atraso global.

A Figura 8.17 apresenta os resultados para o caso 3, conforme Figura 8.7, e a estratégia de 33% no 1º caso, conforme a Figura 8.8. Em média, a utilização do RG-CTOP atingiu 21% na redução do atraso global.

A Figura 8.18 apresenta os resultados para o caso 6, conforme Figura 8.7, e a estratégia de 33% no 3º caso, conforme a Figura 8.8. Em média, a utilização do RG-CTOP atingiu 17% na redução do atraso global.

A Figura 8.19 apresenta os resultados para o caso 5, conforme Figura 8.7, e a estratégia de 33% no 2º caso, conforme a Figura 8.8. Em média, a utilização do RG-CTOP atingiu 18% na redução do atraso global.

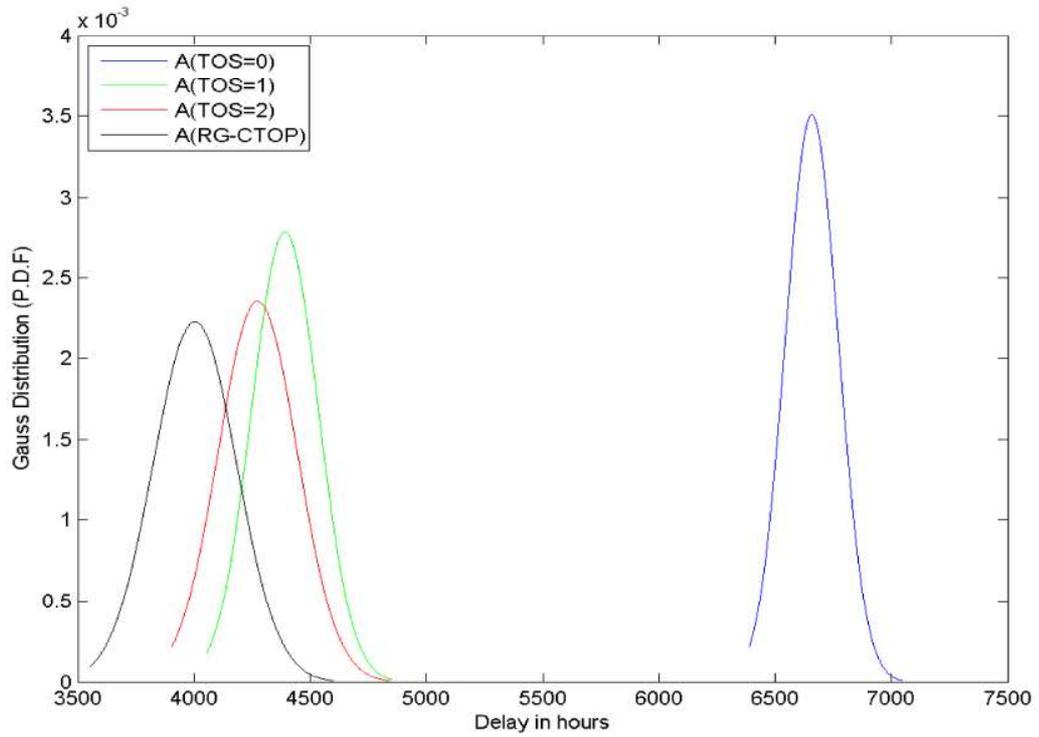


Figura 8.15: PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 1 e estratégia 33% no 2º caso

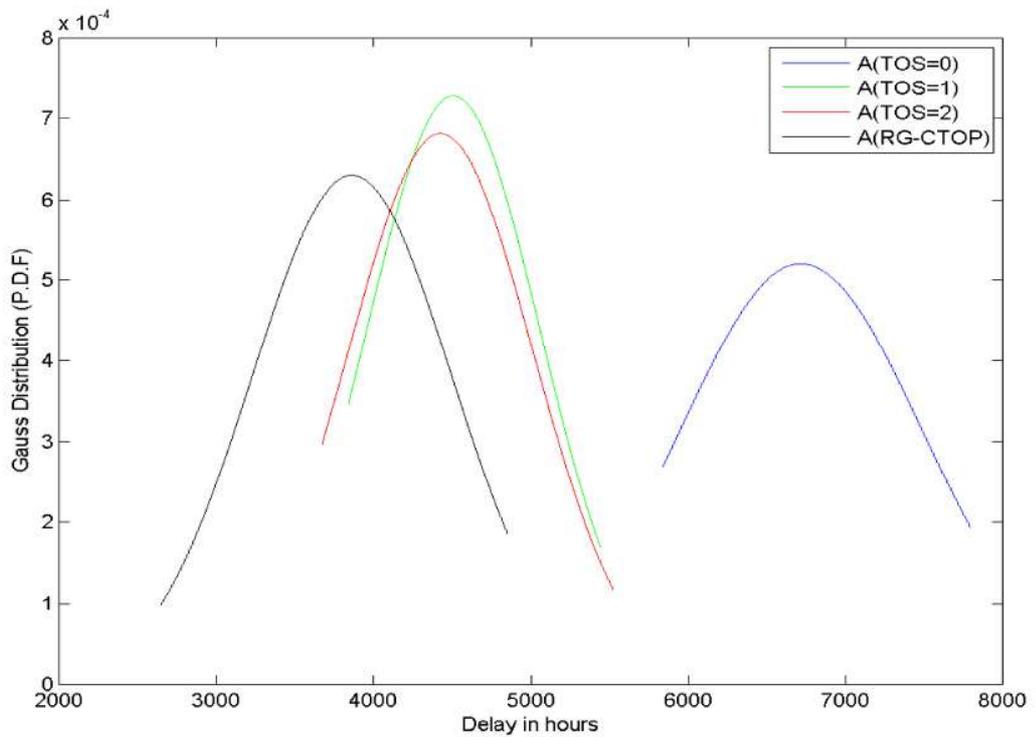


Figura 8.16: PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 2 e estratégia 100%

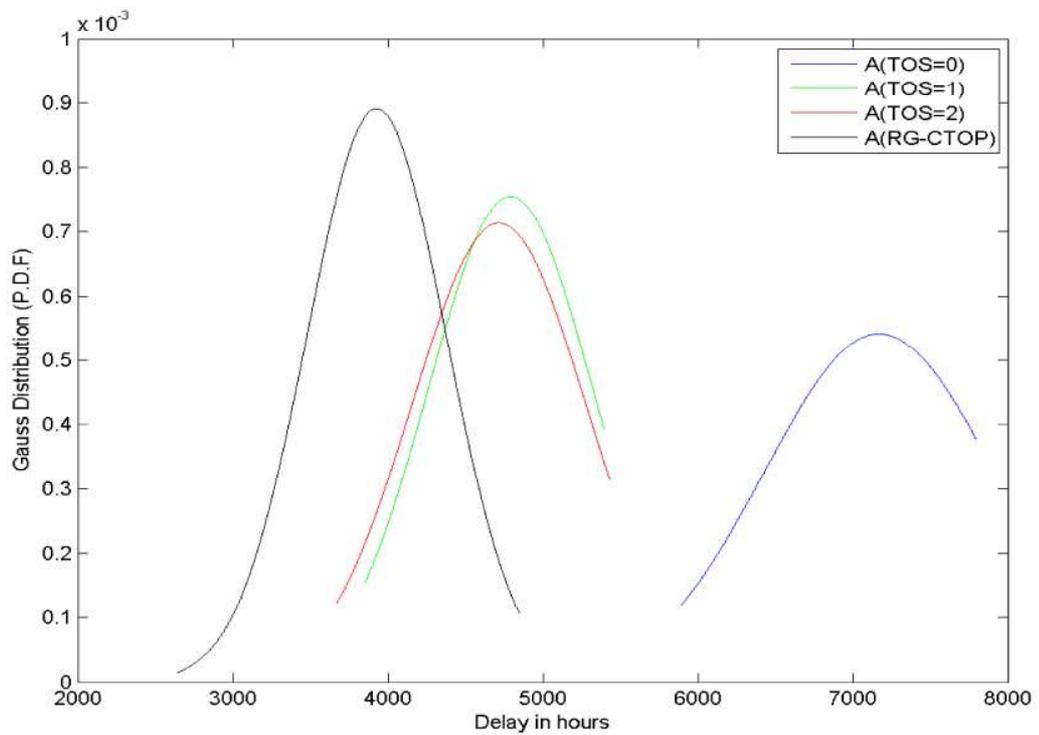


Figura 8.17: PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 3 e estratégia 33% no 1º caso

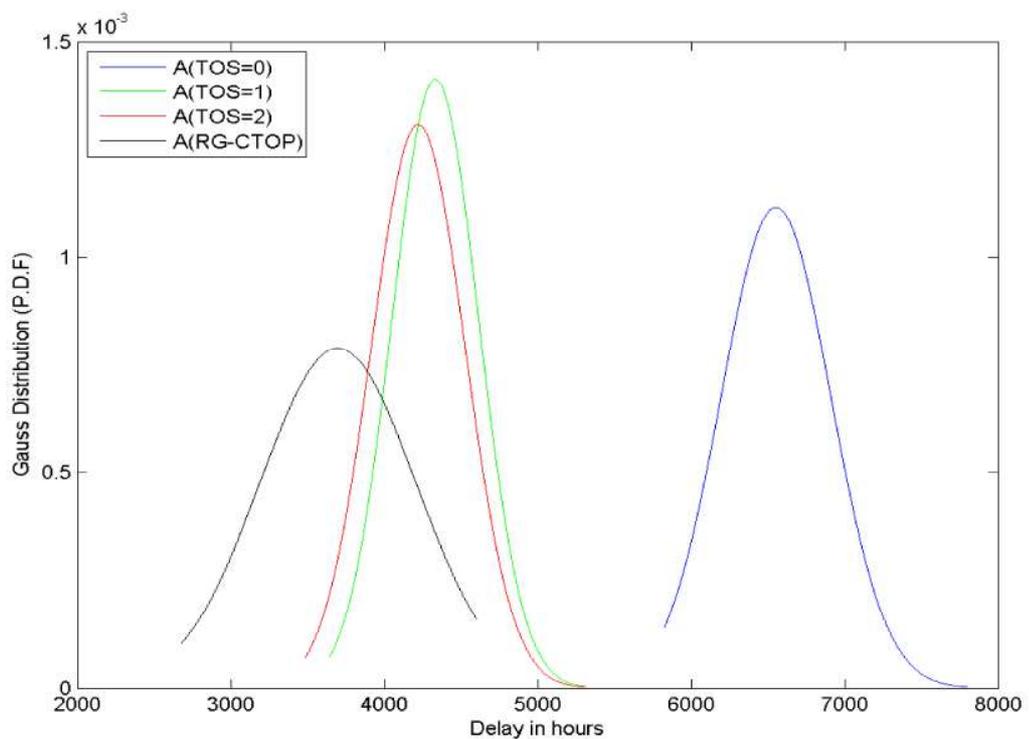


Figura 8.18: PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a *Companhia Aérea A* no caso 6 e estratégia 33% no 3º caso

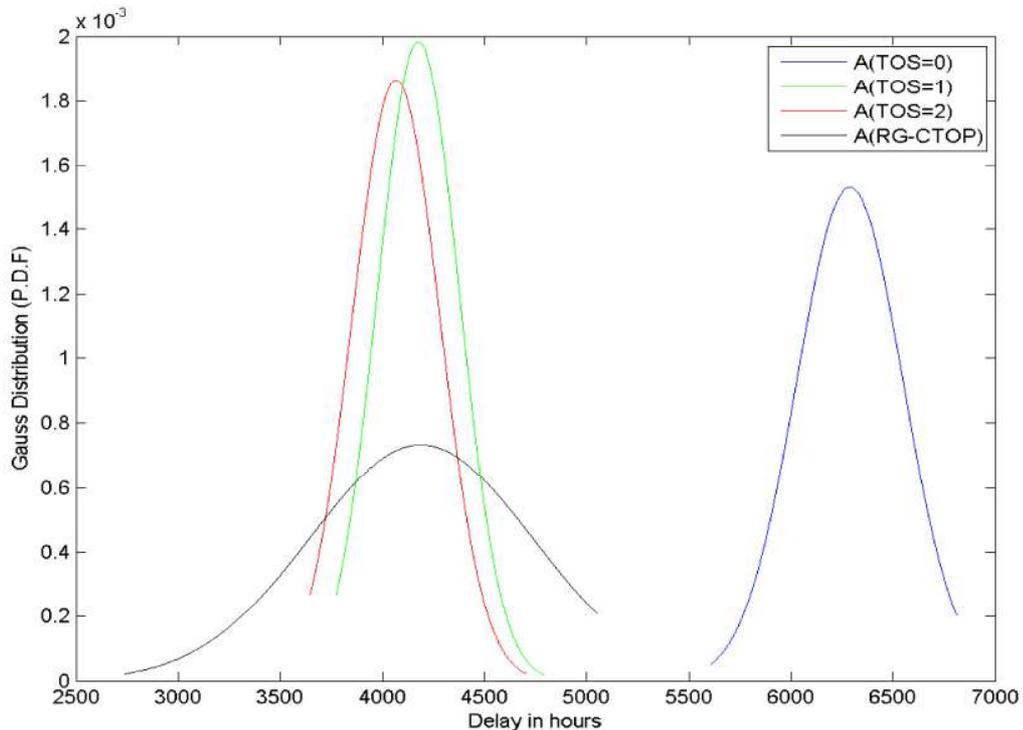


Figura 8.19: PDF para o RG-CTOP e as demais estratégias para a *CompanhiaAéreaA* no caso 5 e estratégia 33% no 2º caso

8.4 Análise dos Resultados Alcançados

Os resultados alcançados pelos dois modelos se mostraram promissores para a utilização pelas companhias aéreas. Foram executados dois estudos de caso, gerando 20.000 negociações em CTOP, assim, retratando os mais diversos casos e estratégias utilizadas dentro do CTOP.

O modelo SG-CTOP alcançou um desempenho superior, ou igual, em 97% dos casos, quando comparado com as melhores estratégias atuais, reduzindo em 537 horas de atrasos para uma determinada companhia. Quanto ao modelo RG-CTOP, foi alcançada uma taxa de melhoria aproximada de 21%, para uma determinada companhia aérea, ao se considerar o aprendizado e adaptação de estratégias frente aos seus concorrentes na disputa dos melhores *slots* em cada demanda CTOP.

Além dos resultados individuais de cada um dos modelos, do *Single Games for CTOP* e *Repeated Games for CTOP*, um outro ponto a ser levantado é o quanto a ordem da fila IAT influencia o atraso global de uma companhia aérea. Durante os dois estudos de caso, todo o trabalho foi dividido em casos e cenários, a fim de se avaliar esta relação também.

Conforme apresentado na Figura 6.2, existiam três casos e para cada caso três cenários. Assim, a Figura 8.20 apresenta o desempenho das três estratégias básicas para a *CompanhiaAéreaA*, apresentadas neste trabalho, quando a *CompanhiaAéreaB* envia NOSLOT para o caso 1, cenário 1.

A Figura 8.21 apresenta o desempenho das três estratégias básicas para a

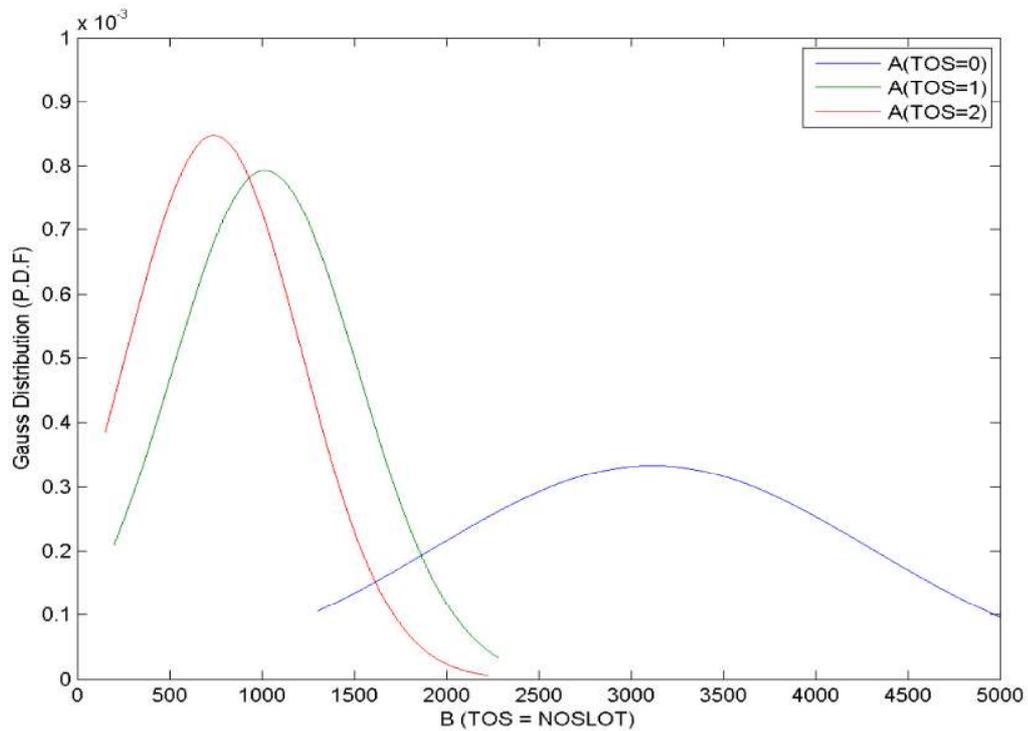


Figura 8.20: Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 1, quando a *CompanhiaAéreaB* envia NOSLOT

CompanhiaAéreaA, apresentadas neste trabalho, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 1 trajetória + NOSLOT para o caso 1, cenário 1.

A Figura 8.22 apresenta o desempenho das três estratégias básicas para a *CompanhiaAéreaA*, apresentadas neste trabalho, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 2 trajetórias + NOSLOT para o caso 1, cenário 1.

A Figura 8.23 apresenta o desempenho das três estratégias básicas para a *CompanhiaAéreaA*, apresentadas neste trabalho, quando a *CompanhiaAéreaB* envia NOSLOT para o caso 1, cenário 2.

A Figura 8.24 apresenta o desempenho das três estratégias básicas para a *CompanhiaAéreaA*, apresentadas neste trabalho, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 1 trajetória + NOSLOT para o caso 1, cenário 2.

A Figura 8.25 apresenta o desempenho das três estratégias básicas para a *CompanhiaAéreaA*, apresentadas neste trabalho, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 2 trajetórias + NOSLOT para o caso 1, cenário 3.

Analisando as Figuras 8.20, 8.21 e 8.22 é possível verificar que a estratégia utilizada pela *CompanhiaAéreaB* tem total influência no resultado final da *CompanhiaAéreaA*.

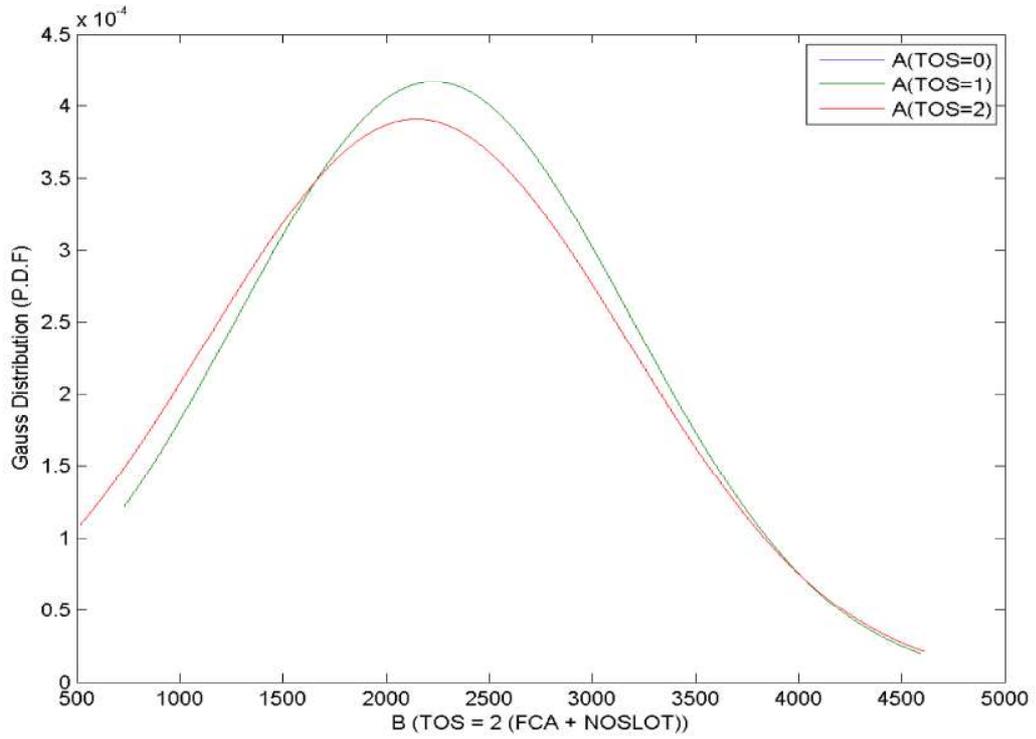


Figura 8.21: Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 1, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 1 trajetória + NOSLOT

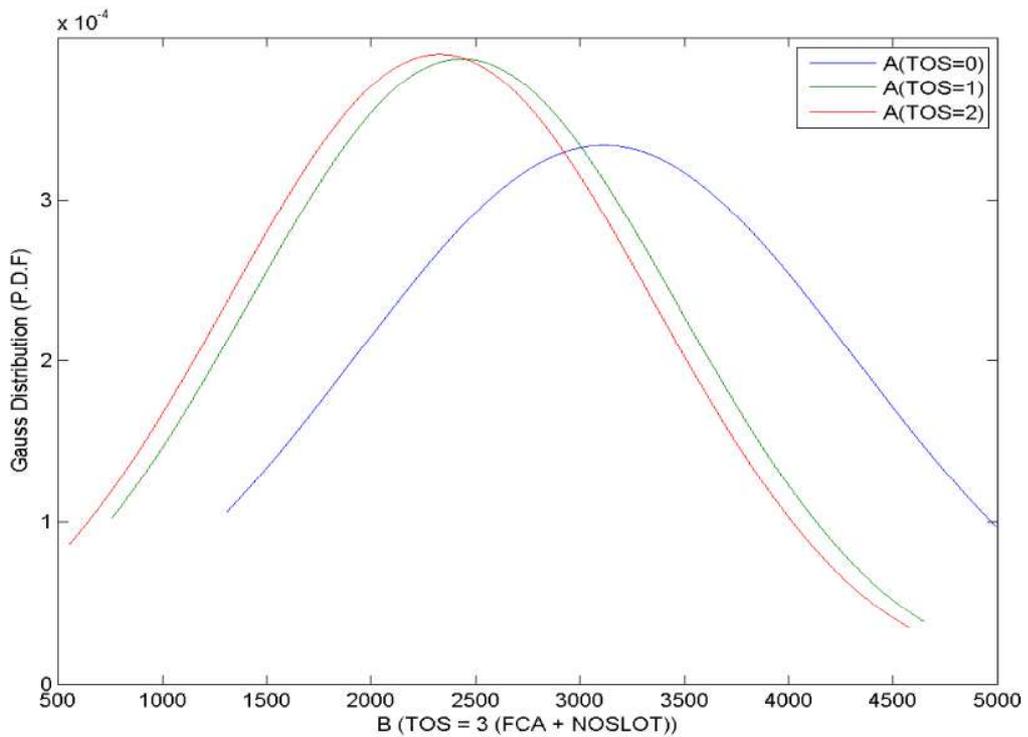


Figura 8.22: Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 1, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 2 trajetórias + NOSLOT

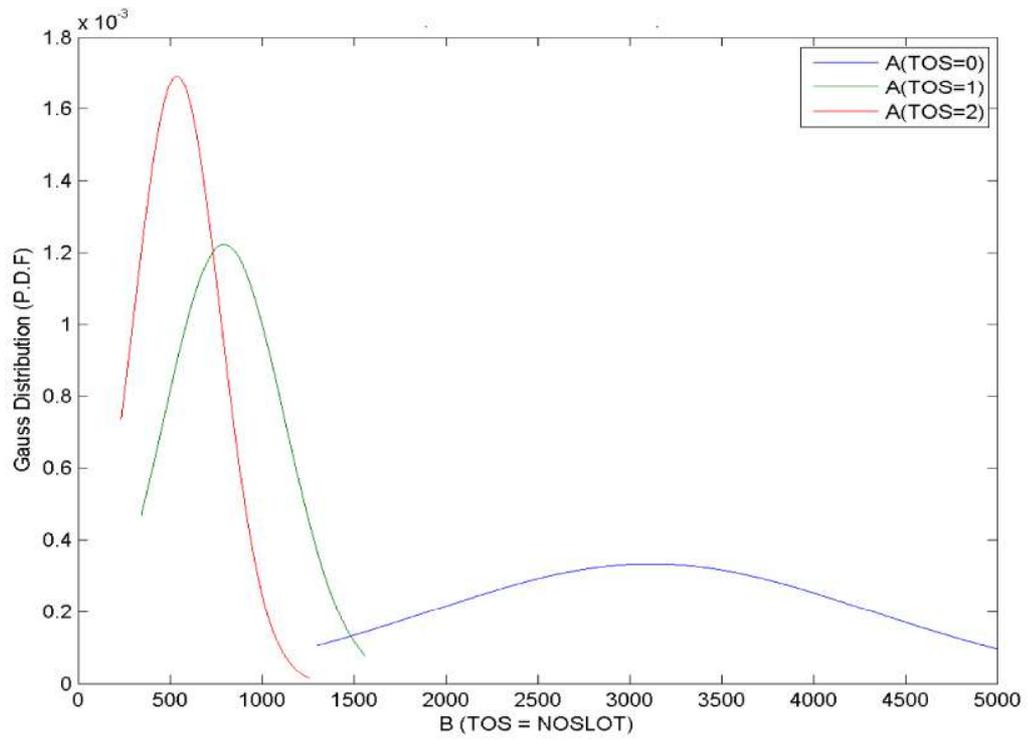


Figura 8.23: Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 2, quando a *CompanhiaAéreaB* envia NOSLOT

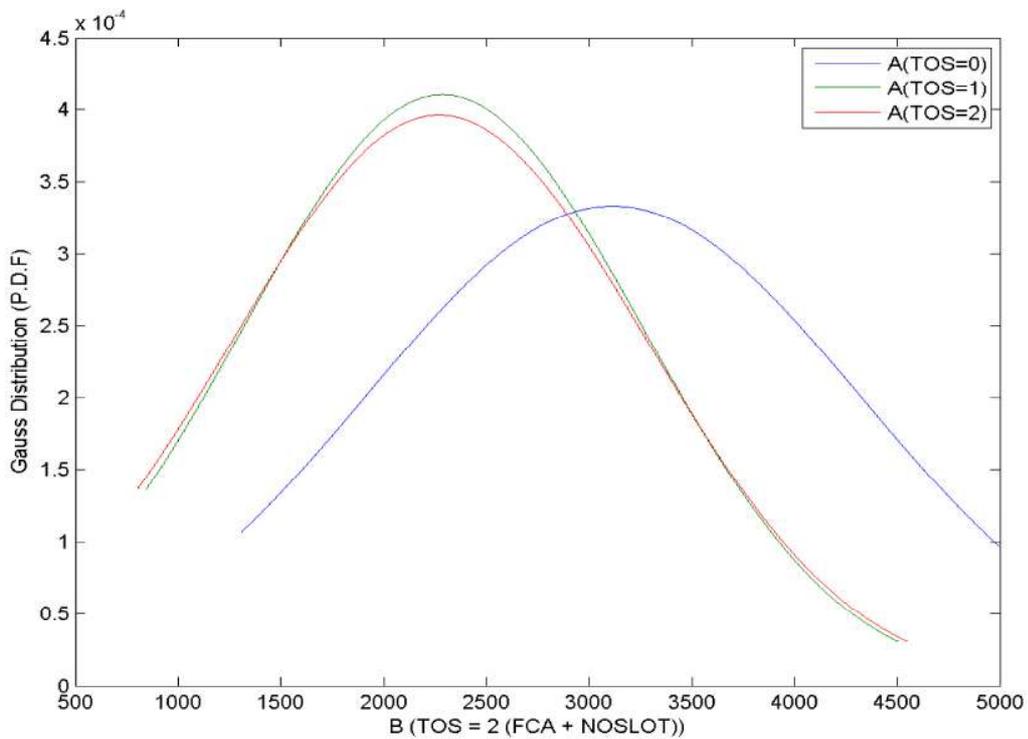


Figura 8.24: Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 2, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 1 trajetória + NOSLOT

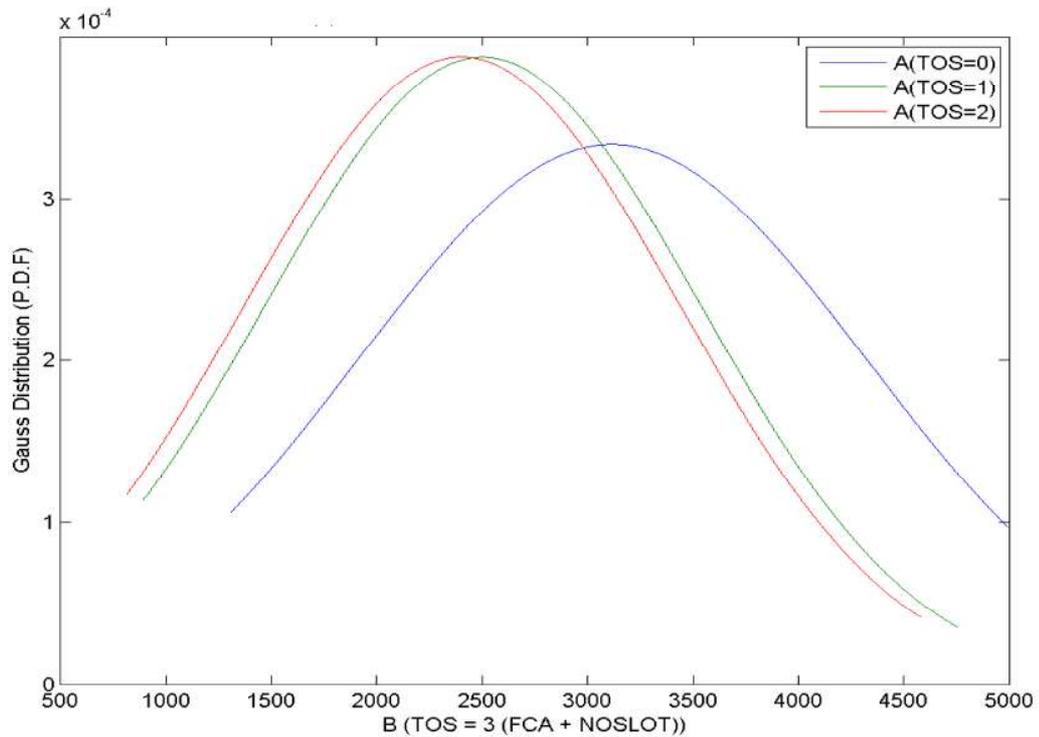


Figura 8.25: Desempenho da fila IAT no caso 1 e cenário 3, quando a *CompanhiaAéreaB* envia 2 trajetórias + NOSLOT

Ao se comparar com os resultados apresentados nas Figuras 8.23, 8.24 e 8.25, é possível verificar que a mudança do cenário com uma nova ordem IAT, mesmo dentro do mesmo caso quanto a distribuição de voos, alcançou resultados diferentes, porém com a estratégia de se enviar 2 trajetórias + NOSLOT, no geral, sendo a melhor opção para a *CompanhiaAéreaA*.

Durante as execuções do SG-CTOP, foi analisado o comportamento de cada estratégia por jogo e os seus resultados atingidos para cada companhia aérea. Assim, seria possível identificar se existia o Equilíbrio de Nash nas negociações do CTOP, e se, este equilíbrio se comportaria da mesma maneira nos possíveis casos.

A Figura 8.26 apresenta Equilíbrio de Nash para o caso 1; 2 e 3, conforme apresentado na Figura 6.2, referente a proporção de voos de cada companhia aérea em cada demanda CTOP. Seguindo a mesma lógica, a Figura 8.27 apresenta para o caso 1, a Figura 8.28 apresenta para o caso 2 e a Figura 8.29 apresenta para o caso 3.

É importante ressaltar que o equilíbrio foi alcançado em dois casos:

- 1x1: A melhor estratégia individual para cada companhia aérea seria alcançada ao enviar uma trajetória + NOSLOT.
- 2x2: A melhor estratégia individual para cada companhia aérea seria alcançada ao enviar duas trajetórias + NOSLOT.

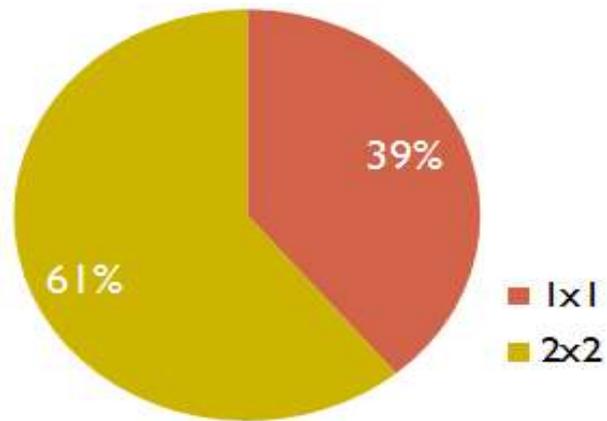


Figura 8.26: Equilíbrio de Nash para os casos 1, 2 e 3

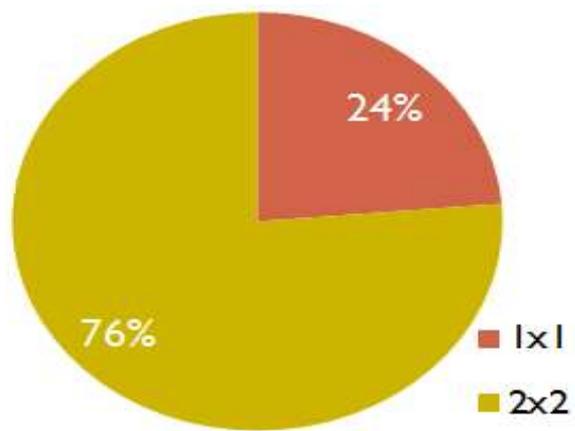


Figura 8.27: Equilíbrio de Nash para o caso 1

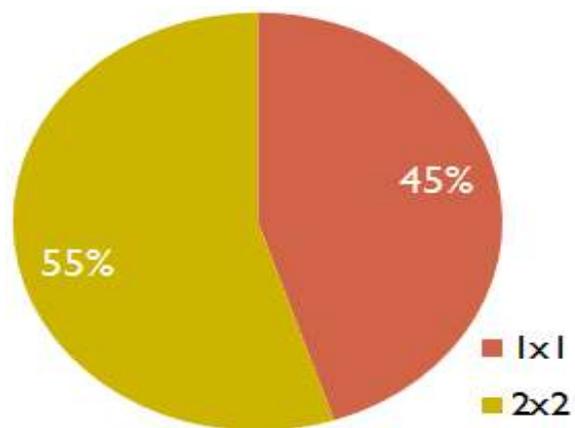


Figura 8.28: Equilíbrio de Nash para o caso 2

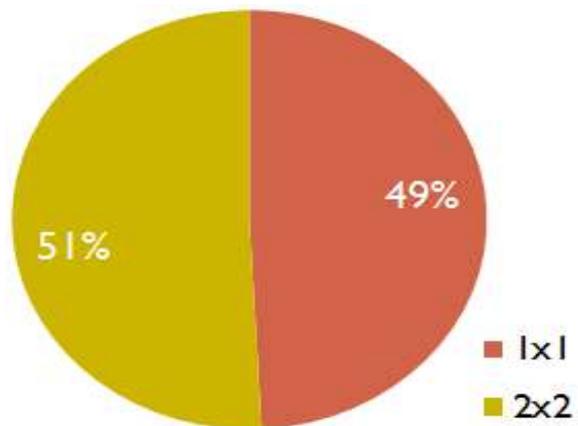


Figura 8.29: Equilíbrio de Nash para o caso 3

Analisando as Figuras 8.26, 8.27, 8.28 e 8.29, verifica-se que:

- No caso geral, onde todas as opções tinham a mesma probabilidade de ocorrer, em 61% dos casos a melhor estratégia individual para cada companhia seria enviar 2 trajetórias + NOSLOT.
- Quando cada companhia aérea tinha a mesma proporção de voos, a melhor estratégia individual para cada companhia seria enviar 2 trajetórias + NOSLOT em 76% dos casos.
- Quando a proporção aumentava de 50% para 67% dos voos da *CompanhiaAéreaA*, a taxa reduzia para 55% ao se enviar 2 trajetórias + NOSLOT.
- Na última opção, quando a *CompanhiaAéreaA* possuía 75%, a taxa reduziu novamente para 51% dos casos ao se enviar 2 trajetórias + NOSLOT.
- Com os resultados apresentados, pode-se inferir que quanto maior a proporção de voos maior a probabilidade de se ter melhores resultados ao enviar 2 trajetórias + NOSLOT.

Capítulo 9

Conclusão

O capítulo irá apresentar as conclusões do trabalho, incluindo a avaliação dos resultados, contribuição da pesquisa e a proposta de trabalhos futuros.

9.1 Análise Conclusiva

O gerenciamento de tráfego aéreo está em constante aprimoramento dos procedimentos para melhorar os níveis de segurança, a fluência de tráfego, a qualidade dos serviços prestados aos clientes finais, dentre outros. Um dos fatores que vem despertando o interesse de todos os envolvidos é a viabilização de procedimentos que possam melhorar os negócios, financeiramente, de, por exemplo, companhias aéreas.

Diante de constatações no mercado e rumo a implementação de sistemas que possam suportar todas as atividades da nova geração no gerenciamento de tráfego aéreo, a *Federal Aviation Administration* colocou em uso, no início de 2014, o *Collaborative Trajectory Options Program*, programa este que vem em direção ao *Next Generation Air Transportation System*.

Verificando-se a necessidade crescente de todos os envolvidos por sistemas de suporte à decisão que possam resolver seus problemas diários ou melhorar o desempenho de determinadas atividades, de maneira inteligente, esta tese atacou um problema direto e atual passado pelas companhias aéreas nos EUA. Problema o qual, ainda está sendo estudado para que, de fato, o comportamento do CTOP seja definido e soluções cada vez mais próximas da realidade cheguem ao mercado.

O ambiente do CTOP foi verificado e estudado, por diversas frentes, para que se fosse possível entender alguns aspectos específicos das negociações neste domínio. Resultando deste estudo, foi criado um processo de decisão TOS para o CTOP, o qual indicou que o problema pode ser resolvido em dois níveis. O primeiro atacando o problema quando não existe nenhuma informação dos possíveis competidores ou estratégias; e o segundo buscando um aprendizado a partir da primeira negociação, a fim de que a companhia aérea possa se adequar ao identificar que seu concorrente mudou de estratégia ou o ambiente foi alterado.

Para modelar este processo decisório foram desenvolvidas duas soluções: o *Single Games for CTOP* focando a redução global do risco de aumento de atrasos na primeira rodada para realizar a sugestão ao gestor de operações da companhia

aérea de quantas rotas devem ser enviadas em cada conjunto de trajetória de opções no CTOP, e o *Repeated Games for CTOP* considerando como as estratégias utilizadas em cada jogo irão afetar a decisão do concorrente nas próximas disputas e, assim, buscar o aprendizado e melhoria dos resultados.

A complexidade dos problemas, assim como das soluções, está crescendo cada vez mais. Desta forma, se torna mais crítico ao se considerar o gerenciamento de tráfego aéreo, o qual lida diretamente com vidas e enfrenta grandes dificuldades na aceitação do uso de certos sistemas no dia a dia. Esta é uma barreira a ser sempre considerada no momento da criação dos modelos neste domínio.

A Inteligência Artificial se faz cada vez mais presente neste domínio. Diversas aplicações e combinações vem sendo utilizadas por autores, tanto para encontrar uma primeira solução, quanto para buscar uma melhoria contínua. Assim, nesta tese foram utilizadas técnicas como: Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço combinadas com a Teoria dos Jogos, a qual apresentou resultados satisfatórios para ambos os modelos computacionais.

O processo de decisão utilizado hoje por cada companhia aérea ainda está sendo definido pelos envolvidos. Existe uma dificuldade de se agir dentro do CTOP, devido a incerteza envolvida em grande parte dos procedimentos. Um significativo ganho deste trabalho foi apresentar e modelar, em si, o problema da definição da quantidade de opções de trajetórias, além da apresentação de novos conhecimentos quanto ao comportamento do CTOP com o tempo.

Computacionalmente, foram desenvolvidas duas soluções que executam suas atividades necessárias em tempo adequado para uso do especialista, não utilizam premissas que não estão disponíveis no momento do início de cada demanda CTOP, não restringem as soluções a ambientes específicos, os resultados alcançados se provaram equilibrados dentro das negociações, dentre outros ganhos.

O conjunto de algoritmos e funções de avaliação que foram apresentados nesta tese trouxeram um ganho considerável para a utilização de modelos inteligentes na modelagem de problemas complexos de decisão. Ao se comparar com a solução atual utilizada, por meio de algoritmos *greedy*, foi possível disponibilizar às companhias aéreas dois modelos que, de fato, são possíveis de serem utilizados na prática com as diretrizes atuais do CTOP.

Utilizando-se de dados reais, foram gerados dois estudos de caso nos quais duas companhias aéreas disputavam os melhores *slots* disponíveis no âmbito do CTOP. Os resultados alcançados pelos dois modelos se mostraram promissores para a utilização pelas companhias aéreas. Foram executados dois estudos de caso, gerando 20.000 negociações em CTOP, assim, retratando os mais diversos casos e estratégias utilizadas dentro do CTOP.

O modelo SG-CTOP alcançou um desempenho superior, ou igual, em 97% dos casos, quando comparado com as melhores estratégias atuais, reduzindo em 537 horas de atrasos para uma determinada companhia. Quanto ao modelo RG-CTOP, foi alcançada uma taxa de melhoria aproximada de 21%, para uma determinada companhia aérea, ao se considerar o aprendizado e adaptação de estratégias frente aos seus concorrentes na disputa dos melhores *slots* em cada demanda CTOP.

Assim, a proposta desta tese se mostrou inovadora na abordagem utilizada,

ao se resolver um problema prático das companhias aéreas no CTOP, com a modelagem via Teoria dos Jogos e sistemas inteligentes.

9.2 Pesquisa Futura

Ao se verificar que o *Collaborative Trajectory Options Program* foi colocado em operação a pouco mais de 18 meses, existem ainda diversos pontos a serem estudados e melhorados. Como alguns destes pontos, são possíveis citar:

- A utilização de mais companhias aéreas neste modelo, a fim de se verificar novos cenários de negociações.
- A criação de mais estratégias para cada caso específico apresentado, quanto a proporção dos voos.
- A implantação métodos que possam aumentar o desempenho computacional, após a implantação de mais companhias ou estratégias.
- A utilização de mais FCA's, em paralelo e sequencial, dentro do modelo, assim como, a análise de impacto quando estas FCA's estão próximas de aeroportos de grande movimentação ou em rotas super ocupadas.
- Verificação do impacto na definição de trajetórias quando o CTOP é divulgado com menos de 30 minutos.

Ainda, como um trabalho futuro, seria possível a realização de um estudo inicial para a implantação do CTOP no Brasil. Considerando as devidas proporções com o gerenciamento de tráfego aéreo nos EUA, o conceito e as necessidades das companhias aéreas podem ser verificadas, a fim de se melhorar o negócio dos envolvidos no ambiente brasileiro.

Referências Bibliográficas

- [1] ADRIAN, M., AND CHAMBERLIN, D. Orbitz worldwide uses hadoop to unlock the business value of 'big data'. *Gartner* (2012).
- [2] AGOGINO, A., AND TUMER, K. Distributed agent-based air traffic flow management. *proceedings of the Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* (2007).
- [3] AGOGINO, A., AND TUMER, K. Regulating air traffic flow with coupled agents. advances in complex systems. *Proceedings of 7th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (2008).
- [4] AGOGINO, A., AND TUMER, K. Learning indirect actions in complex domains: Action suggestions for air traffic control advances in complex systems. *World Scientific Company* (2009).
- [5] AGRAWAL, R., AND SHAFER, J. C. Parallel mining of association rules. In *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine Transactions on Knowledge and Data Engineering* (1996), vol. 8, pp. 962–969.
- [6] ALBA, E., AND MENDOZA, M. Bayesian forecasting methods for short time series. *The International Journal of Applied Forecasting* (2007).
- [7] ALMEIDA, C. R. F. D. Análise de múltiplos algoritmos aplicados em balanceamento de fluxo em rede. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2010.
- [8] ALVES, D., WEIGANG, L., AND SOUZA, B. Reinforcement learning to support metalevel control in air traffic management. In *Reinforcement Learning - Theory and Applications* (2008).
- [9] ALVES, D. P. Modelagem de aprendizagem por reforço e controle em nível meta para melhorar a performance da comunicação em gerência de tráfego aéreo. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2006.
- [10] ANAC. *Justificativa da Portaria 676*. [Online] Disponível: <http://www.anac.gov.br/>, 2009.
- [11] ANAC. *Nota à Imprensa em 15/07/2010*. [Online] Disponível: <http://www.anac.gov.br/>, 2010.

- [12] ANDREWS, J. W. The shortfall in airport capacity and opportunities for mitigation. *Transportation Analysis* 1, 1 (1999), 75–94.
- [13] ARRUDA JR, A. C., WEIGANG, L., AND CRUCIOL, L. L. B. V. A evolução da tomada de decisão colaborativa no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. *SITRAER 2014 Air Transportation Symposium* (2014).
- [14] ARRUDA JR, A. C. D. Aprendizagem por reforço aplicada à análise de impacto no controle de fluxo de tráfego aéreo. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2009.
- [15] ATKIN, J. A. D., BURKE, E. K., AND RAVIZZA, S. A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding. *5th Multidisciplinary International Scheduling Conference* (2011).
- [16] BALL, M. O., HOFFMAN, R., AND MUKHERJEE, A. Ground delay program planning under uncertainty based on the ration-by-distance principle. *Transportation Science* 44 (2010).
- [17] BAYEN, A. M., GRIEDER, P., MEYER, G., AND TOMLIN, C. J. Lagrangian delay predictive model for sector-based air traffic flow. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics* 28 (2005), 1015–1026.
- [18] BERGER, U. Fictitious play in 2xn games. *Journal of Economic Theory* 120 (2005), 139–154.
- [19] BERGER, U. Brown’s original fictitious play. *Journal of Economic Theory* 135 (2007), 572–578.
- [20] BERRY, M. J. A., AND LINOFF, G. *Data mining techniques*. John Wiley Sons, 1997.
- [21] BERTSIMAS, D., AND GUPTA, S. Fairness in air traffic flow management. *INFORMS Meeting* (2009).
- [22] BERTSIMAS, D., NOHADANI, O., AND TEO, K. M. *Robust optimization for unconstrained simulation-based problems*. 2009.
- [23] BEULENS, A., AND VAN NUNEN, J. The use of expert system technology in dss. *Decision Support Systems* 4 (1988), 421–431.
- [24] BIANCHI, R., MARTINS, M., RIBEIRO, C., AND COSTA, A. Heuristically-accelerated multiagent reinforcement learning. *IEEE Transactions on Cybernetics* 18 (2014), 252–265.
- [25] BOISSIER, O., DEMAZEAU, Y., AND SICHMAN, J. When can knowledge-based systems be called agents? *IX Simpósio Brasileiro de Inteligência Artificial - SBC* (2001).
- [26] BOSUNG, K. *Two-Stage Combinatorial Optimization Framework For Air Traffic Flow Management Under Constrained Capacity*. Tese de doutorado, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2015.

- [27] BOSUNG, K., AND CLARKE, J.-P. Optimal airline actions during collaborative trajectory options programs. *AGIFORS 54th Annual Symposium* (2014).
- [28] BREITNER, C. A. Data warehousing and olap: Delivering just-in-time information for decision support. In *Proceedings of the 6th International Workshop for Econometrics* (1987), vol. 6.
- [29] BRIOT, J. P., AND DEMAZEAU, Y. *Principes et architecture des systèmes multi-agents*. 2002.
- [30] BROWN, G. *Iterative Solutions of Games by Fictitious Play*. Wiley, 1951.
- [31] BROWN, M. D. Air traffic control using virtual stationary automata. Dissertação de mestrado, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [32] CABENA, P., HADJINIAN, P., STADLER, R., VERHEES, J., AND ZANASI, A. *Discovering Data Mining: From Concept to Implementation*. Prentice Hall, 1998.
- [33] CARVALHO, L. F., AND ALVES, C. J. P. O desafio da infra-estrutura aeroportuária para a copa do mundo de 2014. *Anais do 15 Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA XV ENCITA* (2009).
- [34] CASTRO, A. J. M., AND OLIVEIRA, E. Using specialized agents in a distributed mas to solve airline operations problems: a case study. *International Conference on Intelligent Agent Technology* (2007).
- [35] CHAUDHURT, S., AND DAYAL, U. An overview of data warehousing and olap technology. In *ACM SIGMOD* (1997), vol. 26, pp. 65–74.
- [36] CHEN, B., AND CHENG, H. A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11 (2010), 485–497.
- [37] CHENG, T., CUI, D., AND CHENG, P. Data mining for air traffic flow forecasting: a hybrid model of neural network and statistical analysis. In *Proceedings 2003 IEEE Intelligent Transportation Systems* (2003), vol. 1, pp. 211–215.
- [38] CHUNG, H. M., AND GRAY, P. Special section: Data mining. *Journal of Management Information Systems* 1 (1999), 11–17.
- [39] CISCO. The zettabyte era trends and analysis. Technical report, 2013.
- [40] COMAER, C. A. *CIRPV 63-5, Serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo*. [Online] Disponível: <http://www.cgna.gov.br/>, 2005.
- [41] CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., AND RIVEST, R. L. *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill, 1998.

- [42] COURNOT, A. A. *Researches into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth*. A. M. Kelley, New York, 1897.
- [43] CRESPO, A. M. F. Aprendizagem por reforço aplicada ao gerenciamento tático do fluxo de tráfego aéreo. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2010.
- [44] CRESPO, A. M. F., AQUINO, C. V., DE SOUZA, B. B., WEIGANG, L., MELO, A. C. M. A., AND ALVES, D. P. Sistema distribuído de apoio a decisão aplicado ao gerenciamento tático do fluxo de tráfego: Caso cindacta i. *Simpósio de Transporte Aéreo - SITRAER VI* (2007).
- [45] CRUCIOL, L. L. B. V. Modelagem de apoio à decisão para o problema de espera no ar utilizando sistemas multiagentes e aprendizagem por reforço. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2012.
- [46] CRUCIOL, L. L. B. V., ARRUDA JR, A. C., WEIGANG, L., LI, L., AND CRESPO, A. Reward functions for learning to control in air traffic flow management. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies 35* (2013), 141–155.
- [47] CRUCIOL, L. L. B. V., CLARKE, J.-P., AND WEIGANG, L. Trajectory option set planning optimization under uncertainty in ctop. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (2015).
- [48] CRUCIOL, L. L. B. V., OLIVEIRA, L. P., WEIGANG, L., ALVES, C. J. P., AND MORA-CAMINO, F. Integração do processo de tomada de decisão colaborativa para os aeroportos no brasil. *SITRAER 2014 Air Transportation Symposium* (2014).
- [49] CRUCIOL, L. L. B. V., AND WEIGANG, L. Ahpm as a proposal to improve interaction with air traffic controllers. *15th International Conference on Human-Computer Interaction 4* (2013), 648–657.
- [50] CRUCIOL, L. L. B. V., WEIGANG, L., DE BARROS, A., AND KOENDJIBIHARIE, M. Air holding problem solving with reinforcement learning to reduce airspace congestion. *Journal of Advanced Transportation 1* (2014).
- [51] CRUCIOL, L. L. B. V., WEIGANG, L., LI, L., AND CLARKE, J.-P. In-flight cost optimization for air traffic flow management using data mining method on big data. *1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization 1* (2014), 1491–1498.
- [52] CRUCIOL, L. L. B. V., WEIGANG, L., AND PAMPLONA, D. A. Intelligent optimization on slots negotiation in collaborative trajectory options program. *SITRAER 2015 Air Transportation Symposium* (2015).
- [53] DAYAN, P., AND WATKINS, C. J. C. H. Machine learning. Tech. rep., 1992.

- [54] DECEA. *Regras do ar e serviços de tráfego aéreo. ICA 100-12*. [Online] Disponível: <http://publicacoes.decea.gov.br/>, 2006.
- [55] DECEA. *Gerenciamento do Tráfego Aéreo*. 2014.
- [56] DEVLIN, B. A., AND MURPHY, P. T. An architecture for a business and information system. *IBM Systems Journal* 27 (1988).
- [57] EUROCONTROL. Directions of work for enhancing the asm/atfcm/ats processes in the short to medium term 2012-2017. Technical report, 2011.
- [58] EUROCONTROL. European route network improvement plan: Part 3 - airspace management handbook guidelines for airspace management. Technical report, 2012.
- [59] EUROCONTROL, AND FAA. 2013 comparison of air traffic management-related 2013 operational. Technical report, 2014.
- [60] FAA. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge - FAA-H-8083-25A*. 2008.
- [61] FAA. *NextGen Implementation Plan*. Washington, DC, 2012.
- [62] FAA. *This is CTOP - An introduction to the Collaborative Trajectory Options Program (CTOP), and the benefits to the users who participate*. 2012.
- [63] FAA. *Advisory Circular 90-115*. 2014.
- [64] FAA. *Collaborative Trajectory Options Program - FAQ*. 2014.
- [65] FAA. Ctop awareness items for flight operators. Technical report, 2014.
- [66] FAA. *Introduction to Collaborative Trajectory Options Program (CTOP)*. 2014.
- [67] FAA. *Playbook - Air Traffic Control System Command Center*. 2015.
- [68] FARIA, C. A. *Teoria dos Grafos Conceitos e Aplicações*. Notas de aula: Estudo e Análise de Redes de Transportes. 2006.
- [69] FAYYAD, U., PIATETSKY-SHAPIRO, G., SMITH, P., AND UTHURUSAMY, R. Advances in knowledge discovery and data mining. In *AAAI* (1996), MIT Press.
- [70] FEOFILLOF, P. *Exercícios de Teoria dos Grafos*. [Online] Disponível: <http://www.ime.usp.br/>, 2009.
- [71] FIANI, R. *Teoria dos Jogos: com Aplicações em Economia, Administração e Ciências Sociais*, vol. 3. Campus, Rio de Janeiro, 2009.

- [72] FRANKOVICH, M., AND BERTSIMAS, D. Air traffic flow management at airports: A unified optimization approach. *Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar* (2013).
- [73] FRIEDMAN, J. A non-cooperative equilibrium for supergames. *Review of Economic Studies* 38 (1971), 112.
- [74] FUDENBERG, D., AND LEVINE, D. *The Theory of Learning in Games*. MIT Press, 1998.
- [75] GALVÃO, D. Q. O caso brasileiro: Usuários e concessionários. *Seminário Internacional Sobre Concessão de Aeroportos* (2008).
- [76] GARTNER. Information management goes 'extreme': The biggest challenges for 21st century cios. Technical report, 2011.
- [77] GILBOA, I., KALAI, E., AND ZEMEL, E. On the order of eliminating dominated strategies. *Operation Research Letters* 9 (1990), 85–89.
- [78] GOEBEL, M., AND GRUENWALD, L. A survey of data mining and knowledge discovery software tools. In *SIGKDD Explorations* (1999).
- [79] GOLFARELLI, M., RIZZI, S., AND CELLA, I. Beyond data warehousing: what's next in business intelligence? *The 7th ACM international workshop on Data warehousing and OLAP* (2004), 16.
- [80] GOLIBERSUCH, M. Ctop assignment algorithm and substitution processing. *FAA PMO Industry Forum 2012 AJM-222* (2012).
- [81] GROTH, R. *Data mining*. Prentice Hall, 1998.
- [82] HAN, S., AND DELAURENTIS, D. Air traffic demand forecast at a commercial airport using bayesian networks. In *11th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference* (2011).
- [83] HAND, D., MANNILA, H., AND SMYTH, P. *Principles of Data Mining*. MIT Press, 2001.
- [84] HARRIS, D. Obamas big data plans: Lots of cash and lots of open data. *Gigaom* (2012).
- [85] HILBERT, M., AND LÓPEZ, P. The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. *Science* (2011).
- [86] HOFFMAN, R., HALL, W., BALL, M., ODONI, A., AND WAMBSGANSS, M. Collaborative decision making in air traffic flow management. *NEXTOR Research Report* (1999).
- [87] IATA. Privatização de aeroportos: Uma visão para o futuro. *Seminário ANAC* (2008).
- [88] ICAO. *Introduction of the Collaborative Trajectory Options Program*. 2012.

- [89] IDC. *The 2011 IDC Digital Universe Study*. Patrocinado por EMC Corporation, MA, USA, Junho 2011.
- [90] INFRAERO. *Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro*. [Online] Disponível: <http://www.infraero.gov.br/>, 2010.
- [91] INFRAERO. *Investimentos da Infraero em Aeroportos da Copa do Mundo de 2014*. [Online] Disponível: <http://www.infraero.gov.br/>, 2010.
- [92] INMON, W. H. *Building the Data Warehouse*, 2 ed. John Wiley Sons, 1996.
- [93] IPEA. *Comunicado do Ipea nº 54: Panorama e perspectivas para o transporte aéreo no Brasil e no mundo*. [Online] Disponível: <http://www.ipea.gov.br/>, 2005.
- [94] JENNINGS, N. R. Agent-oriented software engineering. *Proceeding of the 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World 1*, 1647 (1999), 1–7.
- [95] JENNINGS, N. R., FARATIN, P., JOHNSON, M. J., O'BRIEN, P., AND WIEGAND, M. E. Using intelligent agents to manage business processes. *1st Int. Conf. on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology* (1996), 345–360.
- [96] JENNINGS, N. R., AND WOOLDRIDGE, M. *Agent-oriented software engineering*. MIT Press, 2000.
- [97] JENSEN, F. V. *Bayesian Networks and Decicion Graphs*. Springer, 2001.
- [98] JUCHEM, M., AND BASTOS, R. M. Engenharia de sistemas multiagentes: Uma investigação sobre o estado da arte. *PUCRS* (2001).
- [99] KOLLE, A. *The Nature of Learning A study of Reinforcement Learning Methodology*. Ph.d thesis, University of Copenhagen, 2003.
- [100] KULKARNI, D. Integrated use of data mining and statistical analysis methods to analyze air traffic delays. *SAE Technical Paper* (2007).
- [101] LANEY, D. 3d data management: Controlling data volume, velocity, and variety. *Meta Group* (2001).
- [102] LANEY, D. The importance of 'big data': A definition. *Gartner* (2012).
- [103] LAVALLE, S., HOPKINS, M. S., LESSER, E., SHOCKLEY, R., AND KRUSCHWITZ, N. *Big data, analytics and the path from insights to value*. MIT Sloan Management Review, 2010.
- [104] LAZAR, J., FENG, J. H., AND HOCHHEISER, H. *Research methods in human-computer interaction*. Wiley, 2009.

- [105] LEE, P., AND STEWARD, D. Technology, media telecommunications predictions 2012. Technical report, 2012.
- [106] LESSER, V. R. Cooperative multiagent systems: Personal view of the state of the art. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 11, 1 (1999), 133–142.
- [107] LUCKING-REILEY, D. Business-to-business electronic commerce. *The Journal of Economic Perspectives* (2001).
- [108] LUGER, G. F. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, 4th ed. Addison Wesley, 2002.
- [109] MANYIKA, J., CHUI, M., BROWN, B., BUGHIN, J., DOBBS, R., ROXBURGH, C., AND BYERS, A. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity. Technical report, 2011.
- [110] MAS-COLELL, A., WHINSTON, M., AND GREEN, J. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 1995.
- [111] MCKENDRICK, J. The post-relational reality sets in. *Survey on Unstructured Data* (2011).
- [112] MITCHEL, T. *Machine Learning*. McGraw-Hill, 1997.
- [113] MIYAMARU, D. O. Tendências na evolução dos sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo no brasil. *Simpósio de Transporte Aéreo - SITRAER VII* (2008).
- [114] MONDERER, D., AND SHAPLEY, L. Fictitious play property for games with identical interests. *Journal of Economic Theory* 68 (1996), 258–265.
- [115] MONDERER, D., AND SHAPLEY, L. Potential games. *Games and Economic Behavior* 14 (1996), 124–143.
- [116] MOODY, D. L., AND KORTINK, M. A. R. From enterprise models to dimensional models: A methodology for data warehouse and data mart design. In *Proceedings of the International Workshop on Design and Management of Data Warehouses (DMDW)* (2000).
- [117] MYERSON, R. B. *Game Theory: Analysis of Conflict*. Harvard University Press, 1991.
- [118] NACHBAR, J. Evolutionary selection dynamics in games: Convergence and limit properties. *International Journal of Game Theory* 19 (1990), 59–89.
- [119] NASA. An evaluation of air traffic control complexity. Technical Report Final Report, 1996.
- [120] NASH JR., J. F. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 36 (1950), 48–49.

- [121] NAU, D., GHALLAB, M., AND TRAVERSO, P. *Automated Planning: Theory and Practice*. Prentice Hall, 2004.
- [122] NBAA. *FAA's New CTOP Initiative Aims to Reduce Airspace Congestion*. 2012.
- [123] NBAA. *Collaborative Trajectory Options Program (CTOP)*. 2014.
- [124] NISAN, N., ROUGHGARDEN, T., TARDOS, E., AND VAZIRANI, V. V. *Algorithmic Game Theory*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2007.
- [125] NOVAK, M., SOMERSALL, P., AND WOLFORD, D. Ctop industry day, a seminar on the collaborative trajectory options program. Technical report, 2010.
- [126] ODONI, A. R. *The Flow Management Problem in Air Traffic Control*, vol. Flow Control of Congested Networks. Berlin, 1987.
- [127] PAMPLONA, D. A., WEIGANG, L., AND CRUCIOL, L. L. B. V. Collaborative trajectory options program: Present and future scope. *SITRAER 2015 Air Transportation Symposium (2015)*.
- [128] PEARCE, R. The next generation air transportation system: Transformation starts now. *ATCA Journal of Air Traffic Control (2006)*.
- [129] PEARL, J. Evidential reasoning using stochastic simulation of causal models. In *Artificial Intelligence (1987)*, vol. 32, pp. 245–258.
- [130] PENHALLEGON, W. J., MENDOLIA, A. S., BONE, R. S., ORRELL, G. L., AND STASSEN, H. P. Flight deck-based interval management-spacing during departures: Flight crew human-in-the-loop simulation. *Ninth USA-Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (2011)*.
- [131] PEREIRA, I. C. C. D. S. P. G. *Sistema Multi-Agente para Apoio à Negociação em Mercados de Electricidade*. Tese de doutorado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2004.
- [132] PETTEY, C. Gartner identifies the top 10 strategic technologies for 2012. *Gartner (2012)*.
- [133] PETTEY, C., AND GOASDUFF, L. Gartner says solving big data challenge involves more than just managing volumes of data. *Gartner (2011)*.
- [134] PIATETSKY-SHAPIRO, G., BRACHMAN, R., KHABAZA, T., KLOESGEN, W., AND SIMOUDIS, E. An overview of issues in developing industrial data mining and knowledge discovery applications. In *In Proceedings of KDD-96 (1996)*, AAAI Press.

- [135] POZZI, S., LOTTI, G., MATRELLA, G., AND SAVE, L. Turning information into knowledge: The case of automatic safety data gathering. In *EUROCONTROL Annual Safety RD Seminar* (2008).
- [136] POZZI, S., VALBONESI, C., BEATO, V., VOLPINI, R., GIUSTIZIERI, F. M., LIEUTAUD, F., AND LICU, A. Safety monitoring in the age of big data: From description to intervention. In *Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2011)* (2011).
- [137] RATLIFF, J. A folk theorem sampler. *A set of introductory notes to the Folk Theorem* (1996).
- [138] REIS, L. P. *Coordination in Multi-Agent Systems: Applications in University Management and Robotic Soccer*. Ph.d thesis, Universidade do Porto, 2003.
- [139] RIBEIRO, V. F., RIBEIRO, W. R. J., ARRUDA JR, A. C., CRESPO, A. M. F., TIMOSZCZUK, A. P., AND WEIGANG, L. Previsão de cenário para o controle de tráfego aéreo do cindacta i. *Simpósio de Transporte Aéreo - SITRAER VII* (2008).
- [140] RIOS, J., AND ROSS, K. Delay optimization for airspace capacity management with runtime and equity considerations. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit* (2007).
- [141] RIOS, J., AND ROSS, K. Solving high fidelity, large-scale traffic flow management problems in reduced time. In *Proceedings of The 8th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation* (2008).
- [142] RITZEL, M., AND PRETZ, E. Agentes de software para jogos educacionais. *IX International Symposium on Computers in Education* (2007).
- [143] RIZZI, J. A. Um modelo matemático de auxílio para o problema de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. Dissertação de mestrado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2003.
- [144] ROBINSON, J. An iterative method of solving a game. *Annals of Mathematics* 54 (1951), 296–301.
- [145] ROLIM, T. H. L., PORTELA, T. A. A., AND ALMEIDA, R. T. O controle do espaço aéreo. Technical Report External Release Version, 2004.
- [146] ROTH, A., AND SOTOMAYOR, M. Two-sided matching: A study in game-theoretic modeling and analysis. *Econometric Society Monograph* 18 (1990).
- [147] RUBINSTEIN, A. Equilibrium in supergames with the overtaking criterion. *Journal of Economic Theory* 21 (1979), 19.
- [148] RUSSEL, S., AND NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 2002.

- [149] RUSSOM, P. Big data analytics. Technical report, 2011.
- [150] SAVVAS, A. *IBM: Businesses unable to analyse 90 percent of their data*. 2011.
- [151] SCHAFFER, C. A conservation law for generalization performance. In *The 1994 International Conference on Machine Learning* (1994), Morgan Kaufmann.
- [152] SCHMARZO, B. *Big Data Analytics*. EMC, 2011.
- [153] SCHUMMER, J., AND VOHRA, R. V. Assignment of arrival slots. *American Economic Journal: Microeconomics* 5 (2013), 164–185.
- [154] SHAPLEY, L. *Some Topics in Two-Person Games*. Princeton University Press, 1964.
- [155] SKALTSAS, G., RAKAS, J., AND KARLAFTIS, M. G. An analysis of air traffic controller-pilot miscommunication in the nextgen environment. *Journal of Air Transport Management* 27 (2013), 4651.
- [156] SOTOMAYOR, M., AND BUGARIN, M. S. *Lições de Teoria dos Jogos*. 2007.
- [157] SOUZA, B. B. D. Modelo de balanceamento com multifluxos para aplicação em gerenciamento de tráfego aéreo. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2008.
- [158] SRIDHAR, B., SHETH, K. S., AND GRABBE, S. Airspace complexity and its application in air traffic management. *2nd USA and Europe Air Traffic Management RD Seminar* (1998).
- [159] STANISCIJA, G. F., AND DALMOLIM FILHO, L. Atm modernisation: Air traffic control facilities in brazil have undergone a huge modernisation and increase in service capacity. *Air Traffic Technology International* (2008), 74–76.
- [160] STOLTZ, S., AND KY, P. Reducing traffic bunching through a more flexible air traffic flow management. *4th USA and Europe ATM RD Seminar* (2001).
- [161] SUTTON, R., AND BARTO, A. *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, 1998.
- [162] SWENSON, H., BARHYDT, R., AND LANDIS, M. Next generation air transportation system (ngats), air traffic management (atm) airspace project. Technical Report External Release Version, 2006.
- [163] SZWARCFITER, J. L. *Grafos e Algoritmos Computacionais*, 1 ed., vol. 1. Editora Campus, 1984.
- [164] TARGA, C. J. P., AND MAHLER, M. J. Uma ferramenta automatizada no auxílio à alocação de slots para o problema de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo brasileiro. Dissertação de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2001.

- [165] TIKHONOV, A. N., AND ARSEININ, V. Y. *Solutions of Ill-Posed Problems*. Wiley, NY, USA, 1977.
- [166] TIMOSZCZUK, A., PIZZO, W., STANISCIA, G., AND SIEWERDT, E. *The SYNCROMAX solution for air traffic flow management in Brazil*. in Computational Models, Software Engineering, and Advanced Technologies in Air Transportation: Next Generation Applications. Hershey, 2009.
- [167] TIROLE, J. *The Theory of Industrial Organization*. MIT Press, 1988.
- [168] TOMLIN, C., PAPPAS, G., AND SASTRY, S. Conflict resolution for air traffic management: A study in multiagent hybrid systems. *IEEE Transaction on Automatic Control* (1998), 43(4):509–521.
- [169] VIVES, X. *Oligopoly pricing*. MIT Press, 1999.
- [170] VON NEUMANN, J., AND MORGENSTERN, O. *The Theory of Games and Economics Behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [171] WASLANDER, S. L., ROY, K., JOHARI, R., AND TOMLIN, C. J. Lump-sum markets for air traffic flow control with competitive airlines. In *Proceedings of The IEEE - Special Issue on Aviation Information Systems* (2008).
- [172] WATKINS, C. J. C. H. *Learning From Delayed Rewards*. Ph.d thesis, University of Cambridge, 1989.
- [173] WATTERSON, K. Second generation data. *SunExpert Magazine* (1998), 58–65.
- [174] WEIGANG, L. *Knowledge-Based System for Air Traffic Flow Management: Time Table Rescheduling and Centralized Flow Control*. Tese de doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronautica, ITA, São José dos Campos, São Paulo, 1994.
- [175] WEIGANG, L., ALVES, C. J. P., AND OMAR, N. An expert system for air traffic flow management. *Journal of Advanced Transportation*, 6:640-647 31, 3 (1997), 343–361.
- [176] WEISS, G. *Multi-agent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, 2002.
- [177] WEISS, G. *Multiagent Systems, Artificial Societies and Simulated Organizations*. Springer, 2005.
- [178] WHITE, J. A survey of applications of markov decision process. *The Journal of the Operational Research Society* (1993).
- [179] WOLF, S. R. Supporting air traffic flow management with agents. *American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium: Interaction Challenges for Intelligent Assistants* (2007).

- [180] YE, X., KAMATH, G., AND OSADCIW, L. A. Using bayesian inference for sensor management of air traffic control systems. In *Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)* (2009), pp. 23–29.
- [181] ZANIN, M., PEREZ, D., KOLOVOS, D., PAIGE, R., CHATTERJEE, K., HORST, A., AND RUMPE, B. On demand data analysis and filtering for inaccurate flight trajectories. In *Proceedings of the SESAR Innovation Days* (2011), EUROCONTROL.
- [182] ZHANG, Z., GAO, W., AND WANG, L. Short-term flow management based on dynamic flow programming network. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6:640-647 (2005), 640–647.
- [183] ZHOU, D., BOUSQUET, O., LAL, T., WESTSON, J., AND SCHLKOPF, B. Learning with local and global consistency. In *Advances in Neural Information Processing System 16* (2004), MIT Press, pp. 321–328.

Apêndice A

Voos Utilizados no Estudo de Caso SG-CTOP

A.1 Aeroporto Internacional de *Newark*

A Tabela A.1 apresenta os voos com chegada no *Aeroporto Internacional de Newark* (EWR) em *Newark* e origem dos seguintes aeroportos:

Voo	Tipo	Origem	Partida	Chegada
A1	B739	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Ter 10:21PM PST	Qua 05:24AM EST
A2	B739	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Ter 10:21PM PST	Qua 06:07AM EST
A3	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Ter 11:40PM PST	Qua 07:50AM EST
A4	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Ter 11:55PM PST	Qua 08:11AM EST
A5	CRJ7	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:00AM CST	Qua 09:00AM EST
A6	B739	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:00AM CST	Qua 09:07AM EST
A7	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:15AM EST	Qua 10:12AM EST
A8	CRJ7	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:08AM CST	Qua 10:17AM EST
A9	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:30AM CST	Qua 10:35AM EST
A10	E7W	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 06:41AM CST	Qua 11:00AM EST
A11	B752	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:32AM CST	Qua 11:15AM EST
A12	A320	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 08:32AM EST	Qua 11:30AM EST
A13	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 07:15AM CST	Qua 11:31AM EST
A14	B737	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 08:05AM CST	Qua 12:30PM EST
A15	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 09:40AM CST	Qua 12:55PM EST
A16	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 10:30AM CST	Qua 01:39PM EST

A17	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 10:38AM CST	Qua 01:53PM EST
A18	B739	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 10:54AM EST	Qua 01:53PM EST
A19	B763	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 05:41AM PST	Qua 01:57PM EST
A20	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 10:02AM CST	Qua 02:11PM EST
A21	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 06:00AM PST	Qua 02:22PM EST
A22	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 09:58AM CST	Qua 02:30PM EST
A23	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:20AM CST	Qua 02:31PM EST
A24	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:30AM CST	Qua 02:32PM EST
A25	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:22PM EST
A26	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:24PM EST
A27	B738	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 07:31AM PST	Qua 03:28PM EST
A28	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 12:35PM EST	Qua 03:36PM EST
A29	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:52AM PST	Qua 04:16PM EST
A30	B763	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:00PM CST	Qua 04:17PM EST
A31	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 12:05PM CST	Qua 04:21PM EST
A32	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 08:00AM PST	Qua 04:22PM EST
A33	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 08:05AM PST	Qua 04:30PM EST
A34	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:25AM PST	Qua 04:30PM EST
A35	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:15PM EST	Qua 05:09PM EST
A36	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:55PM CST	Qua 05:16PM EST
A37	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 09:00AM PST	Qua 05:20PM EST
A38	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 09:00AM PST	Qua 05:28PM EST
A39	B752	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 09:50AM PST	Qua 05:46PM EST
A40	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:45PM EST	Qua 05:55PM EST
A41	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 10:00AM PST	Qua 06:22PM EST

A42	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:15PM CST	Qua 06:24PM EST
A43	B733	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 01:54PM CST	Qua 06:25PM EST
A44	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:15AM PST	Qua 06:29PM EST
A45	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 10:45AM PST	Qua 07:15PM EST
A46	B739	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:05PM CST	Qua 07:16PM EST
A47	A306	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 03:10PM CST	Qua 07:17PM EST
A48	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 03:05PM CST	Qua 07:29PM EST
A49	A320	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 04:23PM EST	Qua 07:29PM EST
A50	CRJ7	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:44PM CST	Qua 07:48PM EST
A51	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 11:31AM PST	Qua 07:53PM EST
A52	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 11:30AM PST	Qua 07:54PM EST
A53	B738	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 12:17PM PST	Qua 08:10PM EST
A54	B739	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:05PM CST	Qua 08:23PM EST
A55	B739	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:20PM EST	Qua 08:23PM EST
A56	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 12:16PM PST	Qua 08:29PM EST
A57	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 12:35PM PST	Qua 08:51PM EST
A58	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 04:45PM CST	Qua 08:56PM EST
A59	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 01:00PM PST	Qua 09:05PM EST
A60	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:59PM CST	Qua 09:18PM EST
A61	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 01:35PM PST	Qua 09:50PM EST
A62	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:45PM CST	Qua 09:54PM EST
A63	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 02:00PM PST	Qua 10:13PM EST
A64	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:15PM CST	Qua 10:22PM EST
A65	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 02:10PM PST	Qua 10:30PM EST
A66	E7W	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 06:22PM CST	Qua 10:47PM EST

A67	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:59PM EST	Qua 10:59PM EST
A68	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 06:45PM CST	Qua 11:01PM EST
A69	B733	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 03:30PM PST	Qua 11:16PM EST
A70	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 03:00PM PST	Qua 11:23PM EST
A71	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 09:02PM CST	Qui 12:12AM EST
A72	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 09:24PM EST	Qui 12:25AM EST
A73	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 04:20PM PST	Qui 12:30AM EST
A74	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 08:20PM CST	Qui 12:36AM EST
A75	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 09:45PM CST	Qui 12:43AM EST
A76	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 04:30PM PST	Qui 12:53AM EST

Tabela A.1: Voos da companhia aérea A com chegada no EWR durante o período do CTOP

A Tabela A.2 apresenta os voos com chegada no *Aeroporto Internacional John F. Kennedy* (JFK) em *New York* e origem dos seguintes aeroportos:

Voo	Tipo	Origem	Partida	Chegada
A1	B744	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:45AM EST	Qua 04:55AM EST
A2	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Ter 11:20PM PST	Qua 07:50AM EST
A3	CRJ7	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:00AM CST	Qua 09:16AM EST
A4	B712	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:00AM EST	Qua 09:55AM EST
A5	B763	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:15AM EST	Qua 10:08AM EST
A6	B752	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 08:55AM EST	Qua 11:52AM EST
A7	CRJ9	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 10:25AM CST	Qua 01:30PM EST
A8	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 10:55AM CST	Qua 01:59PM EST
A9	B763	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 06:15AM PST	Qua 02:36PM EST
A10	CRJ9	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 10:10AM CST	Qua 02:40PM EST
A11	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 06:15AM PST	Qua 02:43PM EST

A12	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 06:30AM PST	Qua 02:49PM EST
A13	MD88	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 12:01PM EST	Qua 02:59PM EST
A14	CRJ9	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 12:00PM CST	Qua 03:15PM EST
A15	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:23PM EST
A16	B763	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 12:40PM EST	Qua 03:32PM EST
A17	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 07:00AM PST	Qua 03:32PM EST
A18	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:30AM PST	Qua 03:49PM EST
A19	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 07:35AM PST	Qua 03:55PM EST
A20	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 07:25AM PST	Qua 04:01PM EST
A21	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 11:50AM CST	Qua 04:20PM EST
A22	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:00AM PST	Qua 04:24PM EST
A23	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:05PM EST	Qua 04:58PM EST
A28	B763	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 08:30AM PST	Qua 04:59PM EST
A24	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:55AM PST	Qua 05:13PM EST
A25	B763	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 08:45AM PST	Qua 05:14PM EST
A26	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 08:40AM PST	Qua 05:17PM EST
A27	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 09:00AM PST	Qua 05:30PM EST
A29	B712	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:33PM EST	Qua 05:39PM EST
A30	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 09:20AM PST	Qua 05:55PM EST
A31	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:20AM PST	Qua 06:40PM EST
A32	CRJ9	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:30PM CST	Qua 06:45PM EST
A33	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:35AM PST	Qua 07:03PM EST
A34	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 10:40AM PST	Qua 07:05PM EST

A35	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 04:55PM EST	Qua 07:51PM EST
A36	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 11:30AM PST	Qua 07:55PM EST
A37	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 11:50AM PST	Qua 08:06PM EST
A38	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 11:33AM PST	Qua 08:10PM EST
A40	CRJ9	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:00PM CST	Qua 08:15PM EST
A39	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 11:50AM PST	Qua 08:18PM EST
A41	E190	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:25PM CST	Qua 08:40PM EST
A42	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 12:15PM PST	Qua 08:45PM EST
A43	B763	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 12:50PM PST	Qua 09:14PM EST
A44	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 01:00PM PST	Qua 09:15PM EST
A45	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 12:45PM PST	Qua 09:20PM EST
A46	B763	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 01:10PM PST	Qua 09:42PM EST
A47	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:35PM CST	Qua 09:56PM EST
A48	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 01:35PM PST	Qua 10:00PM EST
A49	MD88	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:05PM EST	Qua 10:06PM EST
A50	CRJ9	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:55PM CST	Qua 10:09PM EST
A51	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 02:00PM PST	Qua 10:20PM EST
A52	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 02:00PM PST	Qua 10:20PM EST
A53	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 01:50PM PST	Qua 10:29PM EST
A54	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 02:15PM PST	Qua 10:34PM EST
A55	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 02:20PM PST	Qua 10:50PM EST
A56	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 02:40PM PST	Qua 10:52PM EST
A57	A320	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 08:14PM EST	Qua 11:12PM EST
A58	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 03:00PM PST	Qua 11:26PM EST

A59	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 03:15PM PST	Qua 11:32PM EST
A60	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 03:10PM PST	Qua 11:35PM EST
A61	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 03:45PM PST	Qua 11:59PM EST
A62	A320	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 03:45PM PST	Qui 12:07AM EST
A63	B738	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 04:22PM PST	Qui 12:09AM EST
A64	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Qua 03:59PM PST	Qui 12:25AM EST
A65	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 04:15PM PST	Qui 12:27AM EST
A66	A321	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 09:44PM EST	Qui 12:45AM EST
A67	A320	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Qua 04:50PM PST	Qui 12:56AM EST
A68	A321	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 09:55PM PST	Qui 05:36AM EST
A69	A321	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 10:00PM PST	Qui 05:59AM EST
A70	B752	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 10:19PM PST	Qui 06:00AM EST
A71	A321	Int'l de São Francisco (KSFO)	Ter 11:00PM PST	Qua 07:28AM EST
A72	A320	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Qua 11:59PM PST	Qui 07:40AM EST

Tabela A.2: Voos da companhia aérea A com chegada no JFK durante o período do CTOP

A Tabela A.3 apresenta os voos com chegada no *Aeroporto LaGuardia* (LGA) em *New York* e origem dos seguintes aeroportos:

Voo	Tipo	Origem	Partida	Chegada
A1	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 06:05AM EST	Qua 08:57AM EST
A2	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:55AM CST	Qua 08:59AM EST
A3	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:58AM CST	Qua 08:59AM EST
A4	A319	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:00AM CST	Qua 09:12AM EST
A5	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:25AM CST	Qua 09:29AM EST
A6	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:30AM CST	Qua 09:35AM EST
A7	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 06:59AM EST	Qua 09:52AM EST
A8	A319	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:00AM CST	Qua 10:09AM EST

A9	MD88	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:20AM EST	Qua 10:25AM EST
A10	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:25AM CST	Qua 10:33AM EST
A11	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:30AM CST	Qua 10:35AM EST
A12	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 06:40AM CST	Qua 10:52AM EST
A13	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:00AM CST	Qua 11:09AM EST
A14	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:25AM CST	Qua 11:29AM EST
A15	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:30AM CST	Qua 11:35AM EST
A16	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 07:15AM CST	Qua 11:40AM EST
A17	A321	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 07:34AM CST	Qua 12:00PM EST
A18	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 07:49AM CST	Qua 12:00PM EST
A19	A319	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:59AM CST	Qua 12:08PM EST
A20	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 09:30AM CST	Qua 12:35PM EST
A21	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 09:32AM CST	Qua 12:39PM EST
A22	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 09:50AM EST	Qua 12:54PM EST
A23	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 09:50AM CST	Qua 12:59PM EST
A24	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 10:15AM CST	Qua 01:18PM EST
A25	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 10:30AM CST	Qua 01:29PM EST
A26	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 11:00AM EST	Qua 01:55PM EST
A27	A319	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 11:01AM EST	Qua 02:00PM EST
A28	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 09:55AM CST	Qua 02:05PM EST
A29	A319	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:00AM CST	Qua 02:09PM EST
A30	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 10:02AM CST	Qua 02:25PM EST
A31	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:30AM CST	Qua 02:37PM EST
A32	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 11:56AM CST	Qua 03:00PM EST
A33	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 11:00AM CST	Qua 03:15PM EST
A34	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 12:30PM CST	Qua 03:35PM EST
A35	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 12:45PM CST	Qua 03:55PM EST
A36	A319	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:00PM CST	Qua 04:09PM EST
A37	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 11:55AM CST	Qua 04:11PM EST
A38	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 12:10PM CST	Qua 04:35PM EST
A39	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:30PM CST	Qua 04:35PM EST

A40	A320	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 01:35PM EST	Qua 04:35PM EST
A41	B712	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 01:45PM EST	Qua 04:50PM EST
A42	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 01:45PM CST	Qua 04:53PM EST
A43	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 02:08PM EST	Qua 05:00PM EST
A44	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 02:00PM CST	Qua 05:09PM EST
A45	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 01:10PM CST	Qua 05:21PM EST
A46	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 02:30PM CST	Qua 05:35PM EST
A47	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:00PM CST	Qua 06:05PM EST
A48	A319	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:00PM CST	Qua 06:12PM EST
A49	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 02:10PM CST	Qua 06:22PM EST
A50	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:30PM CST	Qua 06:39PM EST
A51	MD88	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 03:45PM EST	Qua 06:51PM EST
A52	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 02:35PM CST	Qua 06:59PM EST
A53	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 04:06PM EST	Qua 06:59PM EST
A54	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 03:55PM CST	Qua 06:59PM EST
A55	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:00PM CST	Qua 07:12PM EST
A56	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 03:15PM CST	Qua 07:30PM EST
A57	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:30PM CST	Qua 07:41PM EST
A58	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 04:40PM CST	Qua 07:48PM EST
A59	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:04PM EST	Qua 08:00PM EST
A60	B737	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:12PM CST	Qua 08:22PM EST
A61	A319	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:30PM EST	Qua 08:31PM EST
A62	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 05:35PM EST	Qua 08:31PM EST
A63	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:30PM CST	Qua 08:36PM EST
A64	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:30PM CST	Qua 08:41PM EST
A65	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 04:40PM CST	Qua 08:52PM EST
A66	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 04:35PM CST	Qua 09:00PM EST
A67	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:05PM CST	Qua 09:08PM EST
A68	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 05:59PM CST	Qua 09:10PM EST

A69	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 05:10PM CST	Qua 09:26PM EST
A70	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:30PM CST	Qua 09:44PM EST
A71	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 06:40PM CST	Qua 09:51PM EST
A72	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 06:59PM EST	Qua 09:55PM EST
A73	B737	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:10PM CST	Qua 10:20PM EST
A74	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 06:20PM CST	Qua 10:34PM EST
A75	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 06:15PM CST	Qua 10:39PM EST
A76	E170	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:30PM CST	Qua 10:40PM EST
A77	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 07:40PM EST	Qua 10:44PM EST
A78	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 07:50PM CST	Qua 10:55PM EST
A79	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 08:00PM EST	Qua 10:59PM EST
A80	A320	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:21PM CST	Qua 11:30PM EST
A81	B738	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 07:20PM CST	Qua 11:31PM EST
A82	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Qua 08:30PM CST	Qua 11:36PM EST
A83	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Qua 08:50PM EST	Qua 11:45PM EST
A84	E170	Dallas/FW Int'l (KDFW)	Qua 07:35PM CST	Qua 11:55PM EST

Tabela A.3: Voos da companhia aérea *A* com chegada no LGA durante o período do CTOP

Apêndice B

Voos Utilizados no Estudo de Caso RG-CTOP

B.1 Aeroporto Internacional de *Dallas/Fort Worth*

A Tabela B.1 apresenta os voos com chegada no *Aeroporto Internacional de Dallas/Fort Worth* (DFW) em *Dallas* e origem dos seguintes aeroportos:

Voo	Tipo	Origem	Partida	Chegada
A1	B752	San Diego Intl (KSAN)	Seg 07:43AM PDT	Seg 12:00PM CDT
A2	B752	Tulsa Intl (KTUL)	Seg 11:23AM CDT	Seg 12:01PM CDT
A3	MD80	Will Rogers World (KOKC)	Seg 11:28AM CDT	Seg 12:04PM CDT
A4	MD80	Adams Field (KLIT)	Seg 11:18AM CDT	Seg 12:06PM CDT
A5	B738	Int'l de Calgary (CYYC)	Seg 07:57AM MDT	Seg 12:11PM CDT
A6	B738	Reagan National (KDCA)	Seg 10:30AM EDT	Seg 12:12PM CDT
A7	B738	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 07:48AM PDT	Seg 12:13PM CDT
A8	B738	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 07:48AM PDT	Seg 12:13PM CDT
A9	MD80	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 11:36AM CDT	Seg 12:15PM CDT
A10	B763	Int'l de Miami (KMIA)	Seg 10:49AM EDT	Seg 12:19PM CDT
A11	B752	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Seg 08:13AM PDT	Seg 12:19PM CDT
A12	B738	Int'l de Boston (KBOS)	Seg 09:46AM EDT	Seg 12:21PM CDT
A13	B738	LaGuardia (KLGA)	Seg 10:11AM EDT	Seg 12:23PM CDT
A14	B763	Int'l de Miami (KMIA)	Seg 10:50AM EDT	Seg 12:23PM CDT

A15	B738	Int'l La Aurora (MGGT / GUA)	Seg 08:33AM CST	Seg 12:25PM CDT
A16	MD80	Eppley Airfield (KOMA)	Seg 11:01AM CDT	Seg 12:25PM CDT
A17	A319	Int'l de Char- lotte/Douglas (KCLT)	Seg 11:10AM EDT	Seg 12:26PM CDT
A18	MD80	Lambert-St Louis Intl (KSTL)	Seg 11:12AM CDT	Seg 12:28PM CDT
A19	B738	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 07:32AM PDT	Seg 12:29PM CDT
A20	MD80	Tampa Intl (KTPA)	Seg 11:13AM EDT	Seg 12:31PM CDT
A21	MD83	Indianapolis Intl (KIND)	Seg 11:47AM EDT	Seg 12:32PM CDT
A22	MD83	Lambert-St Louis Intl (KSTL)	Seg 11:13AM CDT	Seg 12:32PM CDT
A23	A319	Mc Allen Miller Intl (KMFE)	Seg 11:23AM CDT	Seg 12:33PM CDT
A24	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 08:15AM PDT	Seg 12:34PM CDT
A25	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 11:54AM CDT	Seg 12:36PM CDT
A26	MD80	Kansas City Intl (KMCI)	Seg 11:23AM CDT	Seg 12:38PM CDT
A27	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 08:14AM PDT	Seg 12:40PM CDT
A28	MD83	Tucson Intl (KTUS)	Seg 08:57AM MST	Seg 12:41PM CDT
A29	B757	Int'l de Miami (KMIA)	Seg 11:13AM EDT	Seg 12:43PM CDT
A30	MD80	El Paso Intl (KELP)	Seg 10:31AM MDT	Seg 12:44PM CDT
A31	MD80	Lubbock Smith Intl (KLBB)	Seg 12:00PM CDT	Seg 12:49PM CDT
A32	A319	Wichita Mid- Continent (KICT)	Seg 11:56AM CDT	Seg 12:50PM CDT
A33	B738	Reagan National (KDCA)	Seg 11:11AM EDT	Seg 12:51PM CDT
A34	MD83	Albuquerque Intl Sun- port (KABQ)	Seg 10:33AM MDT	Seg 12:53PM CDT
A35	A319	Louisville Intl (KSDF)	Seg 12:16PM EDT	Seg 12:53PM CDT
A36	A319	Int'l de Edmonton (CYEG)	Seg 08:24AM MDT	Seg 12:54PM CDT
A37	MD80	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 12:24PM CDT	Seg 12:58PM CDT
A38	MD83	Ontario Intl (KONT)	Seg 08:32AM PDT	Seg 01:00PM CDT
A39	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 11:23AM CDT	Seg 01:01PM CDT

A40	B77W	Londres Heathrow (EGLL / LHR)	Seg 09:42AM BST	Seg 01:05PM CDT
A41	MD83	General Mariano Es- cobedo Int'l (MMMY / MTY)	Seg 11:55AM CDT	Seg 01:07PM CDT
A42	B738	Int'l Juan Santamaría (MROC / SJO)	Seg 08:26AM CST	Seg 01:08PM CDT
A43	MD80	Colorado Sprgs Muni (KCOS)	Seg 10:51AM MDT	Seg 01:11PM CDT
A44	MD83	San Diego Intl (KSAN)	Seg 08:48AM PDT	Seg 01:13PM CDT
A45	B738	Raleigh-Durham Intl (KRDU)	Seg 11:45AM EDT	Seg 01:17PM CDT
A46	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 08:50AM PDT	Seg 01:19PM CDT
A47	B738	Int'l de Seattle- Tacoma (KSEA)	Seg 07:36AM PDT	Seg 01:22PM CDT
A48	MD83	Sacramento Intl (KSMF)	Seg 08:26AM PDT	Seg 01:24PM CDT
A49	MD83	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 12:47PM CDT	Seg 01:25PM CDT
A50	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 09:03AM PDT	Seg 01:28PM CDT
A51	B738	LaGuardia (KLGA)	Seg 11:25AM EDT	Seg 01:31PM CDT
A52	A319	Int'l de Atlanta Hartsfield-Jackson (KATL)	Seg 12:47PM EDT	Seg 01:32PM CDT
A53	B738	Int'l de Orlando (KMCO)	Seg 12:10PM EDT	Seg 01:34PM CDT
A54	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 08:40AM PDT	Seg 01:34PM CDT
A55	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 12:57PM CDT	Seg 01:36PM CDT
A56	MD80	Jacksonville Intl (KJAX)	Seg 12:32PM EDT	Seg 01:38PM CDT
A57	MD80	Tulsa Intl (KTUL)	Seg 12:53PM CDT	Seg 01:40PM CDT
A58	B738	Int'l de Fort Lauderdale- Hollywood (KFLH)	Seg 12:08PM EDT	Seg 01:41PM CDT
A59	MD83	Portland Intl (KPDJ)	Seg 08:21AM PDT	Seg 01:41PM CDT
A60	MD83	San Jose Int'l (KSJC)	Seg 08:53AM PDT	Seg 01:43PM CDT
A61	MD83	Metropolitano de De- troit Wayne County (KDTW)	Seg 12:27PM EDT	Seg 01:44PM CDT
A62	B738	Int'l de Phoenix Sky Harbor (KPHX)	Seg 10:01AM MST	Seg 01:47PM CDT

A63	A319	Huntsville Intl (KHSV)	Seg 12:26PM CDT	Seg 01:51PM CDT
A64	A319	El Paso Intl (KELP)	Seg 11:42AM MDT	Seg 01:54PM CDT
A65	MD80	James M Cox Dayton Intl (KDAY)	Seg 12:56PM EDT	Seg 01:54PM CDT
A66	MD80	Int'l de Denver (KDEN)	Seg 11:23AM MDT	Seg 01:55PM CDT
A67	B738	Int'l de Vancouver (CYVR)	Seg 08:20AM PDT	Seg 01:59PM CDT
A68	B738	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Seg 09:53AM PDT	Seg 02:00PM CDT
A69	MD80	Port Columbus Intl (KCMH)	Seg 12:50PM EDT	Seg 02:03PM CDT
A70	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Seg 12:30PM EDT	Seg 02:04PM CDT
A71	MD83	Int'l de Minneapolis- Saint Paul (KMSP)	Seg 12:04PM CDT	Seg 02:04PM CDT
A72	MD83	Lambert-St Louis Intl (KSTL)	Seg 12:43PM CDT	Seg 02:06PM CDT
A73	MD80	Northwest Arkansas Rgnl (KXNA)	Seg 01:20PM CDT	Seg 02:07PM CDT
A74	MD80	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 01:31PM CDT	Seg 02:08PM CDT
A75	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 09:53AM PDT	Seg 02:10PM CDT
A76	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 09:50AM PDT	Seg 02:13PM CDT
A77	MD80	Albuquerque Intl Sun- port (KABQ)	Seg 12:02PM MDT	Seg 02:15PM CDT
A78	B752	Int'l de Cancún (MMUN / CUN)	Seg 12:01PM CDT	Seg 02:16PM CDT
A79	B772	Frankfurt (EDDF / FRA)	Seg 11:10AM CEST	Seg 02:18PM CDT
A80	MD80	Richmond Intl (KRIC)	Seg 12:41PM EDT	Seg 02:19PM CDT
A81	MD80	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 01:38PM CDT	Seg 02:20PM CDT
A82	B738	San Diego Intl (KSAN)	Seg 09:58AM PDT	Seg 02:20PM CDT
A83	B738	Int'l de Filadélfia (KPHL)	Seg 12:24PM EDT	Seg 02:21PM CDT
A84	MD80	Reagan National (KDCA)	Seg 12:42PM EDT	Seg 02:24PM CDT
A85	MD80	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 01:49PM CDT	Seg 02:26PM CDT
A86	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 12:50PM CDT	Seg 02:27PM CDT

A87	B752	Int'l de Boston (KBOS)	Seg 11:54AM EDT	Seg 02:30PM CDT
A88	MD80	Tucson Intl (KTUS)	Seg 10:52AM MST	Seg 02:30PM CDT
A89	B738	LaGuardia (KLGA)	Seg 12:22PM EDT	Seg 02:31PM CDT
A90	B738	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 09:39AM PDT	Seg 02:32PM CDT
A91	MD83	Int'l de Atlanta Hartsfield-Jackson (KATL)	Seg 01:48PM EDT	Seg 02:35PM CDT
A92	MD83	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 02:01PM CDT	Seg 02:39PM CDT
A93	MD83	Kansas City Intl (KMCI)	Seg 01:28PM CDT	Seg 02:42PM CDT
A94	B752	Int'l de Seattle- Tacoma (KSEA)	Seg 09:16AM PDT	Seg 02:43PM CDT
A95	MD80	Int'l de Denver (KDEN)	Seg 12:13PM MDT	Seg 02:45PM CDT
A96	B772	Paris-Charles de Gaulle (LFPG / CDG)	Seg 12:07PM CEST	Seg 02:50PM CDT
A97	MD80	Nashville Intl (KBNA)	Seg 01:21PM CDT	Seg 02:59PM CDT
A98	B763	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 10:40AM PDT	Seg 03:00PM CDT
A99	MD80	Will Rogers World (KOKC)	Seg 02:27PM CDT	Seg 03:02PM CDT
A100	MD80	San Jose Int'l (KSJC)	Seg 10:12AM PDT	Seg 03:04PM CDT
A101	B738	Int'l de Cancún (MMUN / CUN)	Seg 12:51PM CDT	Seg 03:13PM CDT
A102	B752	Int'l Luis Muñoz Ma- rin (TJSJ / SJU)	Seg 11:39AM AST	Seg 03:16PM CDT
A103	A319	Memphis Intl (KMEM)	Seg 02:05PM CDT	Seg 03:17PM CDT
A104	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 10:59AM PDT	Seg 03:18PM CDT
A105	B738	Int'l de Phoenix Sky Harbor (KPHX)	Seg 11:29AM MST	Seg 03:19PM CDT
A106	B752	San Diego Intl (KSAN)	Seg 11:05AM PDT	Seg 03:20PM CDT
A107	MD80	Int'l de Orlando (KMCO)	Seg 01:57PM EDT	Seg 03:21PM CDT
A108	MD80	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Seg 11:15AM PDT	Seg 03:21PM CDT
A109	MD83	Int'l de Pittsburgh (KPIT)	Seg 01:54PM EDT	Seg 03:22PM CDT
A110	MD80	El Paso Intl (KELP)	Seg 01:04PM MDT	Seg 03:22PM CDT

A111	B738	LaGuardia (KLGa)	Seg 01:10PM EDT	Seg 03:24PM CDT
A112	MD80	New Orleans Intl (KMSY)	Seg 02:12PM CDT	Seg 03:25PM CDT
A113	A319	Cleveland-Hopkins Intl (KCLE)	Seg 01:58PM EDT	Seg 03:26PM CDT
A114	B77W	Int'l de Hong Kong (VHHH / HKG)	Seg 02:14PM HKT	Seg 03:27PM CDT
A115	A319	Wichita Mid-Continent (KICT)	Seg 02:36PM CDT	Seg 03:28PM CDT
A116	MD83	Nashville Intl (KBNA)	Seg 01:43PM CDT	Seg 03:29PM CDT
A117	MD80	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 02:52PM CDT	Seg 03:30PM CDT
A118	B763	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 10:42AM PDT	Seg 03:30PM CDT
A119	B738	Int'l da Cidade do México (MMMX / MEX)	Seg 01:29PM CDT	Seg 03:31PM CDT
A120	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 01:46PM CDT	Seg 03:34PM CDT
A121	B772	Int'l de Narita (RJAA / NRT)	Seg 06:44PM JST	Seg 03:35PM CDT
A122	B772	Int'l de Incheon (RKSI / ICN)	Seg 05:03PM KST	Seg 03:35PM CDT
A123	MD83	Int'l de Newark (KEWR)	Seg 01:32PM EDT	Seg 03:36PM CDT
A124	A319	Louisville Intl (KSDF)	Seg 02:58PM EDT	Seg 03:38PM CDT
A125	MD83	Don Miguel Hidalgo y Costilla Int'l (MMGL / GDL)	Seg 01:35PM CDT	Seg 03:38PM CDT
A126	MD83	Int'l de Salt Lake City (KSLC)	Seg 12:36PM MDT	Seg 03:41PM CDT
A127	MD80	Tucson Intl (KTUS)	Seg 11:58AM MST	Seg 03:41PM CDT
A128	MD83	Tampa Intl (KTPA)	Seg 02:28PM EDT	Seg 03:44PM CDT
A129	B738	Bradley Intl (KBDL)	Seg 01:30PM EDT	Seg 03:50PM CDT
A130	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 03:09PM CDT	Seg 03:51PM CDT
A131	MD83	Lic. Gustavo Diaz Ordaz Int'l (MMPR / PVR)	Seg 01:51PM CDT	Seg 03:55PM CDT
A132	B738	LaGuardia (KLGa)	Seg 01:54PM EDT	Seg 03:56PM CDT
A133	MD80	Will Rogers World (KOKC)	Seg 03:28PM CDT	Seg 03:58PM CDT
A134	MD80	Reagan National (KDCA)	Seg 02:29PM EDT	Seg 04:01PM CDT

A135	MD80	Int'l de Denver (KDEN)	Seg 01:33PM MDT	Seg 04:03PM CDT
A136	MD83	Int'l de Minneapolis- Saint Paul (KMSP)	Seg 02:04PM CDT	Seg 04:04PM CDT
A137	B738	Cozumel Int'l (MMCZ / CZM)	Seg 01:45PM CDT	Seg 04:07PM CDT
A138	MD83	Lambert-St Louis Intl (KSTL)	Seg 02:54PM CDT	Seg 04:11PM CDT
A139	MD83	Int'l de Atlanta Hartsfield-Jackson (KATL)	Seg 03:23PM EDT	Seg 04:13PM CDT
A140	MD83	Ontario Intl (KONT)	Seg 11:57AM PDT	Seg 04:14PM CDT
A141	B738	Int'l de Seattle- Tacoma (KSEA)	Seg 10:56AM PDT	Seg 04:17PM CDT
A142	B752	Tulsa Intl (KTUL)	Seg 03:36PM CDT	Seg 04:20PM CDT
A143	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 12:08PM PDT	Seg 04:25PM CDT
A144	B738	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 03:51PM CDT	Seg 04:27PM CDT
A145	B738	Int'l de Fort Lauderdale- Hollywood (KFLH)	Seg 02:54PM EDT	Seg 04:27PM CDT
A146	B738	Int'l Washington Dul- les (KIAD)	Seg 02:55PM EDT	Seg 04:29PM CDT
A147	MD80	Colorado Sprgs Muni (KCOS)	Seg 02:03PM MDT	Seg 04:29PM CDT
A148	MD83	Int'l de Baltimore- Washington Thur- good Marshall (KBWI)	Seg 02:54PM EDT	Seg 04:30PM CDT
A149	MD80	Kansas City Intl (KMCI)	Seg 03:24PM CDT	Seg 04:32PM CDT
A150	MD83	Jacksonville Intl (KJAX)	Seg 03:19PM EDT	Seg 04:32PM CDT
A151	A319	El Paso Intl (KELP)	Seg 02:21PM MDT	Seg 04:34PM CDT
A152	MD83	Metropolitano de De- troit Wayne County (KDTW)	Seg 03:19PM EDT	Seg 04:34PM CDT
A153	A319	Int'l de Char- lotte/Douglas (KCLT)	Seg 03:25PM EDT	Seg 04:35PM CDT
A154	B752	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 11:48AM PDT	Seg 04:35PM CDT
A155	B738	Int'l de Filadélfia (KPHL)	Seg 02:42PM EDT	Seg 04:37PM CDT

A156	B752	Int'l de Boston (KBOS)	Seg 02:00PM EDT	Seg 04:40PM CDT
A157	B763	Londres Heathrow (EGLL / LHR)	Seg 12:53PM BST	Seg 04:42PM CDT
A158	B738	Reno/Tahoe Intl (KRNO)	Seg 12:08PM PDT	Seg 04:44PM CDT
A159	MD83	Albuquerque Intl Sun- port (KABQ)	Seg 02:23PM MDT	Seg 04:46PM CDT
A160	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 03:11PM CDT	Seg 04:48PM CDT
A161	A319	Mc Allen Miller Intl (KMFJ)	Seg 03:42PM CDT	Seg 04:50PM CDT
A162	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 04:15PM CDT	Seg 04:57PM CDT
A163	B738	Reagan National (KDCA)	Seg 03:20PM EDT	Seg 05:00PM CDT
A164	MD83	Sacramento Intl (KSMF)	Seg 12:13PM PDT	Seg 05:01PM CDT
A165	A319	Corpus Christi Intl (KCRP)	Seg 04:04PM CDT	Seg 05:02PM CDT
A166	MD83	Int'l de Orlando (KMCO)	Seg 03:52PM EDT	Seg 05:10PM CDT
A167	MD83	Nashville Intl (KBNA)	Seg 03:41PM CDT	Seg 05:14PM CDT
A168	B738	Int'l de Phoenix Sky Harbor (KPHX)	Seg 01:23PM MST	Seg 05:15PM CDT
A169	MD80	Pensacola Intl (KPNS)	Seg 03:40PM CDT	Seg 05:15PM CDT
A170	A319	Memphis Intl (KMEM)	Seg 04:12PM CDT	Seg 05:21PM CDT
A171	MD83	Raleigh-Durham Intl (KRDU)	Seg 03:57PM EDT	Seg 05:24PM CDT
A172	A319	Int'l Toronto Pearson (CYYZ)	Seg 03:49PM EDT	Seg 05:26PM CDT
A173	MD83	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 04:51PM CDT	Seg 05:27PM CDT
A174	MD80	Tucson Intl (KTUS)	Seg 01:48PM MST	Seg 05:31PM CDT
A175	MD83	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Seg 01:23PM PDT	Seg 05:32PM CDT
A176	B763	Madrid-Barajas (LEMD / MAD)	Seg 02:01PM CEST	Seg 05:33PM CDT
A177	B738	Int'l de Denver (KDEN)	Seg 03:05PM MDT	Seg 05:35PM CDT
A178	B752	San Diego Intl (KSAN)	Seg 01:21PM PDT	Seg 05:37PM CDT

A179	MD80	Lambert-St Louis Intl (KSTL)	Seg 04:26PM CDT	Seg 05:42PM CDT
A180	B752	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 01:23PM PDT	Seg 05:43PM CDT
A181	MD83	Int'l de Salt Lake City (KSLC)	Seg 02:34PM MDT	Seg 05:44PM CDT
A182	MD83	Eppley Airfield (KOMA)	Seg 04:22PM CDT	Seg 05:44PM CDT
A183	B738	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 05:03PM CDT	Seg 05:45PM CDT
A184	MD80	Indianapolis Intl (KIND)	Seg 05:00PM EDT	Seg 05:45PM CDT
A185	B752	Int'l de Cancún (MMUN / CUN)	Seg 03:35PM CDT	Seg 05:50PM CDT
A186	MD83	Portland Intl (KPDX)	Seg 12:31PM PDT	Seg 05:51PM CDT
A187	MD80	Int'l da Cidade do México (MMMX / MEX)	Seg 03:44PM CDT	Seg 05:51PM CDT
A188	B738	LaGuardia (KLGa)	Seg 03:46PM EDT	Seg 05:53PM CDT
A189	B738	Tampa Intl (KTPA)	Seg 04:40PM EDT	Seg 05:55PM CDT
A190	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 05:14PM CDT	Seg 05:55PM CDT
A191	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 04:13PM CDT	Seg 05:56PM CDT
A192	MD83	Int'l de Atlanta Hartsfield-Jackson (KATL)	Seg 05:10PM EDT	Seg 05:57PM CDT
A193	A321	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 01:38PM PDT	Seg 05:58PM CDT
A194	B738	Int'l de Minneapolis-Saint Paul (KMSP)	Seg 04:01PM CDT	Seg 06:01PM CDT
A195	MD83	Int'l de Newark (KEWR)	Seg 04:05PM EDT	Seg 06:03PM CDT
A196	MD80	Albuquerque Intl Sunport (KABQ)	Seg 03:49PM MDT	Seg 06:05PM CDT
A197	B738	Int'l Sangster (MKJS / MBJ)	Seg 04:17PM EST	Seg 06:05PM CDT
A198	MD83	San Jose Int'l (KSJC)	Seg 01:15PM PDT	Seg 06:06PM CDT
A199	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 04:24PM CDT	Seg 06:07PM CDT
A200	B738	Int'l de Seattle-Tacoma (KSEA)	Seg 12:47PM PDT	Seg 06:07PM CDT
A201	MD80	New Orleans Intl (KMSY)	Seg 05:00PM CDT	Seg 06:08PM CDT
A202	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 01:52PM PDT	Seg 06:12PM CDT

A203	MD83	Int'l de Charlotte/Douglas (KCLT)	Seg 05:03PM EDT	Seg 06:15PM CDT
A204	B772	Int'l de Xangai Pudong (ZSPD / PVG)	Seg 06:35PM CST	Seg 06:16PM CDT
A205	MD83	Port Columbus Intl (KCMH)	Seg 05:13PM EDT	Seg 06:17PM CDT
A206	MD83	Will Rogers World (KOKC)	Seg 05:45PM CDT	Seg 06:21PM CDT
A207	B738	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 01:32PM PDT	Seg 06:26PM CDT
A208	MD83	Int'l de Baltimore-Washington Thurgood Marshall (KBWI)	Seg 04:49PM EDT	Seg 06:29PM CDT
A209	MD80	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 05:55PM CDT	Seg 06:32PM CDT
A210	MD80	Kansas City Intl (KMCI)	Seg 05:22PM CDT	Seg 06:33PM CDT
A211	B738	Int'l de Fort Lauderdale-Hollywood (KFLA)	Seg 05:00PM EDT	Seg 06:33PM CDT
A212	B738	Reagan National (KDCA)	Seg 04:52PM EDT	Seg 06:34PM CDT
A213	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 04:56PM CDT	Seg 06:35PM CDT
A214	A319	El Salvador Int'l (MSLP / SAL)	Seg 02:30PM CST	Seg 06:37PM CDT
A215	B738	San Diego Intl (KSAN)	Seg 02:28PM PDT	Seg 06:45PM CDT
A216	A319	Huntsville Intl (KHSV)	Seg 05:15PM CDT	Seg 06:47PM CDT
A217	A319	General Mariano Escobedo Int'l (MMMY / MTY)	Seg 05:31PM CDT	Seg 06:47PM CDT
A218	MD83	Des Moines Intl (KDSM)	Seg 05:21PM CDT	Seg 06:48PM CDT
A219	B738	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 02:16PM PDT	Seg 06:49PM CDT
A220	B738	Int'l John F. Kennedy (KJFK)	Seg 04:47PM EDT	Seg 06:53PM CDT
A221	MD80	El Paso Intl (KELP)	Seg 04:37PM MDT	Seg 06:54PM CDT
A222	B77W	Londres Heathrow (EGLL / LHR)	Seg 03:31PM BST	Seg 06:55PM CDT
A223	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 06:13PM CDT	Seg 06:58PM CDT

A224	B738	LaGuardia (KLGa)	Seg 04:51PM EDT	Seg 07:01PM CDT
A225	MD80	Birmingham-Shuttlesworth Intl (KBHM)	Seg 05:23PM CDT	Seg 07:01PM CDT
A226	B738	Int'l de Cancún (MMUN / CUN)	Seg 04:45PM CDT	Seg 07:02PM CDT
A227	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 02:42PM PDT	Seg 07:02PM CDT
A228	MD80	Int'l de Phoenix Sky Harbor (KPHX)	Seg 03:07PM MST	Seg 07:04PM CDT
A229	MD80	Adams Field (KLIT)	Seg 06:17PM CDT	Seg 07:04PM CDT
A230	B738	Int'l de Vancouver (CYVR)	Seg 01:23PM PDT	Seg 07:05PM CDT
A231	MD80	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 06:22PM CDT	Seg 07:05PM CDT
A232	A319	Del Bajio Guanajuato Int'l (MMLO / BJX)	Seg 05:08PM CDT	Seg 07:07PM CDT
A233	B738	LaGuardia (KLGa)	Seg 04:58PM EDT	Seg 07:08PM CDT
A234	B738	Int'l de Boston (KBOS)	Seg 04:34PM EDT	Seg 07:12PM CDT
A235	MD80	Int'l Washington Dulles (KIAD)	Seg 05:40PM EDT	Seg 07:13PM CDT
A236	MD83	Int'l de Atlanta Hartsfield-Jackson (KATL)	Seg 06:18PM EDT	Seg 07:15PM CDT
A237	B738	Int'l de Palm Beach (KPBI)	Seg 05:42PM EDT	Seg 07:18PM CDT
A238	MD80	Ontario Intl (KONT)	Seg 03:00PM PDT	Seg 07:19PM CDT
A239	MD83	Int'l de Newark (KEWR)	Seg 05:13PM EDT	Seg 07:19PM CDT
A240	MD83	Int'l de Filadélfia (KPHL)	Seg 05:28PM EDT	Seg 07:20PM CDT
A241	B738	Int'l de Miami (KMIA)	Seg 05:45PM EDT	Seg 07:22PM CDT
A242	MD83	Fresno Yosemite Intl (KFAT)	Seg 02:33PM PDT	Seg 07:23PM CDT
A243	MD83	Int'l de Norfolk (KORF)	Seg 05:25PM EDT	Seg 07:24PM CDT
A244	MD80	Tulsa Intl (KTUL)	Seg 06:52PM CDT	Seg 07:32PM CDT
A245	MD80	Austin-Bergstrom Intl (KAUS)	Seg 06:55PM CDT	Seg 07:34PM CDT
A246	MD80	Jacksonville Intl (KJAX)	Seg 06:18PM EDT	Seg 07:35PM CDT
A247	MD80	New Orleans Intl (KMSY)	Seg 06:29PM CDT	Seg 07:40PM CDT
A248	MD83	Tucson Intl (KTUS)	Seg 03:53PM MST	Seg 07:40PM CDT

A249	B738	Reagan National (KDCA)	Seg 06:00PM EDT	Seg 07:41PM CDT
A250	A319	Northwest Arkansas Rgnl (KXNA)	Seg 06:53PM CDT	Seg 07:43PM CDT
A251	MD80	James M Cox Dayton Intl (KDAY)	Seg 06:45PM EDT	Seg 07:45PM CDT
A252	MD80	Lubbock Smith Intl (KLBB)	Seg 06:59PM CDT	Seg 07:45PM CDT
A253	A319	Louisville Intl (KSDF)	Seg 07:06PM EDT	Seg 07:47PM CDT
A254	MD80	Int'l de Pittsburgh (KPIT)	Seg 06:26PM EDT	Seg 07:48PM CDT
A255	B738	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Seg 03:42PM PDT	Seg 07:49PM CDT
A256	B738	Int'l de Los Angeles (KLAX)	Seg 03:21PM PDT	Seg 07:50PM CDT
A257	B738	LaGuardia (KLGa)	Seg 05:47PM EDT	Seg 07:52PM CDT
A258	B738	Nashville Intl (KBNA)	Seg 06:27PM CDT	Seg 07:55PM CDT
A259	MD80	Albuquerque Intl Sun- port (KABQ)	Seg 05:40PM MDT	Seg 07:55PM CDT
A260	B738	Int'l de Calgary (CYYC)	Seg 03:22PM MDT	Seg 07:55PM CDT
A261	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 06:17PM CDT	Seg 07:57PM CDT
A262	MD83	San Diego Intl (KSAN)	Seg 03:38PM PDT	Seg 07:59PM CDT
A263	MD80	San Antonio Intl (KSAT)	Seg 07:17PM CDT	Seg 08:01PM CDT
A264	MD83	Int'l de Minneapolis- Saint Paul (KMSP)	Seg 06:07PM CDT	Seg 08:03PM CDT
A265	B738	Bradley Intl (KBDL)	Seg 05:46PM EDT	Seg 08:05PM CDT
A266	B738	Int'l de São Francisco (KSFO)	Seg 02:59PM PDT	Seg 08:05PM CDT
A267	MD83	El Paso Intl (KELP)	Seg 05:48PM MDT	Seg 08:06PM CDT
A268	MD83	Richmond Intl (KRIC)	Seg 06:21PM EDT	Seg 08:06PM CDT
A269	B738	Int'l de Seattle- Tacoma (KSEA)	Seg 02:51PM PDT	Seg 08:08PM CDT
A270	MD80	Mc Allen Miller Intl (KMFE)	Seg 06:59PM CDT	Seg 08:08PM CDT
A271	A319	Cleveland-Hopkins Intl (KCLE)	Seg 06:42PM EDT	Seg 08:08PM CDT
A272	MD83	Eppley Airfield (KOMA)	Seg 06:50PM CDT	Seg 08:10PM CDT
A273	B738	John Wayne (KSNA)	Seg 03:55PM PDT	Seg 08:13PM CDT

A274	A319	Memphis Intl (KMEM)	Seg 07:03PM CDT	Seg 08:14PM CDT
A275	MD80	General Mitchell Intl (KMKE)	Seg 06:16PM CDT	Seg 08:16PM CDT
A276	B738	Southwest Florida Intl (KRSW)	Seg 06:50PM EDT	Seg 08:17PM CDT
A277	B738	Tampa Intl (KTPA)	Seg 07:03PM EDT	Seg 08:17PM CDT
A278	B738	Int'l Washington Dulles (KIAD)	Seg 06:44PM EDT	Seg 08:18PM CDT
A279	MD80	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 06:14PM CDT	Seg 08:20PM CDT
A280	MD83	Int'l de Charlotte/Douglas (KCLT)	Seg 07:10PM EDT	Seg 08:22PM CDT
A281	MD80	Indianapolis Intl (KIND)	Seg 07:36PM EDT	Seg 08:24PM CDT
A282	MD80	Int'l de Phoenix Sky Harbor (KPHX)	Seg 04:37PM MST	Seg 08:26PM CDT
A283	B738	Int'l O'Hare (KORD)	Seg 06:46PM CDT	Seg 08:29PM CDT
A284	A319	Int'l Toronto Pearson (CYYZ)	Seg 06:52PM EDT	Seg 08:29PM CDT
A285	MD80	Kansas City Intl (KMCI)	Seg 07:22PM CDT	Seg 08:30PM CDT
A286	MD83	San Jose Int'l (KSJC)	Seg 03:32PM PDT	Seg 08:33PM CDT
A287	B752	Int'l de Orlando (KMCO)	Seg 07:16PM EDT	Seg 08:33PM CDT
A288	MD83	Portland Intl (KPDX)	Seg 03:22PM PDT	Seg 08:38PM CDT
A289	MD80	Intercontinental George Bush (KIAH)	Seg 07:58PM CDT	Seg 08:41PM CDT
A290	MD80	Int'l de Atlanta Hartsfield-Jackson (KATL)	Seg 07:55PM EDT	Seg 08:45PM CDT
A291	MD83	Nashville Intl (KBNA)	Seg 07:16PM CDT	Seg 08:47PM CDT
A292	MD83	Int'l de Orlando (KMCO)	Seg 07:26PM EDT	Seg 08:48PM CDT
A293	B752	Int'l de Boston (KBOS)	Seg 06:15PM EDT	Seg 08:50PM CDT
A294	B738	Raleigh-Durham Intl (KRDU)	Seg 07:29PM EDT	Seg 08:51PM CDT
A295	MD83	Int'l de Las Vegas (KLAS)	Seg 04:37PM PDT	Seg 08:53PM CDT
A296	B763	Int'l de Miami (KMIA)	Seg 07:15PM EDT	Seg 08:54PM CDT
A297	MD80	New Orleans Intl (KMSY)	Seg 07:51PM CDT	Seg 09:00PM CDT

A298	MD83	Int'l de Salt Lake City (KSLC)	Seg 05:56PM MDT	Seg 09:00PM CDT
A299	B738	Int'l de Filadélfia (KPHL)	Seg 07:05PM EDT	Seg 09:01PM CDT
A300	A319	Wichita Mid- Continent (KICT)	Seg 08:13PM CDT	Seg 09:04PM CDT

Tabela B.1: Voos da companhia aérea *A* com chegada no DFW durante o período do CTOP