

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Lucas Arêa Leão Barreto

*Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em
Solo – Aplicação de Modelo para o aeroporto de Brasília*

Trabalho de Graduação

2014

Civil

Lucas Arêa Leão Barreto

**Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em Solo –
Aplicação de Modelo para o Aeroporto de Brasília**

Orientador
Prof. Dr. Carlos Müller (ITA)

Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Barreto, Lucas A. L.

Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em Solo – Aplicação de Modelo para o Aeroporto de Brasília / Lucas Arêa Leão Barreto.

São José dos Campos, 2014.

53f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2014.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Müller.

1. Congestionamento Aeroportuário 2. Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em Solo 3. Aeroporto Internacional de Brasília I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil Aeronáutica. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARRETO, Lucas A. L. **Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em Solo – Aplicação de Modelo para o Aeroporto de Brasília**. 2014. 53f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Arêa Leão Barreto

TÍTULO DO TRABALHO: Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em Solo – Aplicação de Modelo para o Aeroporto de Brasília

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2014

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Lucas Arêa Leão Barreto

Lucas Arêa Leão Barreto

Rua Professor Dias da Rocha 1811/101 – Dionísio Torres

CEP 60170-311 – Fortaleza – CE

**ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DE FLUXO DE AERONAVES EM SOLO
– APLICAÇÃO DE MODELO PARA O AEROPORTO DE BRASÍLIA**

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

LUCAS ARÊA LEÃO BARRETO

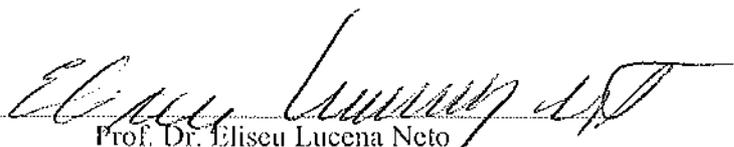
Lucas Arêa Leão Barreto

Autor



Prof. Dr. Carlos Müller (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 27 de novembro de 2014

“Dedico este trabalho à minha família.”

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer à minha família pela confiança e apoio em todos os momentos.

Aos meus amigos da Turma 13.1, CIVIL 13 e CIVIL 14, pelo companheirismo.

A todos com quem morei no H8 por aguentarem viver dentro de uma cozinha.

A todos os demais amigos de Fortaleza e São José dos Campos que me fizeram ser quem sou hoje.

Aos meus professores do ITA, por toda a dedicação e incentivo.

“Pain is temporary. It may last a minute, or an hour, or a day, or a year, but eventually it will subside and something else will take its place. If I quit, however, it will last forever.”

Lance Armstrong

RESUMO

Nos maiores aeroportos do mundo o problema do congestionamento em solo é um problema frequentemente enfrentado, o que aumenta significativamente o tempo de táxi das aeronaves e, conseqüentemente, a queima de combustível e emissão de poluentes. A estratégia *Pushback Rate Control* tem como objetivo evitar congestionamentos na superfície do aeroporto, através da sugestão de uma taxa de *pushback* dos *gates*, a fim de reduzir o tempo que as aeronaves gastam com motores ligados durante as operações de táxi. Este trabalho apresenta o processo de aquisição e os resultados da abordagem para controlar o congestionamento em solo aplicada ao Aeroporto Internacional de Brasília. O método é explicado de maneira a fornecer o conhecimento necessário para replicar os resultados a partir de um banco de dados adequado proveniente de outros aeroportos congestionados. E também introduz o conceito de um modelo de otimização para servir como base para estudos futuros.

ABSTRACT

In the biggest airports of the world, the problem of congestion in its taxiways is a frequent issue and significantly increases aircrafts' taxi time, and consequently the fuel burn and pollutants emission. The Pushback Rate Control strategy aims to prevent congestions in the airport surface, through a suggested rate of pushbacks from gate, in order to reduce the time aircrafts spend with engines on during taxi operations. This study presents the process to acquire and the results of the approach to control Airport congestion applied to Brasília International Airport. The method is explained to provide the knowledge necessary to replicate the results with an adequate database coming from other congested airports. It also introduces the concept of an optimization model to serve as basis to future studies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimento Anual de Passageiros	14
Figura 2 - Movimento Anual de Aeronaves	15
Figura 3 - Regressão do rendimento do sistema de pistas de <i>Boston Logan International Airport</i> em função do número de aeronaves em <i>taxi-out</i> e da taxa de pousos na configuração 22L, 27 22L, 22R (adaptado).....	18
Figura 4 – Configuração de pista – BOS.....	19
Figura 5 - Esquema para cálculo de taxa de <i>pushbacks</i> (adaptado)	23
Figura 6 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Janeiro	30
Figura 7 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Fevereiro	31
Figura 8 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Março	31
Figura 9 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Abril	32
Figura 10 - Distribuição dos pontos referentes até 6 aeronaves em procedimento de <i>taxi-out</i>	33
Figura 11 - Distribuição dos pontos referentes a mais de 6 aeronaves em procedimento de <i>taxi-out</i>	33
Figura 12 - Distribuição referente a até 6 aeronaves em procedimento de <i>taxi-out</i> e 0 a 3 pousos.....	35
Figura 13 - Distribuição referente a até 6 aeronaves em procedimento de <i>taxi-out</i> e 7 a 10 pousos.....	35
Figura 14 - Distribuição referente a mais de 6 aeronaves em procedimento de <i>taxi-out</i> e 0 a 3 pousos.....	36
Figura 15 - Distribuição referente a mais de 6 aeronaves em procedimento de <i>taxi-out</i> e 7 a 10 pousos.....	36
Figura 16 - Imagem de satélite do aeroporto de Brasília.....	39
Figura 17 - Modelo das pistas e dos pontos de controle adotado para o aeroporto de Brasília	40
Figura 18 - Detalhe dos <i>gates</i> do modelo do aeroporto de Brasília	41
Figura 19 - Representação do modelo no software AIMMS.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Movimento Anual de Passageiros	13
Tabela 2 - Movimento Anual de Aeronaves.....	14
Tabela 3 - Movimento nos aeroportos brasileiros no primeiro semestre de 2014.....	24
Tabela 4 - Movimentação de passageiros e aeronaves no Aeroporto de Brasília	24
Tabela 5 - Parâmetros dos ajustes da base de dados.....	28
Tabela 6 - Caminhos percorridos por uma aeronave decolando de um dos 12 <i>gates</i> (distâncias em metros).....	41
Tabela 7 - Caminhos percorridos por aeronaves pousando para um dos 12 <i>gates</i> (distâncias em metros).....	42
Tabela 8 - Exemplo das velocidades médias da aeronave para <i>pushback</i> e táxi.....	43
Tabela 9 - Exemplo de voos partindo dos pontos 1 a 6, com seus horários em cada ponto de controle	43

SUMÁRIO

1	Introdução	13
2	Objetivo	16
3	Literatura Existente.....	17
3.1	Implementação do <i>N-control</i>	20
3.2	Implementação do <i>pushback rate control</i>	21
4	Aeroporto de Brasília.....	24
5	Aplicação do <i>pushback rate control</i> no Aeroporto de Brasília	26
5.1	Dados de movimentação SGTC	26
5.1.1	Ajustes da base de dados.	26
5.1.2	Manipulação da base de dados	28
5.1.3	Curva de rendimento do sistema de pistas de Brasília	30
6	Modelagem do aeroporto de Brasília.....	38
6.1	Modelo de otimização com AIMMS.....	44
7	Conclusão.....	48
8	Referências Bibliográficas	49

1 Introdução

O Brasil apresentou um crescimento elevado no movimento de passageiros e aeronaves nos últimos anos. A partir de dados disponibilizados, observa-se na Tabela 1 o movimento anual total de passageiros entre os anos de 2006 e 2013 para os 63 aeroportos administrados pela Infraero e os 3 aeroportos concessionados (Guarulhos, Viracopos e Brasília). Percebe-se o grande aumento do movimento de passageiros, chegando a um crescimento acumulado de 93,3% ao longo dos 8 anos. Esse aumento também é ilustrado pela Figura 1.

Tabela 1 - Movimento Anual de Passageiros

Ano	Movimento de Passageiros	Crescimento Anual	Crescimento Acumulado
2006	102.185.376	-	-
2007	110.549.625	8,2%	8,2%
2008	112.900.421	2,1%	10,5%
2009	128.135.616	13,5%	25,4%
2010	155.362.999	21,2%	52,0%
2011	179.949.110	15,8%	76,1%
2012	193.119.365	7,3%	89,0%
2013	197.492.032	2,3%	93,3%

Fontes: (Infraero, 2014), (GRU AIRPORT, 2014), (Viracopos, 2014) e (Aeroporto de Brasília, 2014)

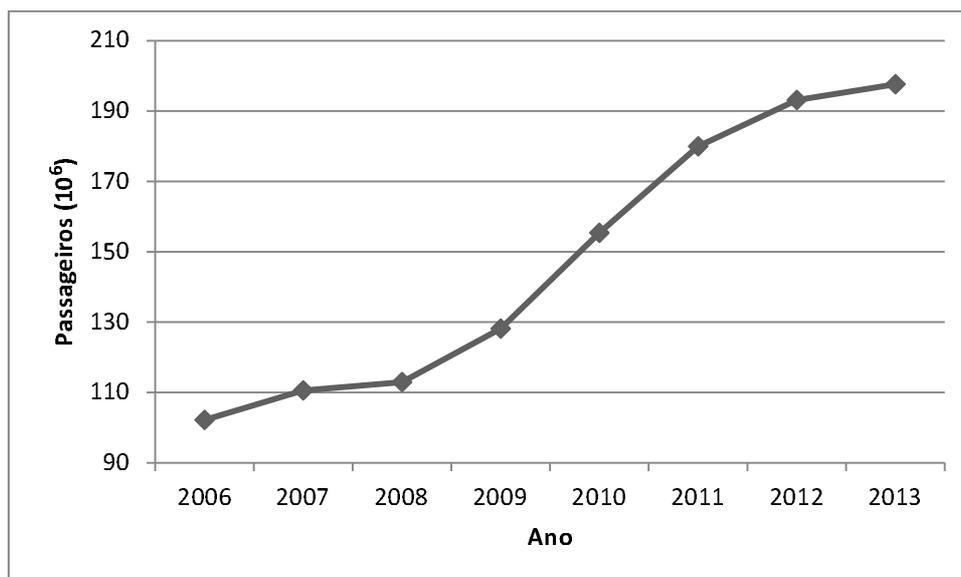


Figura 1 - Movimento Anual de Passageiros

De maneira a atender esse crescente aumento de passageiros, elevou-se a movimentação de aeronaves no Brasil. A Tabela 2 apresenta os dados referentes à movimentação de aeronaves total no período de 2006 a 2013 para os mesmos aeroportos. Houve, também, um crescimento tão relevante quanto o de movimento de passageiros, Ao longo dos 8 anos, ocorreu um crescimento acumulado de 50,2%. A Figura 2 também ilustra esse expansão.

Tabela 2 - Movimento Anual de Aeronaves

Ano	Movimento de Aeronaves	Crescimento Anual	Crescimento Acumulado
2006	1.918.538	-	-
2007	2.037.768	6,2%	6,2%
2008	2.128.823	4,5%	11,0%
2009	2.290.950	7,6%	19,4%
2010	2.647.918	15,6%	38,0%
2011	2.893.203	9,3%	50,8%
2012	3.001.946	3,8%	56,5%
2013	2.882.012	-4,0%	50,2%

Fontes: (Infraero, 2014), (GRU AIRPORT, 2014), (Viracopos, 2014) e (Aeroporto de Brasília, 2014)

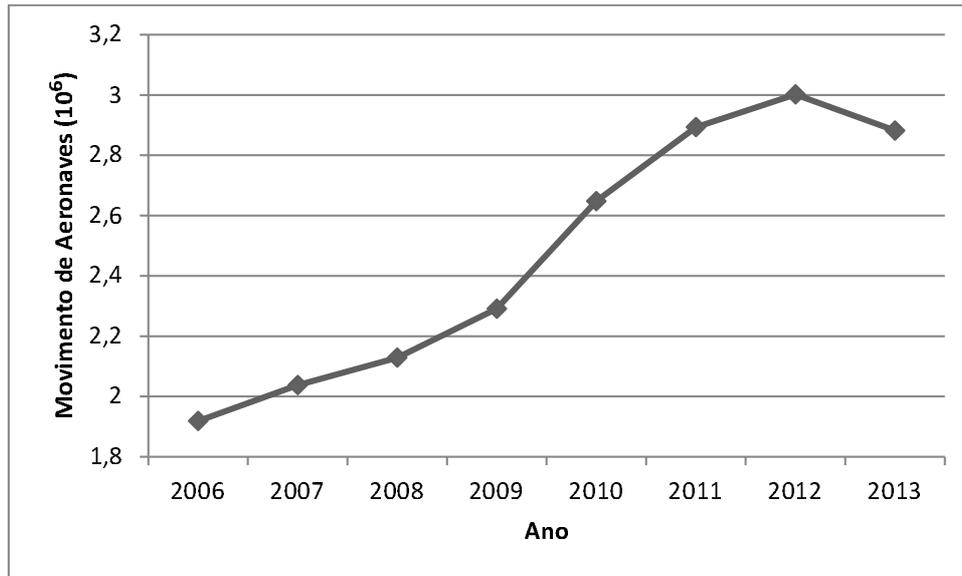


Figura 2 - Movimento Anual de Aeronaves

Esse grande crescimento está, nos aeroportos das principais capitais, provocando a saturação de seus sistemas de pistas de pouso e decolagem. Na saturação, estes aeroportos congestionados apresentam uma queda na qualidade na prestação do serviço, a qual se manifesta na forma de atrasos e custos operacionais adicionais. Podemos destacar desses problemas relacionados aos procedimentos de táxi das aeronaves a sua contribuição significativa na queima de combustível e, conseqüentemente, nas emissões de gases poluentes nos aeroportos. A taxa de queima de combustível e emissão dos diversos poluentes, tais como dióxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre são proporcionais ao tempo de táxi, assim como ao número de motores utilizados, à aceleração utilizada e à decisões de desligar os motores durante atrasos. (Balakrishnan, Deonandan, & Simaiakis, 2008)

Estima-se que, na Europa, aeronaves passam de 10% a 30% do tempo de voo em operações de táxi, e uma aeronave de curto/médio alcance A320 gasta entre 5% a 10% do seu combustível total ainda em solo. (Cros & Frings, 2008). Nos Estados Unidos, voos domésticos emitem cerca de 6 milhões de toneladas de CO₂, 45 mil toneladas de CO, 8 mil toneladas de NO_x e 4 mil toneladas de HC durante as operações de táxi. Dessas emissões, quase metade possui origem nos 20 mais congestionados aeroportos do país (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011). Dessa maneira, uma diminuição no tempo de táxi das aeronaves de um aeroporto congestionado pode reduzir de maneira significativa as emissões de gases poluentes nos aeroportos.

2 Objetivo

Tendo em vista este crescente problema recorrente nos grandes aeroportos de todo o mundo, este trabalho tem como proposta a aplicação de estratégias de controle dos congestionamentos realizadas para o aeroporto de Brasília. Os modelos propõem a diminuição do tempo total de táxi de aeronaves em períodos congestionados a partir da monitoração e controle do número de aeronaves em operação no pátio, pistas de táxi, pouso e decolagem, além da regulação de uma taxa de *pushbacks* das aeronaves. Com a utilização dos resultados obtidos, tem-se mais uma ferramenta com grande potencial de contribuição para a melhoria da eficiência operacional no aeroporto por meio do *Collaborative Decision Making*.

3 Literatura Existente

Uma iniciativa simples para controlar o congestionamento em solo no aeroporto seria a adoção de uma estratégia denominada “*N-control*”, a qual foi primeiramente apresentada por (Feron, et al., 1997). Denomina-se por *N*, o número de aeronaves que realizaram o *pushback* e estão em procedimento de táxi ou na fila de decolagem. Esta estratégia consiste na determinação de um limiar no qual o *pushback* das aeronaves de seus *gates* para o sistema de táxi não gera um maior rendimento do sistema. Ou seja, se o total de aeronaves que decolarão ultrapassar determinado valor, *pushbacks* adicionais não são autorizados até que o número de aeronaves *N* seja reduzido para abaixo do valor limite. Para ilustrar o problema, pode-se pensar na seguinte situação. Na medida que as aeronaves realizam *pushback* e saem de seus *gates* para as pistas de táxi, o rendimento da pista de decolagem aumenta inicialmente, uma vez que mais aeronaves estão disponíveis para decolar, mas na medida que o número de aeronaves aumenta, a pista de decolagem torna-se o gargalo de maneira que o tempo de táxi das aeronaves se estende enquanto não há aumento na taxa de decolagens.

Outra possível estratégia é o “*pushback rate control*”, conforme (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011) tem como objetivo que o aeroporto não atinja congestionamentos excessivos não desejados. Ao invés de não autorizar *pushbacks* adicionais quando o número de aeronaves *N* atingir o valor limite, ele regula a taxa que aeronaves devem ser autorizadas para *pushback* de maneira a não se atingir esses congestionamentos indesejados.

O valor limite da capacidade de cada configuração de pista do aeroporto pode ser determinado a partir de um gráfico de rendimento do sistema do número de aeronaves em táxi para decolagem. Também é importante notar que esse limiar é dependente do aeroporto, taxa de pousos, configuração das pistas, condições meteorológicas e frota de aeronaves. Vale ressaltar que o número de pousos também influencia no rendimento do sistema, e o valor limite de capacidade mudará dependendo da demanda de pousos no período de tempo considerado. Essa situação pode acontecer ao serem realizadas operações de pouso e decolagem numa mesma pista ou em pistas diferentes não segregadas, ou seja não podem haver operações simultâneas. Dessa maneira é possível parametrizar ainda mais o sistema conforme pode-se observar na Figura 3 os limiares para a configuração 22L, 27 | 22L, 22R do

Boston Logan International Airport (BOS), onde a estratégia do *pushback rate control* foi aplicada, enquanto a Figura 4 apresenta o esquema com a configuração das pistas. A notação utilizada para expressar a configuração das pistas é da forma “R1, R2 | R3, R4”, na qual R1 e R2 são as cabeceiras nas quais ocorrem os pousos enquanto as decolagens acontecem nas cabeceiras R3 e R4.

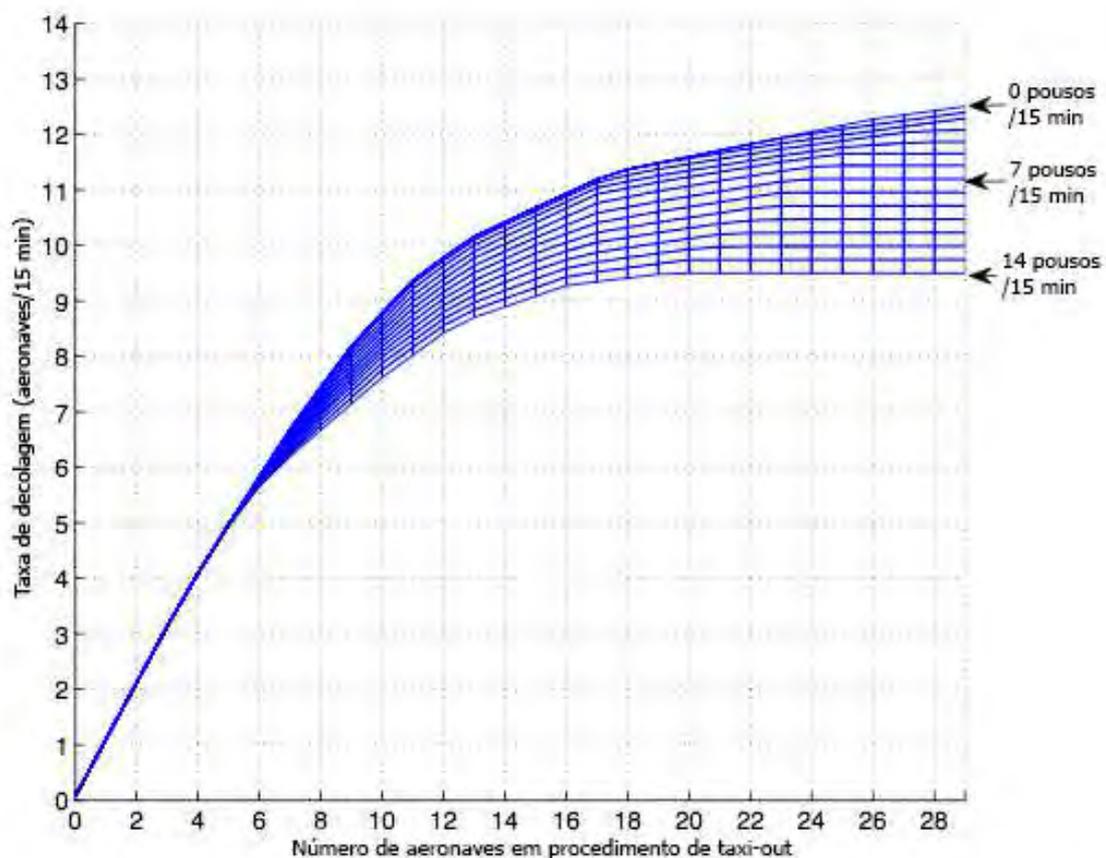


Figura 3 - Regressão do rendimento do sistema de pistas de *Boston Logan International Airport* em função do número de aeronaves em *taxi-out* e da taxa de pousos na configuração 22L, 27 | 22L, 22R (adaptado)

Fonte: (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011)

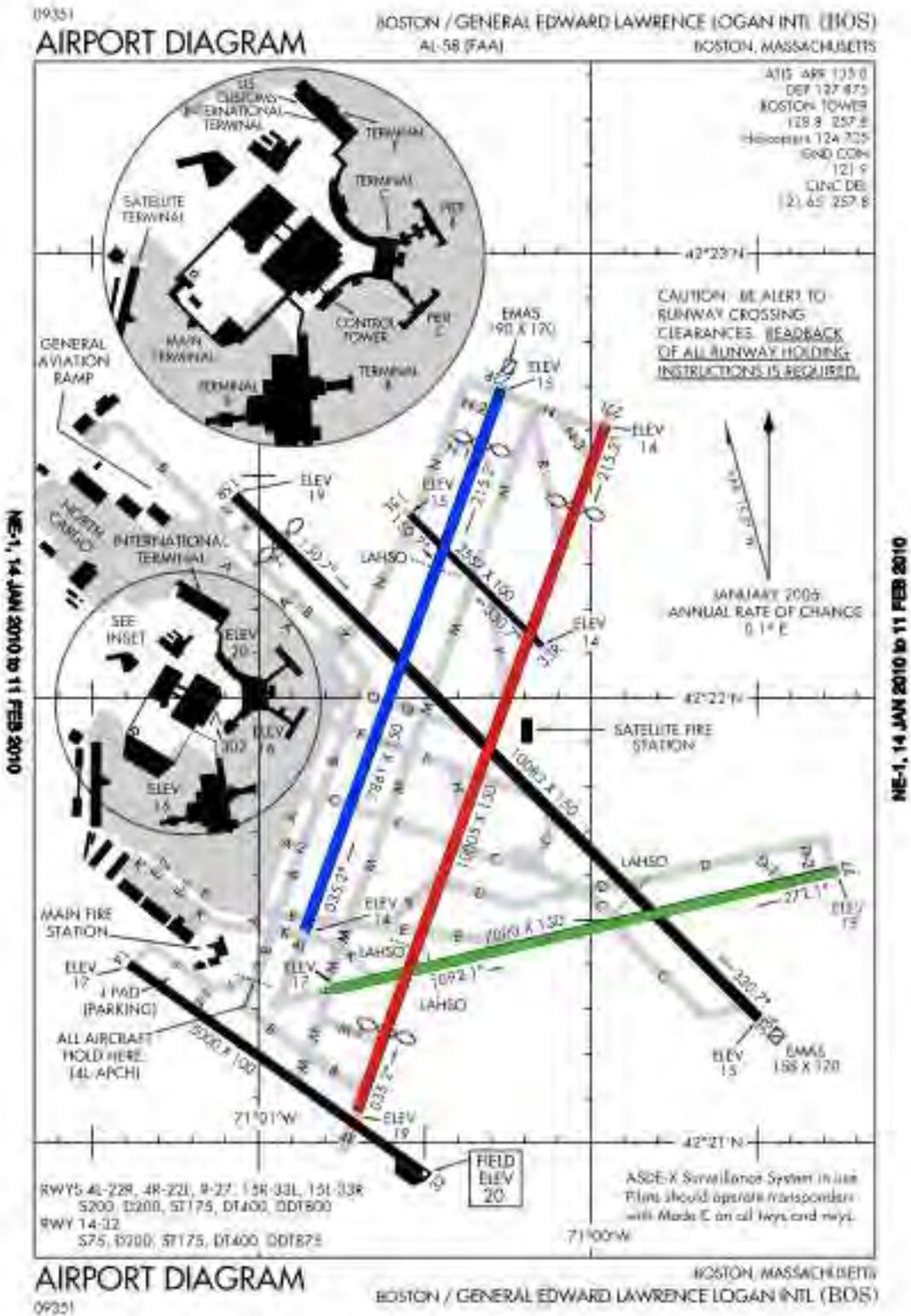


Figura 4 – Configuração de pista – BOS

Pista 22R em azul, 22L em vermelho e 27 em verde (adaptado).

Fonte: (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011)

De acordo com (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011), Considerou-se a carga de trabalho dos controladores de voo e seus procedimentos na implementação da estratégia. Discutiu-se técnicas de controle eficientes que pudessem ser adicionadas aos atuais procedimentos com mínimo acréscimo de carga de trabalho e modificações de procedimentos. Decidiu-se, em conjunto com controladores, que as taxas de *pushback* deveriam ser sugeridas para cada período de 15 minutos de maneira a adequar-se apropriadamente aos procedimentos já utilizados pelos controladores.

3.1 Implementação do *N-control*

A execução do *N-control*, consiste na identificação do limitante de aeronaves a partir da curva apropriada e a verificação se o número N de aeronaves em procedimento de *taxi-out* supera o limiar de rendimento do sistema.

1. Prevê-se o número de pousos para os próximos 15 minutos e usa-se como dado de entrada na curva apropriada da regressão do rendimento do sistema para, então determinar-se o limiar de rendimento do sistema.
2. Por método visual realiza-se a contagem das aeronaves em procedimento de *taxi-out* ou pelo controle do número de aeronaves que realizaram *pushback* e que ainda não decolaram tem-se o número de aeronaves N que estão em procedimento de *taxi-out*. Considera-se que uma aeronave está em procedimento de *taxi-out* a partir do momento que o *pushback* da aeronave é iniciado até o instante que é autorizada sua entrada na pista.
3. Se o número N de aeronaves em procedimento de *taxi-out* supera o rendimento do sistema, não se autoriza *pushbacks* adicionais até que N, esteja abaixo do valor limite determinado, lembrando-se de que o rendimento limite pode mudar de acordo com a taxa esperada de pousos para o próximo período.

3.2 Implementação do *pushback rate control*

A prática do *pushback rate control*, por sua vez, fundamenta-se na determinação da taxa de *pushback* de maneira que o número de aeronaves em procedimento de *taxi-out* seja próxima de um valor adequado (N_{ctrl}), onde N_{ctrl} é maior que o limiar determinado para a aeroporto em questão. Dessa maneira minimiza-se o risco de subutilizar a pista de decolagens, uma vez que podem ocorrer conflitos de *gates* ou incapacidade de cumprir horários de partida.

De acordo com (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011), utilizou-se os passos a seguir para a determinação da taxa de *pushback* para os próximos 15 minutos no BOS.

1. Prevê-se o número de pousos para os próximos 15 minutos e usa-se como dado de entrada na curva apropriada da regressão do rendimento do sistema para, então determina-se o limiar de rendimento do sistema.
2. Por método visual realiza-se a contagem das aeronaves em procedimento de *taxi-out* ou pelo controle do número de aeronaves que realizaram *pushback* e que ainda não decolaram tem-se o número de aeronaves N que estão em procedimento de *taxi-out*, está incluso nessa contagem a aeronave a partir do momento que o seu *pushback* é iniciado até o instante que é autorizada sua entrada na pista.
3. De posse do número de aeronaves N em procedimento de *taxi-out* e o valor esperado de pousos para os próximos 15 minutos, determina-se o rendimento esperado do sistema para os próximos 15 minutos da curva apropriada da regressão do rendimento do sistema
4. Denomina-se R_{15} como diferença entre o número de aeronaves em procedimento de *taxi-out* e o rendimento esperado do sistema para os próximos 15 minutos. R_{15} é o número esperado de aeronaves em procedimento de *taxi-out* que permanecerão em solo nos próximos 15 minutos.
5. A diferença em N_{ctrl} e R_{15} é o número recomendado de *pushbacks* adicionais recomendado para os próximos 15 minutos.

6. Transforma-se o número recomendado de *pushbacks* adicionais para os próximos 15 minutos em uma taxa de *pushbacks* para um menor intervalo de tempo de mais fácil implementação operacionalmente. Por exemplo, 5 aeronaves nos próximos 15 minutos pode ser expresso como uma taxa de 1 aeronave a cada 3 minutos.

Apresenta-se, a seguir um exemplo do cálculo da recomendação de *pushbacks* adicionais para os próximos 15 minutos.

1. Espera-se que o número de pousos para os próximos 15 minutos seja de 8 aeronaves. Da Figura 3 tem-se que o limiar do rendimento do sistema é de 11 aeronaves decolando a cada 15 minutos. Adota-se N_{ctrl} igual a 12, uma vez que devemos adotar um valor maior que o limiar para o aeroporto em questão para evitar ociosidade da pista.
2. Após uma contagem realizada de maneira visual, tem-se 16 aeronaves em procedimento de *taxi-out*.
3. Determina-se agora o rendimento para os próximos 15 minutos. Da Figura 3 tem-se que o rendimento esperado para os próximos 15 minutos é igual a 10 aeronaves decolando nos próximos 15 minutos.
4. Calcula-se então R_{15} igual a 6 aeronaves, isso significa que se espera que, das aeronaves que estão em procedimento de *taxi-out*, 6 permaneçam em solo nos próximos 15 minutos.
5. A recomendação de *pushbacks* adicionais é igual ao N_{ctrl} adotado subtraído de R_{15} . Recomenda-se a autorização de 6 *pushbacks* para os próximos 15 minutos.
6. Pode-se expressar a taxa de *pushbacks* recomendada por 2 *pushbacks* a cada 5 minutos durante os próximos 15 minutos.

A Figura 5 apresenta um esquema ilustrando os passos necessários para cálculo da taxa de *pushbacks* a ser sugerida.

Sabendo do que consistem as duas estratégias pode-se observar dois caminhos distintos para a obtenção do objetivo. O primeiro método indica a interrupção de autorizações de *pushbacks* adicionais enquanto o número de aeronaves em táxi não reduzir para menos que o limiar enquanto o segundo sugere uma taxa para regular o número de aeronaves em movimentação no solo. Pode-se também examinar a estratégia do *N-control* como sendo corretiva, pois esta entra em ação quando o congestionamento excessivo ocorre, à medida que a outra age como preventiva de maneira que se evite os estados congestionados. Desta maneira torna-se mais vantajoso operacionalmente a regulação das operações de *pushback* e elege-se o uso do *pushback rate control* para aplicação no aeroporto de Brasília.

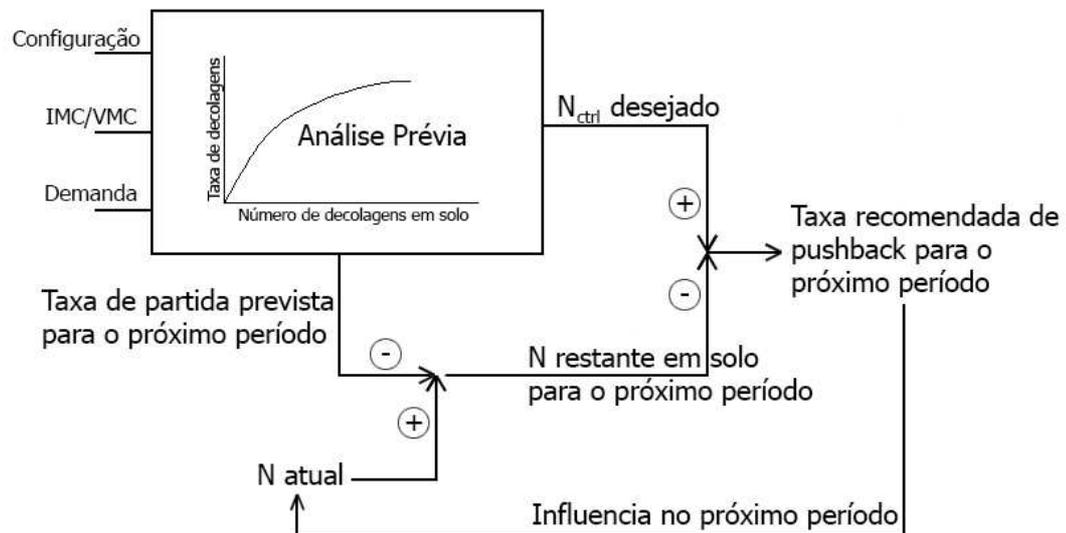


Figura 5 - Esquema para cálculo de taxa de *pushbacks* (adaptado)

Fonte: (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011)

4 Aeroporto de Brasília

O Aeroporto Internacional de Brasília — Presidente Juscelino Kubitschek (IATA: BSB, ICAO: SBBR) é o aeroporto que serve a capital do Brasil, Brasília. Por estar localizado no centro do país, é o aeroporto mais movimentado da região Centro-Oeste e serve de conexão para as principais cidades do Brasil. Em 2013, era o quarto aeroporto mais movimentado do país (atrás apenas de Guarulhos, Galeão e Congonhas), porém no primeiro semestre de 2014 foi o segundo maior aeroporto brasileiro em movimentação de passageiros, conforme pode apresentado na Tabela 3. A Tabela 4, por sua vez, mostra a movimentação de passageiros nos últimos anos.

Tabela 3 - Movimento nos aeroportos brasileiros no primeiro semestre de 2014

Aeroporto	Passageiros (milhões)
Guarulhos	19,0
Brasília	8,6
Congonhas	8,5
Galeão	8,4

Fonte: (Infraero, 2014), (GRU AIRPORT, 2014), (Viracopos, 2014), (Aeroporto de Brasília, 2014) e (RIOgaleão, 2014)

Tabela 4 - Movimentação de passageiros e aeronaves no Aeroporto de Brasília

Ano	Passageiros	Aeronaves
2014*	13.265.663	136.700
2013	16.489.987	179.656
2012	15.891.530	188.528
2011	15.398.737	189.570
2010	14.347.061	176.326
2009	12.213.825	162.349
2008	10.443.393	141.477

*Dados de janeiro à setembro de 2014

Fonte: (Infraero, 2014) e (Aeroporto de Brasília, 2014)

O Aeroporto Internacional de Brasília, que estava no projeto de concessão do Governo Federal, cujo leilão ocorreu no início de fevereiro de 2012, foi arrematado por 4,5 bilhões de Reais. Desde do dia 1º de dezembro de 2012, a Inframérica, Consórcio responsável por sua administração, vem expandindo e modernizando o *BSB Airport*, que antes era administrado pela Infraero.

A Inframérica investiu R\$ 900 milhões no Aeroporto de Brasília até a Copa do Mundo. Com este investimento, o número de pontes de embarque aumentou de 13 para 29, implementou-se um novo sistema de bagagem completamente automatizado, além de novos elevadores e esteiras rolantes, reforma geral dos terminais existentes, entre outras melhorias. No que se refere a opções de serviços, lazer e consumo, um *aeroshopping* composto por mais de 130 lojas foi implantado.

5 Aplicação do *pushback rate control* no Aeroporto de Brasília

5.1 Dados de movimentação SGTC

Para a aplicação da estratégia do *pushback rate control* necessita-se da definição de um limiar conforme apresentado no item 2. Para tal, primeiramente, necessita-se dos dados referentes aos tempos de táxi das aeronaves no aeroporto de Brasília. Dessa maneira, encaminhou-se um ofício ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) solicitando-se, inicialmente, os dados referentes aos instantes de início de *pushback*, de chegada ao ponto de espera e tempo total de táxi, além dos instantes de pousos e decolagens para o aeroporto de Brasília. Os dados fornecidos consistem de dois dias consecutivos para cada mês do ano de 2013, o Anexo 1 apresenta um exemplo dos dados fornecidos pelo ICEA.

Para o cálculo do tempo total de táxi de cada aeronave, calcula-se a diferença entre o instante que a aeronave inicia o *pushback*, representado na base de dados por “Autorizado *Push-Back*”, e no momento que em a aeronave ingressa na pista de decolagem, representado na base de dados por “Autorizado Ingresso na Pista”, enquanto considerou-se uma aeronave decolada e aeronave pousada a partir dos comandos “Decolado (TWR)” e “Pousado (TWR)” respectivamente. Ao iniciar os cálculos necessários para a aplicação do *pushback rate control*, constatou-se a existência de deficiências na base de dados que deveriam ser corrigidas antes de dar continuidade aos cálculos.

5.1.1 Ajustes da base de dados.

Dos obstáculos que surgiram ao iniciar-se o trabalho na base, incluem-se os seguintes:

- Problemas de tipografia. Por exemplo, o voo GLO1515, poderia ser representado por GL01515, havendo uma troca da vogal “O” pelo número “0” em algumas identificações de voos.
- Duplicata de comandos. Determinado voo poderia apresentar mais de um comando de “Autorizado *Push-Back*”, “Autorizado Ingresso na Pista”, “Decolado (TWR)” ou “Pousado (TWR).”
- Ausência de comandos. Determinado voo poderia não possuir um dos comandos requeridos (“Autorizado *Push-Back*”, “Autorizado Ingresso na

Pista” e “Decolado (TWR)”). Não constatou-se voos com falta simultânea dos três comandos requeridos.

- Descontinuação. Em voos que ocorrem durante a madrugada, um voo pode iniciar o procedimento de táxi em um dia que não faz parte da base de dados e decolar no dia seguinte, o qual faz parte da base de dados utilizada.

A Tabela 5 apresenta os dados referentes às correções do banco de dados do aeroporto de Brasília. Onde A1 representa o número de voos que apresentavam comando de “Autorizado *Push-Back*” duplicado. A2, por sua vez, corresponde ao número de voos que não possuíam o comando de “Autorizado Ingresso na Pista”. Enquanto A3 retrata o número de voos que exibiam o comando de “Autorizado Ingresso na Pista” duplicado. A4, por último, equivale ao número de voos que não trazem o comando de “Autorizado *Push-Back*”.

Percebe-se o grande número de ajustes que foram realizados na base de dados fornecida. Quase um quinto dos voos possuíam alguma das deficiências de duplicata ou ausência de comandos. Os ajustes nos outros dois obstáculos apontados, problemas de tipografia e de descontinuação, além de eventuais erros nos comandos de “Decolado (TWR)” e “Pousado (TWR)” foram corrigidos manualmente.

Importante ressaltar que os comandos criados de “Autorizado *Push-Back*” e “Autorizado Ingresso na Pista” não possuem o horário em que o comando ocorreu na realidade. Estimou-se o instante dos comandos criados com base nos dados que não necessitaram de ajustes. A partir dos dados não deficientes calculou-se a média do tempo de táxi das aeronaves, o qual é de 12,8 minutos, conforme pode ser visualizado na Tabela 5. Em conjunto com a criação dos comandos ausentes, manipulou-se os horários de maneira que estes voos possuísem a mesma média calculada. Também vale notar que no caso de duplicata de comandos, utilizou-se o comando ocorrido no momento posterior, considerando-se que a aeronave não iniciou seu *pushback* ou ingresso na pista no primeiro momento que foi autorizado por algum motivo. Escolheu-se como dado válido o procedimento de *pushback* ou ingresso na pista que teve início no segundo comando fornecido.

Tabela 5 - Parâmetros dos ajustes da base de dados

Mês	Dia	Nº de Voos	Nº de ajustes	A1	A2	A3	A4	Mín. (min)	Máx. (min)	Média (min)	% de voos ajustados
1	7	266	28	3	10	8	7	3,8	34,8	11,3	11%
	8	270	53	3	30	7	13	2,1	38,8	12,0	20%
2	4	303	45	1	19	8	17	7,3	49,3	16,6	15%
	5	286	34	4	16	4	10	5,0	38,7	15,7	12%
3	3	201	14	2	4	5	3	5,4	29,0	13,4	7%
	4	251	39	3	13	10	13	3,6	39,7	12,3	16%
4	1	275	47	5	22	5	15	3,1	37,9	13,2	17%
	2	310	59	3	26	6	24	2,4	54,3	14,3	19%
5	7	317	77	3	50	6	18	4,7	41,7	11,5	24%
	8	316	61	5	22	19	15	5,0	35,5	13,6	19%
6	4	296	45	6	14	9	16	3,9	50,5	11,4	15%
	5	289	38	4	25	2	7	4,3	37,2	13,9	13%
7	2	312	106	7	73	16	10	5,5	24,5	11,8	34%
	3	316	54	1	33	8	12	0,8	25,8	13,3	17%
8	6	285	68	7	43	5	13	4,5	54,6	9,9	24%
	7	318	131	2	111	3	15	2,9	42,5	11,0	41%
9	3	285	48	3	8	28	9	4,0	40,3	11,3	17%
	4	298	34	1	12	17	4	2,9	33,0	9,4	11%
10	1	291	21	0	9	9	3	4,4	29,0	11,4	7%
	2	271	103	2	93	4	4	4,6	138,4	15,4	38%
11	5	290	46	0	35	10	1	4,7	53,3	14,7	16%
	6	277	44	2	26	11	5	5,3	44,5	12,9	16%
12	3	337	56	0	45	10	1	0,3	49,7	13,5	17%
	4	326	30	3	14	10	3	0,9	35,5	14,2	9%
Média geral										12,8	18%

5.1.2 Manipulação da base de dados

Após a realização dos devidos ajustes, iniciou-se as manipulações dos dados para dar continuidade à implementação do *pushback rate control*. Conforme pode ser visualizado na Figura 3, necessita-se de 3 parâmetros para a construção do gráfico. Estes indicadores são a quantidade de aeronaves em procedimento de táxi em determinado instante e os respectivos números de pousos e decolagens que ocorrem em um intervalo de tempo pré-determinado a partir do instante escolhido para o primeiro parâmetro.

Usando uma variável que soma uma unidade toda vez que uma aeronave começa o procedimento de *pushback* e subtrai uma unidade toda vez que uma aeronave ingressa na pista, foi possível ter o número de aeronaves em procedimento de táxi no aeroporto de Brasília em qualquer instante.

Vale ressaltar que, devido à média de tempo de táxi das aeronaves ter sido 12,8 minutos, escolheu-se pela utilização do intervalo de 15 minutos, que é um período apropriado para a adequação aos procedimentos aos quais os controladores já estão habituados. (Simaiakis, Khadilkar, Balakrishnan, Reynolds, & Hansman, 2011).

Optou-se, então, por duas diferentes abordagens. A primeira abordagem, a qual foi denominada por Absoluta – 15 minutos, inicia-se com o número de aeronaves em procedimento de táxi no início do dia, as 00:00:01, e apura-se o número de decolagens e pousos que ocorrem para os próximos 15 minutos. Em seguida, com o número de aeronaves em procedimento de táxi após 15 minutos, as 00:15:01, e apura-se, novamente o número de decolagens e pousos dos 15 minutos seguintes, repete-se, então, o processo até o fim do dia. A segunda abordagem, denominada por Relativa – 15 minutos, inicia-se com o número de aeronaves em procedimento de táxi no instante em que uma aeronave inicia seu *pushback*, conta-se, então, o número de pousos e decolagens nos 15 minutos seguintes ao instante em que a aeronave iniciou seu *pushback*. Em seguida, realiza-se o mesmo procedimento para a próxima aeronave a iniciar seu *pushback*. Para a abordagem relativa, continua-se o processo até a última aeronave a iniciar seu *pushback*, até as 23:45:00, devido à necessidade dos dados de pousos e decolagens para os 15 minutos seguintes.

Tendo em vista o número de observações de cada uma das abordagens, tem-se um número fixo na Absoluta, o qual é de 4 dados por hora, totalizando 96 por dia, enquanto a Relativa depende do número de voos diários. No banco de dados, tem-se uma média diária de 291 voos diários, o que fornece o mesmo número de intervalos válidos para o modelo. Desta maneira optou-se pelo uso da Abordagem Relativa – 15 minutos devido à maior amostragem para uma melhor validação do modelo.

5.1.3 Curva de rendimento do sistema de pistas de Brasília

Inicialmente, analisando-se o formato das curvas de rendimento de cada mês, tem-se as Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9, as quais apresentam os gráficos gerados a partir dos primeiros quatro meses de 2013 na abordagem Relativa – 15 minutos.

No passo seguinte, analisando o formato da curva de rendimento do aeroporto de Boston na Figura 3, observa-se um trecho inicial linear seguido por um trecho similar a uma função logarítmica. Dessa maneira, para o ajuste das curvas, optou-se pela separação em duas curvas, uma com os dados referentes ao número de aeronaves em procedimento de táxi igual ou menor a 6 aeronaves enquanto a segunda curva com dados referentes a mais de 6 aeronaves em procedimento de táxi.

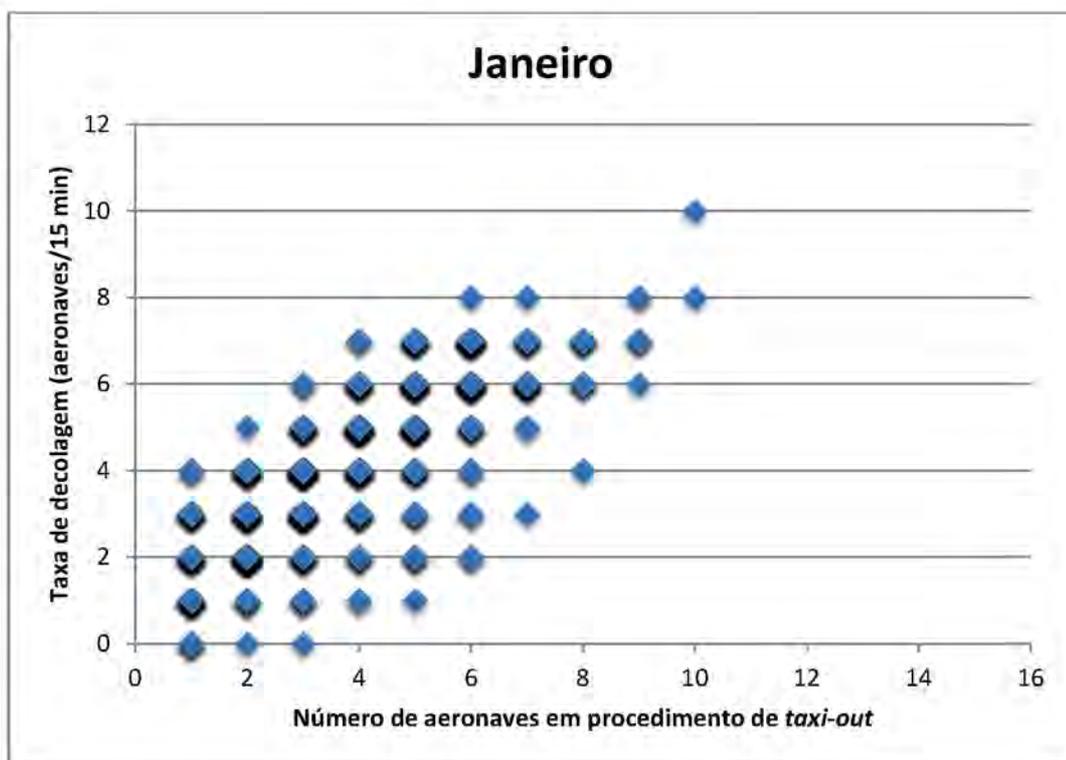


Figura 6 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Janeiro

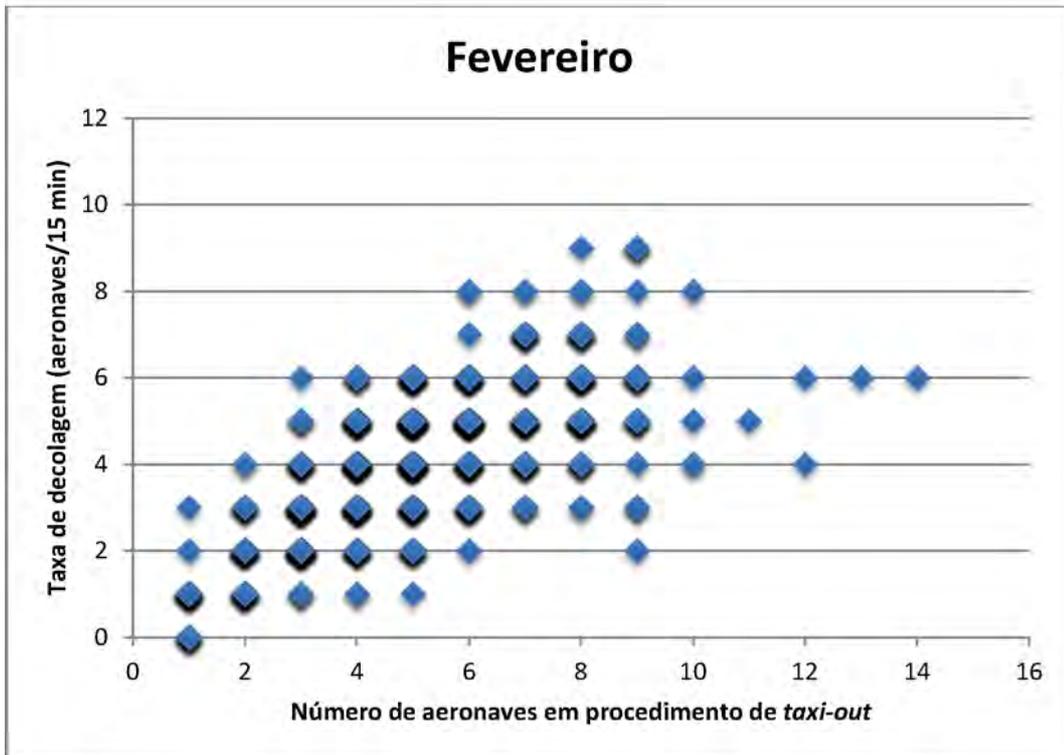


Figura 7 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Fevereiro

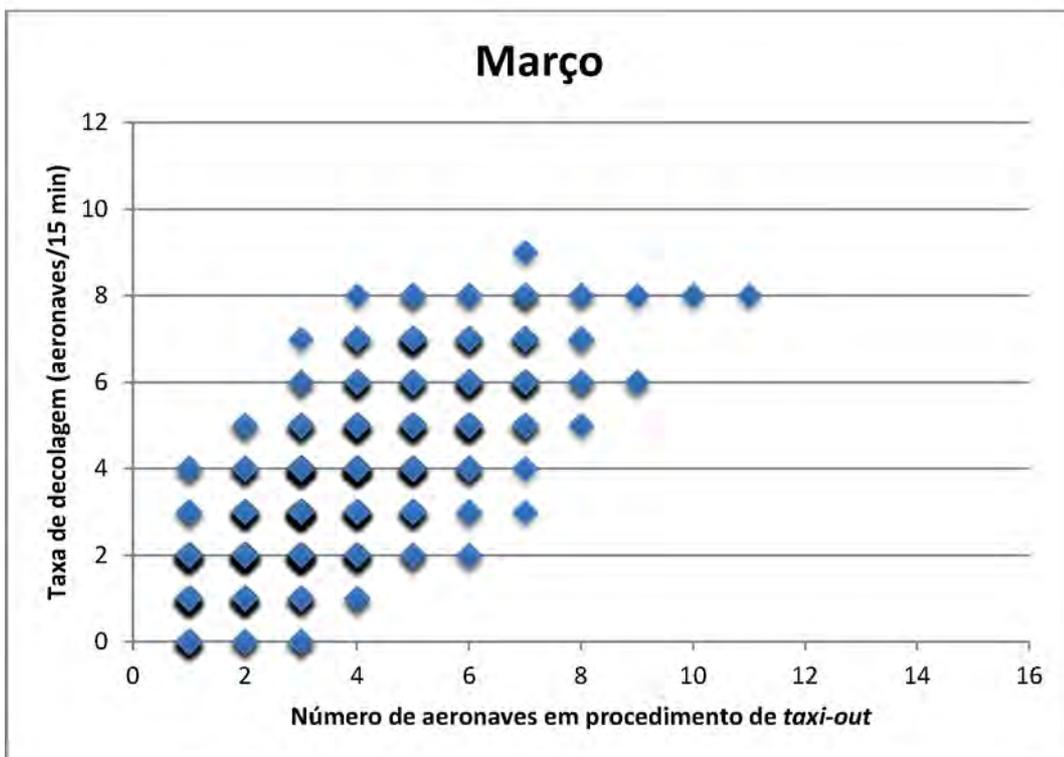


Figura 8 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Março

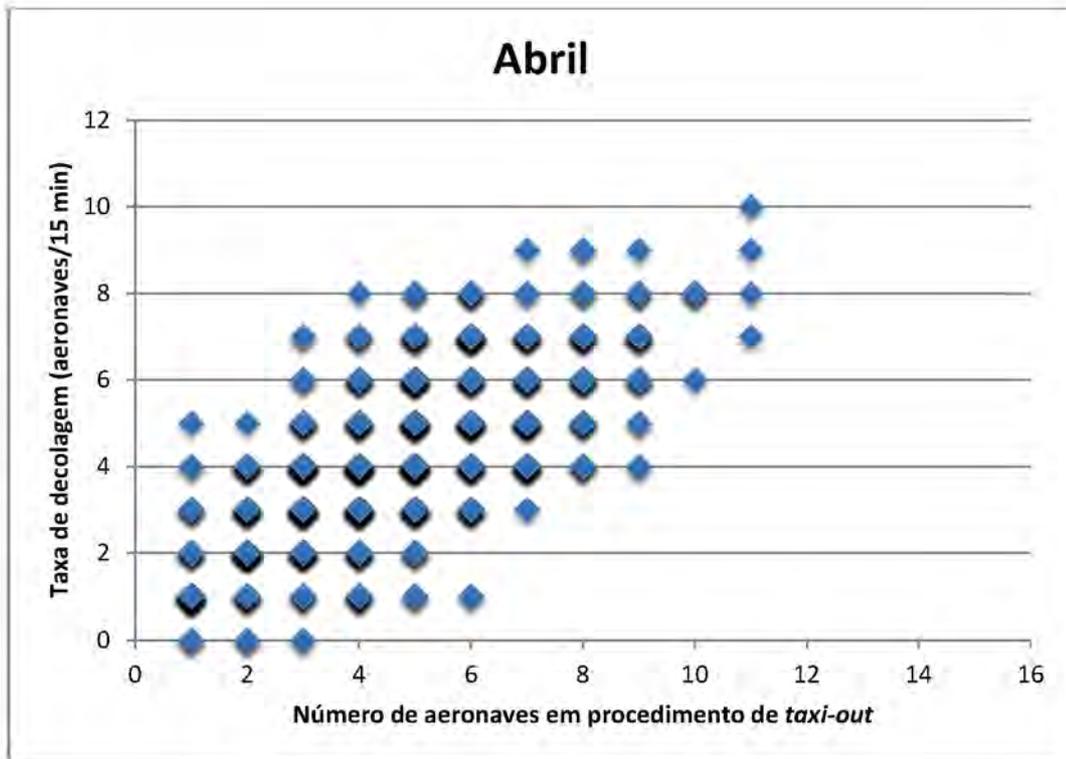


Figura 9 - Distribuição dos pontos referentes ao mês de Abril

Nos Apêndice 1 e Apêndice 2 são mostrados todas as distribuições mensais dos pontos do banco de dados.

Dessa maneira, as Figura 10 e Figura 11 apresentam o trecho linear e logarítmico respectivamente a partir da abordagem Relativa – 15 minutos. Vale ressaltar que nestas duas curvas consideram-se todos os dados do ano em conjunto.

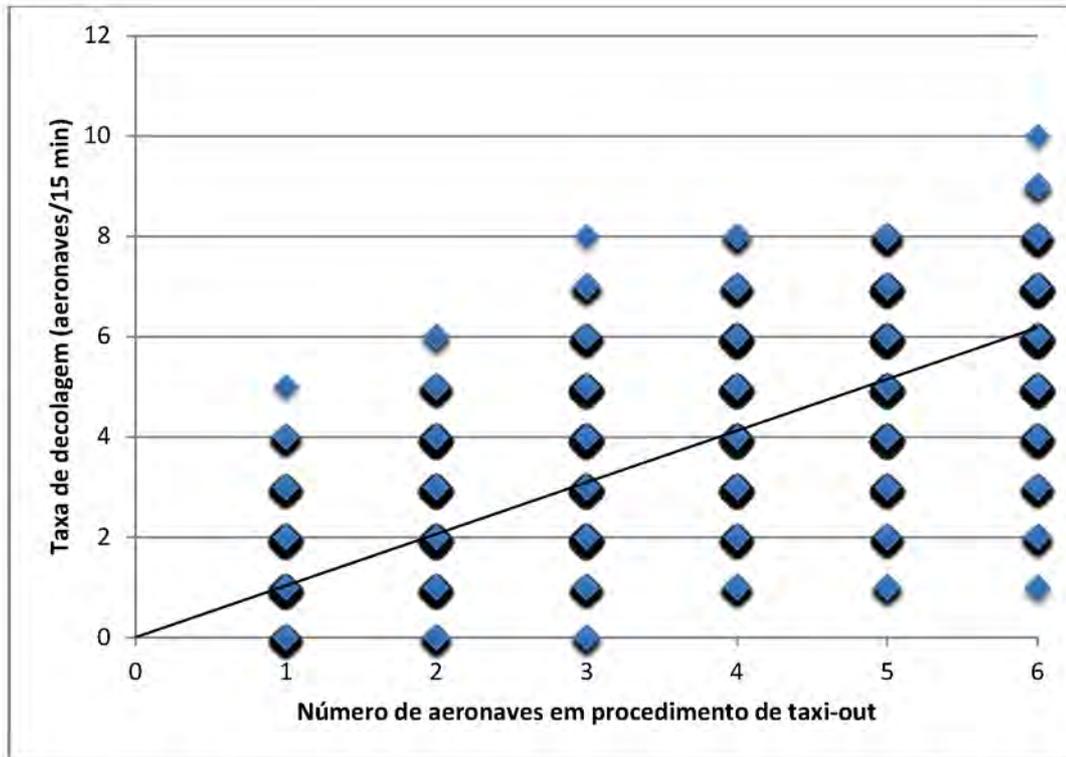


Figura 10 - Distribuição dos pontos referentes até 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out*

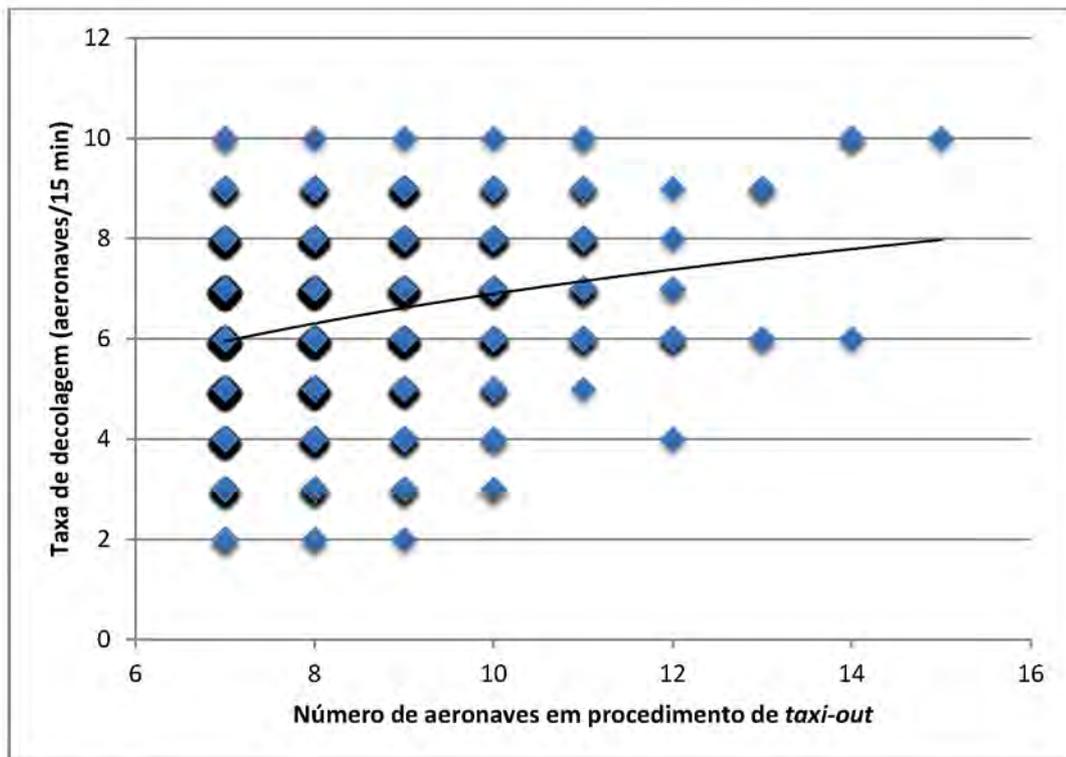


Figura 11 - Distribuição dos pontos referentes a mais de 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out*

Outro detalhe vantajoso a replicar para o aeroporto de Brasília, é uma parametrização da taxa de decolagem também pelo número esperado de pousos para o intervalo de tempo considerado.

Optou-se pela elaboração das primeiras curvas referentes aos dados com 0 a 3 pousos no intervalo de tempo considerado. Enquanto a segunda curva seria referente aos dados com 7 e 10 pousos para o mesmo período. Decidiu-se pela construção dos gráficos com um intervalo de número de aeronaves (0 a 3 e 7 a 10) pousando, ao invés de construir gráficos individualmente para cada número de aeronaves em pouso, de modo a se ter um tamanho de amostra maior para que a curva melhor represente o comportamento esperado. As Figura 12 e Figura 13 apresentam as curvas citadas apenas para até 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out*, uma vez que para 6 ou menos aeronaves o comportamento tende à função identidade (reta $y = x$), no qual número esperado de decolagens nos 15 minutos seguintes aumenta em uma unidade para cada aeronave adicional cujo *pushback* é autorizado. Enquanto as Figura 14 e Figura 15 mostram as mesmas curvas para mais de 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out*.

Como era esperado em relação a parametrização pelo número esperado nos próximos 15 minutos, também constatou-se nas curvas geradas para o aeroporto de Brasília o mesmo comportamento apresentado no aeroporto de Boston, conforme a Figura 3. Examinando as quatro curvas criadas percebe-se que a função logarítmica ajustada para 7 a 10 pousos cresce mais lentamente do que a função ajustada para 0 a 3 pousos. Observa-se então que ocorre uma maior interferência entre as aeronaves de *taxi-out* e *taxi-in* ao ser esperado um maior número de pousos para os próximos 15 minutos, razão esta pela qual o rendimento de autorizações adicionais de *pushback* geram um ganho em aeronaves decoladas cada vez menor.

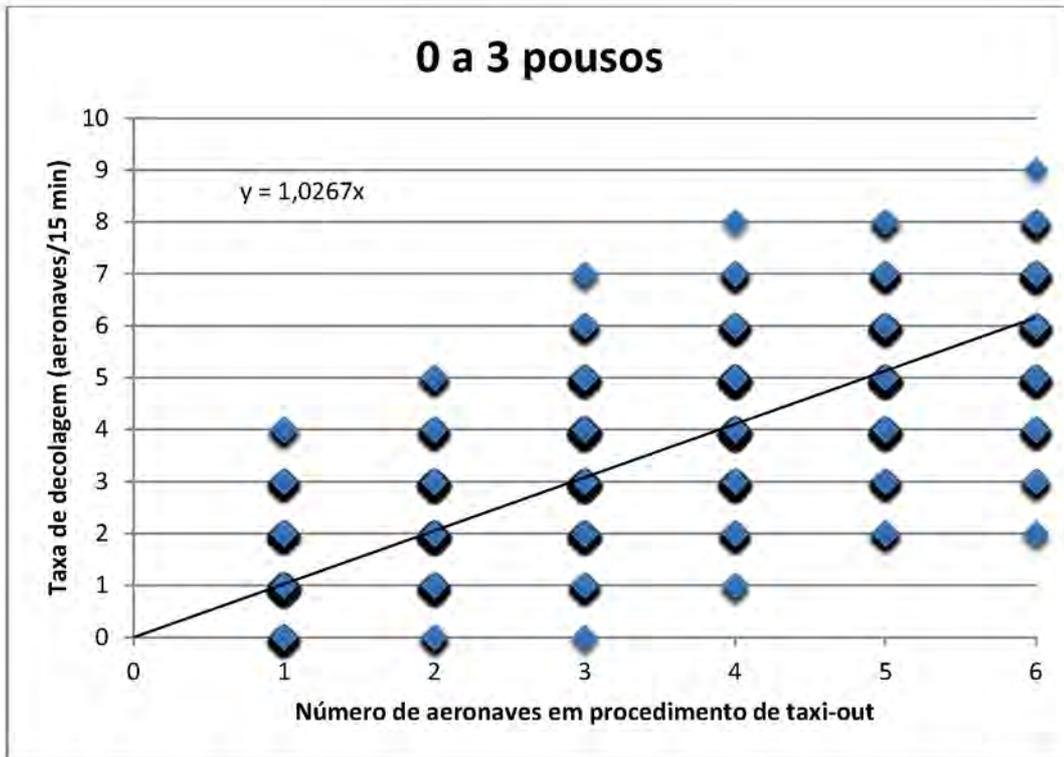


Figura 12 - Distribuição referente a até 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out* e 0 a 3 pousos

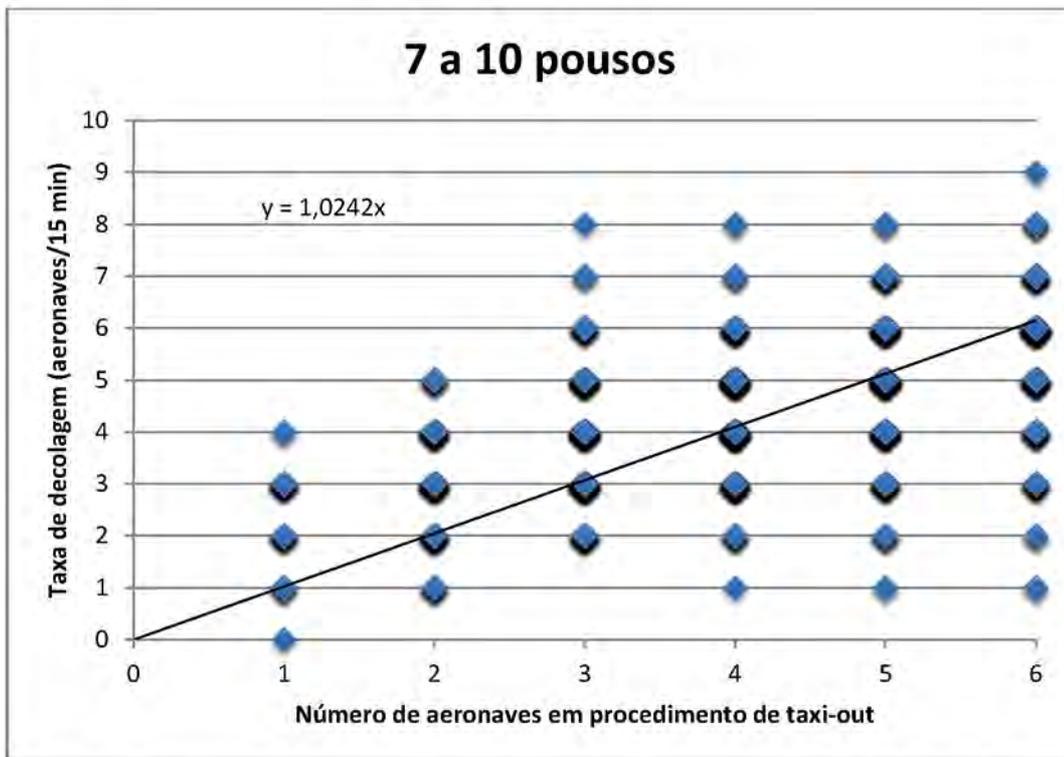


Figura 13 - Distribuição referente a até 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out* e 7 a 10 pousos

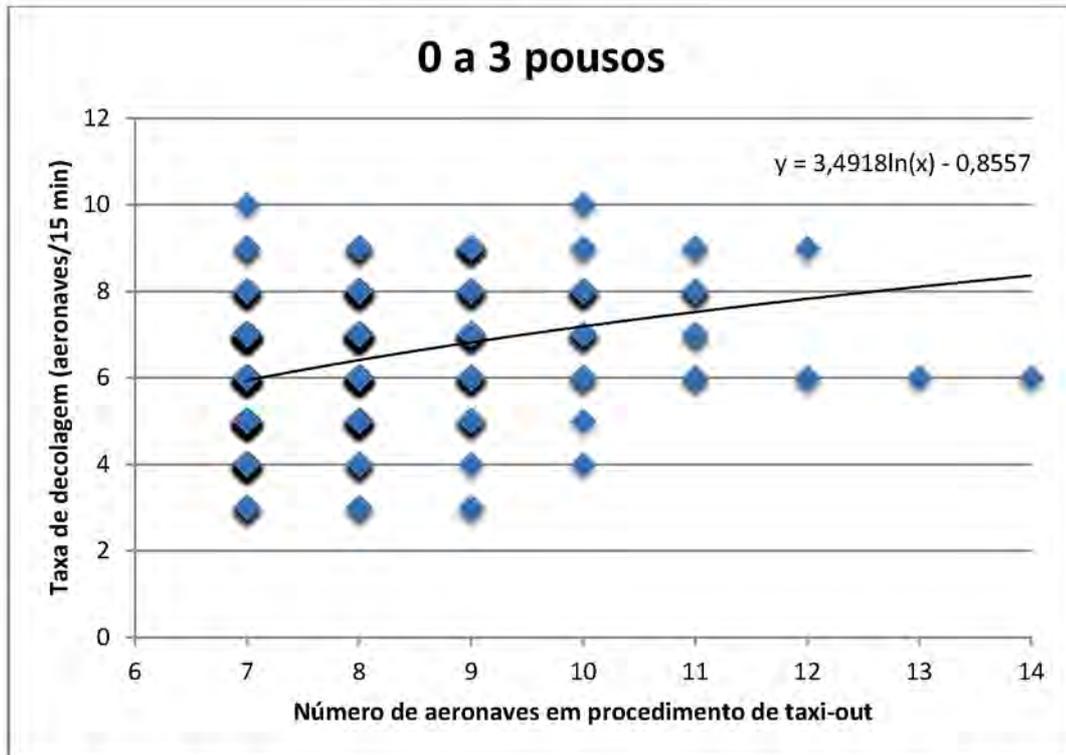


Figura 14 - Distribuição referente a mais de 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out* e 0 a 3 pousos

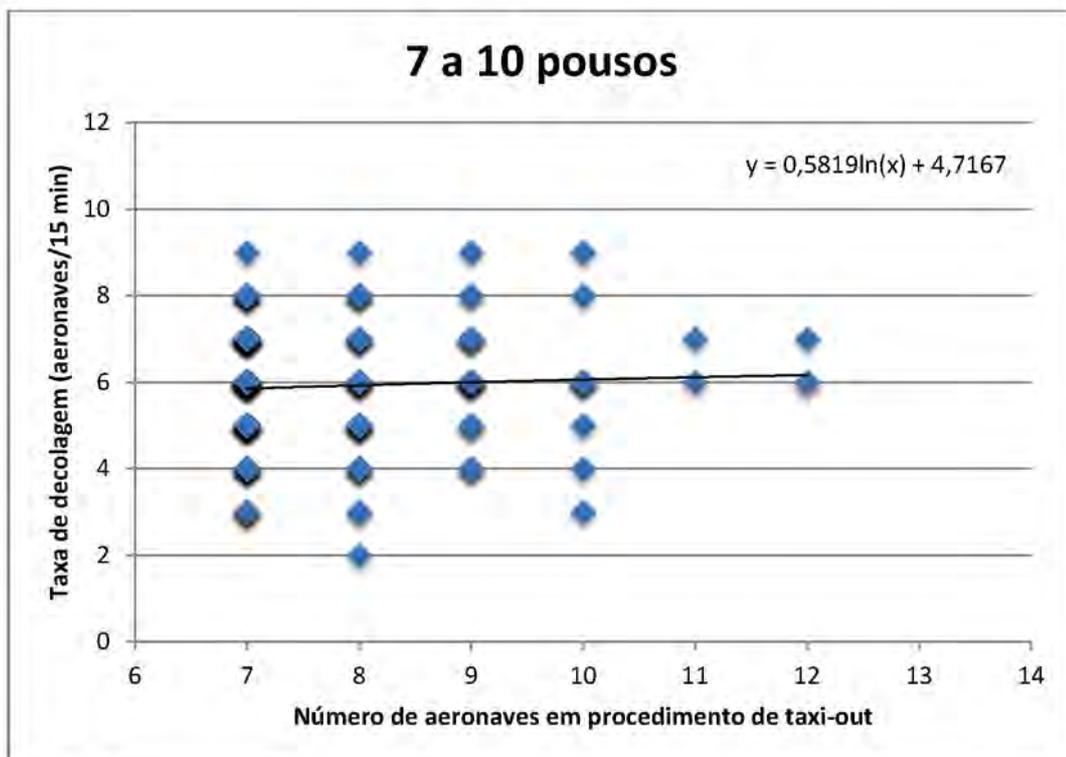


Figura 15 - Distribuição referente a mais de 6 aeronaves em procedimento de *taxi-out* e 7 a 10 pousos

Por fim podemos representar cada curva como a composição do trecho linear e do trecho logarítmico, conforme apresentação abaixo.

$$\text{Curva de 0 a 3 pousos: } \begin{cases} y = 1,0267x, & 0 \leq x \leq 6 \\ y = 3,4918 \ln(x) - 0,8557, & 7 \leq x < 14 \end{cases} \forall x \in \mathbb{Z}$$

$$\text{Curva de 7 a 10 pousos: } \begin{cases} y = 1,0242x, & 0 \leq x < 6 \\ y = 0,5819 \ln(x) + 4,7167, & 7 \leq x < 14 \end{cases} \forall x \in \mathbb{Z}$$

É importante notar que para o ajustes das curvas, a única restrição imposta foi de que o coeficiente linear das equações da reta ajustas fosse nulo, pois se não há aeronaves em táxi a taxa esperada de decolagens também é nula.

Pode-se questionar se a adoção das curvas de rendimento não subutilizaria a pista do aeroporto, tendo em vista que há um número considerável de observações que estão acima da curva obtida. A própria estratégia *Pushback Rate Control* sugere a adoção de um N_{ctrl} maior que o limiar determinado para reduzir o risco do não aproveitamento da capacidade total da pista. Devemos atentar também à quantidade de erros encontrados na base de dados e a proximidade dos voos militares da pista de decolagem, conforme pode ser visualizado no Anexo 2. Também interpreta-se essa menor distância a ser percorrida a partir do valor mínimo de tempo de táxi apresentado na Tabela 5 de 0,3 minutos. Tendo em vista essa grande diferença de distância entre os terminais civis e militares para a pista de decolagem, é de se esperar um espalhamento maior dos pontos amostrais.

Por último podemos dar ênfase em alguns aspectos limitantes dos resultados obtidos a partir do modelo. Temos que a curva de rendimento adotada para o *Pushback Rate Control* é referente à uma única configuração de pistas de determinado aeroporto, logo esta deve ser construída a partir de um banco de dados de voos no qual se utilizou a mesma configuração. Na aplicação do método para o aeroporto de Brasília não haviam informações referentes à configuração utilizada. Apesar da predominância de utilização da configuração 11L | 11R no aeroporto de Brasília, não há garantia de que a curva de rendimento obtida seja a melhor para aplicação para esta configuração predominante. Outro aspecto válido de observação seria a grande diferença de distância de táxi das posições de táxi da aeronaves da Azul quando comparadas com as posições da Tam.

6 Modelagem do aeroporto de Brasília

Como outra alternativa para o gerenciamento da movimentação de aeronaves em solo, desenvolveu-se o conceito de um modelo de otimização para o aeroporto de Brasília. Neste modelo, necessita-se dos voos programados para o período e suas informações, como horário previsto de saída ou chegada, portão de saída ou chegada da aeronave, além do tipo de aeronave e as suas velocidades durante operações de táxi, *pushback*, pouso e decolagem.

Para melhor entender como o modelo funciona, faz-se necessário, primeiramente, observar a Figura 16 juntamente com a carta do aeródromo de Brasília e uma representação das posições de estacionamento das aeronaves, estas são apresentadas nos Anexo 2 e Anexo 3. Em seguida, é possível observar nas Figura 17 e Figura 18 a modelagem do aeroporto de Brasília criada e seus pontos de controle. É importante notar que os pontos de 1 a 30 são os *gates*, pontos de parada das aeronaves. Nas Tabela 6 e Tabela 7 apresentam-se os caminhos possíveis, com seus pontos de controle e suas respectivas distâncias, que uma aeronave pode percorrer tanto em uma operação de decolagem ou de pouso.

Examinando com mais atenção uma aeronave saindo do ponto de controle 3, um dos 30 *gates*. Esta aeronave percorre 50 metros para chegar ao ponto de controle 31. Em seguida, percorre 250 metros para chegar ao ponto de controle 32. De maneira que, ao final, esta percorre os 3300 metros para chegar ao ponto 37, onde considera-se que decolou. Na tabela de possíveis caminhos de pouso, o identificador está escrito na forma de quatro algarismos, como 4804, os dois primeiros algarismos indicam o primeiro ponto de controle que a aeronave atinge, percebe-se que está pousando pela pista 11L, conforme pode ser observado no Anexo 2. Os dois últimos algarismos indicam qual ponto de controle a aeronave parará. É importante observar que dependendo de onde a aeronave começa ou termina seu trajeto, esta passa por um diferente número de pontos de controle com distâncias diferentes. Vale ressaltar que a modelagem criada refere-se à uma única configuração de pistas para o aeroporto de Brasília, a configuração 11L | 11R.



Figura 16 - Imagem de satélite do aeroporto de Brasília

Fonte: (Google Earth, 2014)

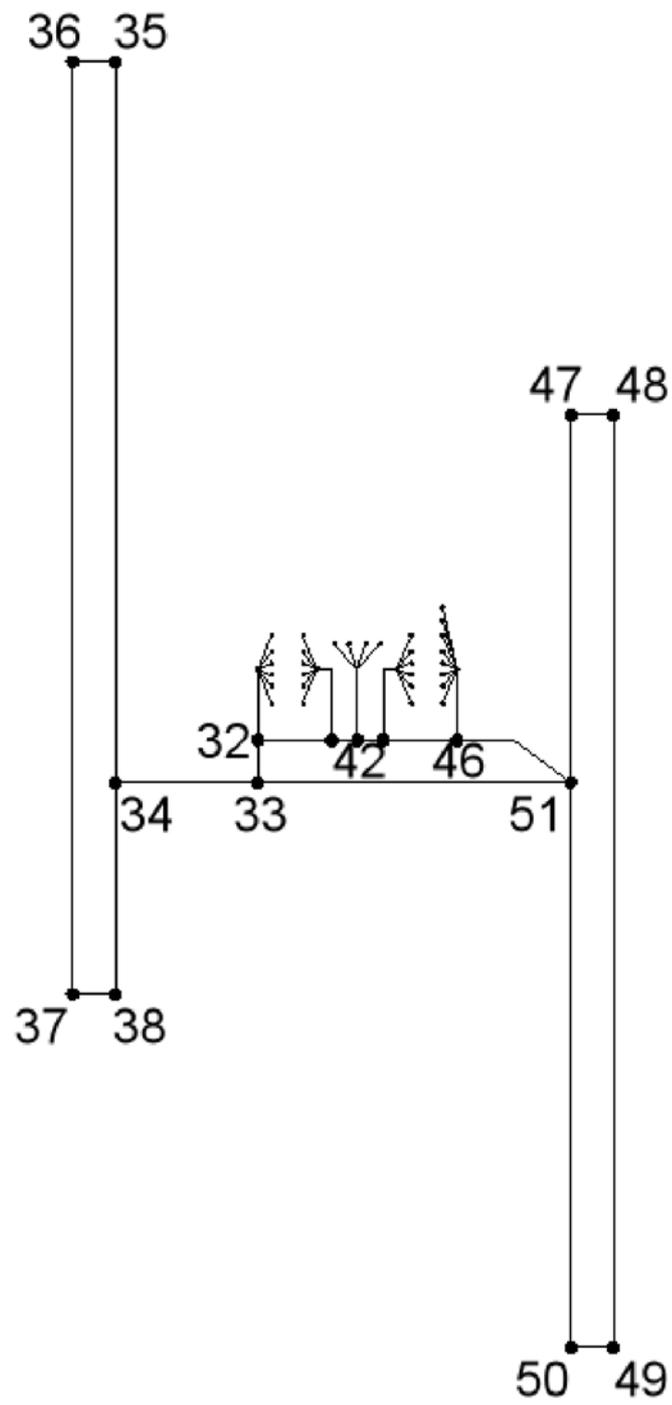


Figura 17 - Modelo das pistas e dos pontos de controle adotado para o aeroporto de Brasília

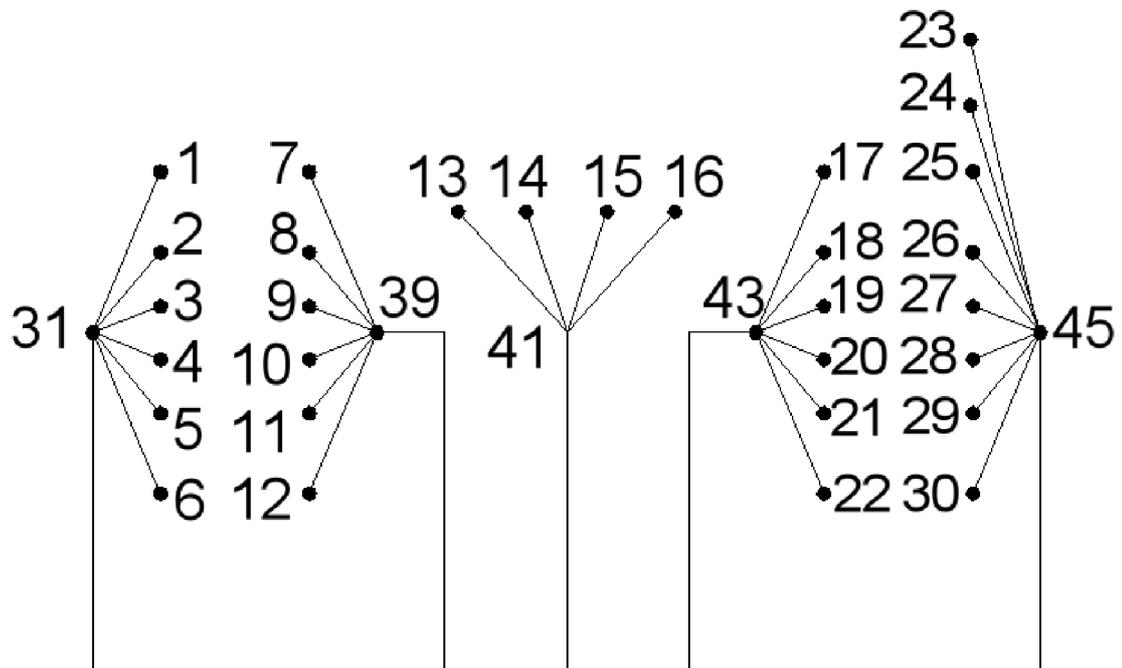


Figura 18 - Detalhe dos gates do modelo do aeroporto de Brasília

Tabela 6 - Caminhos percorridos por uma aeronave decolando de um dos 12 gates (distâncias em metros)

		Decolagens									
Pontos	31	32	33	34	35	36	37				
1 a 6	50	250	150	500	2550	150	3300				
Pontos	39	40	32	33	34	35	36	37			
7 a 12	50	250	150	150	500	2550	150	3300			
Pontos	41	42	40	32	33	34	35	36	37		
13 a 16	50	250	100	150	150	500	2550	150	3300		
Pontos	43	44	42	40	32	33	34	35	36	37	
17 a 22	50	250	100	100	150	150	500	2550	150	3300	
Pontos	45	46	44	42	40	32	33	34	35	36	37
23 a 30	50	250	150	100	100	150	150	500	2550	150	3300

Tabela 7 - Caminhos percorridos por aeronaves pousando para um dos 12 *gates* (distâncias em metros)

Pousos								
Pontos	49	50	51	33	32	31	Final	
4801 a 4806	3300	150	2000	1100	150	250	50	
Pontos	49	50	51	33	32	40	39	Final
4807 a 4812	3300	150	2000	1100	150	150	250	50
Pontos	49	50	51	46	44	42	41	Final
4813 a 4816	3300	150	2000	550	150	100	250	50
Pontos	49	50	51	46	44	43	Final	
4817 a 4822	3300	150	2000	550	150	250	50	
Pontos	49	50	51	46	45	Final		
4823 a 4830	3300	150	2000	550	250	50		

De fato estamos trabalhando com as distâncias entre os pontos de controle, mas para dispormos dos horários em que a aeronave encontra-se em cada um dos pontos de controle, necessita-se da adoção das velocidades que cada tipo de aeronave percorrerá os pontos de controle para as operações, de táxi, *pushback* e decolagem. Também deve-se levar em conta o fenômeno de esteiras de turbulência que ocorrem durante pousos e decolagens de aeronaves, é importante manter a separação mínima de decolagem entre aeronaves. No modelo, o procedimento de decolagem começa no ponto de controle 36 e termina no 37. Uma vez que no modelo todas as decolagens ocorrem do ponto de controle 36, basta garantir que a diferença de tempo entre duas aeronaves passando por este ponto de controle seja de três minutos no mínimo. Desta maneira garante-se o quesito de segurança nas decolagens em relação às esteiras de turbulência (FAA).

Atentando para o que foi explanado e na forma que o modelo foi desenvolvido, adotar-se-á uma velocidade fictícia para que a aeronave percorra o trajeto entre os pontos 36 e 37 em exatos três minutos, de maneira a se tentar utilizar sempre a separação mínima. No modelo, uma aeronave é considerada decolada no ponto de controle 37 e não interfere mais nas operações em solo, apesar disso deve-se ter em mente que o momento que a aeronave passa por este último ponto no modelo é depois do que acontece na realidade. Este é apenas um artifício encontrado para garantir a separação mínima de decolagem entre aeronaves. Determina-se então a velocidade fictícia de decolagem igual a 18,3 m/s para percorrer os 3300 metros da pista em 3 minutos. A velocidade de táxi de uma aeronave é de 10,3 m/s (20 *knots*) em trechos retilíneos e de 5,1 m/s (10 *knots*) em curvas, adotou-se então os valores 9,0 m/s e

5,0 m/s para operações de táxi e *pushback* respectivamente. Na Tabela 8 apresenta-se um exemplo fictício para aeronave B737 e as velocidades adotadas.

Tabela 8 - Exemplo das velocidades médias da aeronave para *pushback* e táxi

Tipo	$V_{\text{táxi}}$ (m/s)	V_{pushback} (m/s)	$V_{\text{decolagem}}$ (m/s)
B737	9,0	5,0	18,3

De posse dos dados apresentados, é possível, a partir dos dados de determinado voo, calcular o horário que a aeronave estará presente em cada um dos pontos de controle que ela percorrerá, conforme apresentado na Tabela 9. Dessa maneira é possível constatar possíveis conflitos de rotas das aeronaves. Havendo conflito uma possível solução seria a não autorização do *pushback*, de forma que a aeronave mantenha-se no *gate* durante mais tempo e saia em um horário posterior ao previsto, de maneira a evitar o conflito juntamente com uma economia de combustível.

Tabela 9 - Exemplo de voos partindo dos pontos 1 a 6, com seus horários em cada ponto de controle

Voos que saem dos portões 1 a 6						
ID	Aeronave	Ponto inicial	Operação	H_{previsto}	H_{pushback}	Atraso (min)
JJ001	B737	1	Decolagem	10:00:00	10:00:00	0
JJ002	B737	2	Decolagem	10:15:00	10:18:00	3
JJ003	B737	3	Decolagem	10:27:00	10:27:00	0
H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37
10:00:10	10:00:51	10:01:16	10:02:39	10:09:44	10:10:09	10:13:27
10:18:10	10:18:51	10:19:16	10:20:39	10:27:44	10:28:09	10:31:27
10:27:10	10:27:51	10:28:16	10:29:39	10:36:44	10:37:09	10:40:27

Até agora apenas se apresentou exemplo de voos fictícios, porém, em um aeroporto com muitos pousos e decolagens, a correção de um conflito, a partir da atribuição de um atraso à uma aeronave ainda no *gate*, pode gerar outros conflitos com aeronaves posteriores. Visualizemos o seguinte exemplo, onde há um conflito entre duas aeronaves, A e B, decolando, então se atribuiria atraso à aeronave B, pois esta está mais distante da cabeceira da pista de decolagem. Devido a este atraso, gera-se um novo conflito durante o procedimento de táxi de uma aeronave C que está em procedimento de pouso. Então faz-se necessário a atribuição de um atraso maior ainda à aeronave B. Para evitar a criação de novos conflitos

então uma possível solução seria atribuir o primeiro atraso à aeronave A, mesmo esta estando mais próxima à cabeceira da pista de decolagem, mas, no geral, o atraso total seria menor.

Desta maneira, optou-se pelo uso do AIMMS (*Advanced Interactive Multidimensional Modeling System*), um sistema para modelagem via otimização. Então, a partir dos horários de cada voo em cada posição de controle, deseja-se eliminar todos os conflitos, mantendo-se a separação mínima entre aeronaves, enquanto minimiza-se a soma de atrasos atribuídos à aeronaves.

6.1 Modelo de otimização com AIMMS

Na criação do modelo são necessárias as declarações de diferentes aspectos do modelo. Para este problema de otimização estas declarações são conjuntos de elementos (*sets*), parâmetros (*parameters*), variáveis (*variables*), restrições aplicadas ao modelo (*constraints*), além de uma programação matemática (*mathematical program*), o qual determina a solução com o auxílio do *solver* de maneira que a função objetivo assuma o valor desejado, por exemplo o valor de máximo ou mínimo.

Primeiramente define-se os conjuntos de elementos envolvidos no problema a ser otimizado. Optou-se pelo uso de dois sets, o set “Voos”, o qual representa todos os voos chegando ou partindo do aeroporto a serem considerados na otimização, e o set “Posicao”, o qual representa os pontos de controle adotados para o modelo das pistas de pouso, decolagem e táxi. Representa-se o set “Voos” pelos índices “v” e “v1”, enquanto o set “Posicao” é descrito pelo índice “p”. Estes índices são necessários para a definição dos outros aspectos do modelo.

Em seguida, definem-se os parâmetros do modelo de otimização. Designam-se três parâmetros, o parâmetro “Horario(v,p)”, o qual corresponde ao horário que a aeronave “v” encontra-se no ponto de controle “p”, o parâmetro “MaxAtraso(v)”, o qual retrata o máximo atraso que pode ser imposto à aeronave “v”, e, por último, o parâmetro “Separacao(v,v1)”, o qual constitui a separação mínima que a aeronave “v” necessita de outra aeronave “v1”.

Posteriormente, elegem-se as variáveis do modelo. Escolheu-se três variáveis, a variável “Atraso(v)”, que representa o atraso imposto à aeronave “v”, a variável “SomaAtraso”, a qual é definida pela soma dos atrasos determinados para cada aeronave, e, por fim, a variável “HorarioFinal(v,p)”, que, por sua vez, é determinada a partir da soma do parâmetro “Horario(v,p)” com a variável “Atraso(v)”.

Logo depois, fixam-se as restrições às quais o modelo está sujeito. Fez-se uso de duas restrições, a restrição “ChecaAtraso(v)”, na qual se verifica se o atraso atribuído à aeronave “v” está abaixo do valor máximo de atraso que pode ser adotado, e a restrição “ChecaSeparacao(v,v1,p)”, que se constata, por sua vez, se a separação mínima entre as aeronaves “v” e “v1” é respeitada.

Por fim, determina-se a programação matemática de maneira a minimizar a variável “SomaAtraso”, sujeita a todas as variáveis e restrições apresentadas.

Também vale a pena ressaltar que faz-se o uso de duas rotinas (*procedures*) que trabalham diretamente para a aquisição dos dados de entrada (*Input Data*). As rotinas utilizadas são a “ReadDataFromExcel”, a qual atribui valores às declarações de *sets* e parâmetros do modelo, e a “DetermineConsecutiveRange”, que, determinará a o conjunto de dados a serem lidos de maneira a diminuir mais ainda a necessidade de intervenção do usuário para a aquisição dos dados de entrada.

A Figura 19 apresenta a imagem de como o modelo é representado no software AIMMS com todos os *sets*, parâmetros, variáveis e demais aspectos apresentados nesta seção.

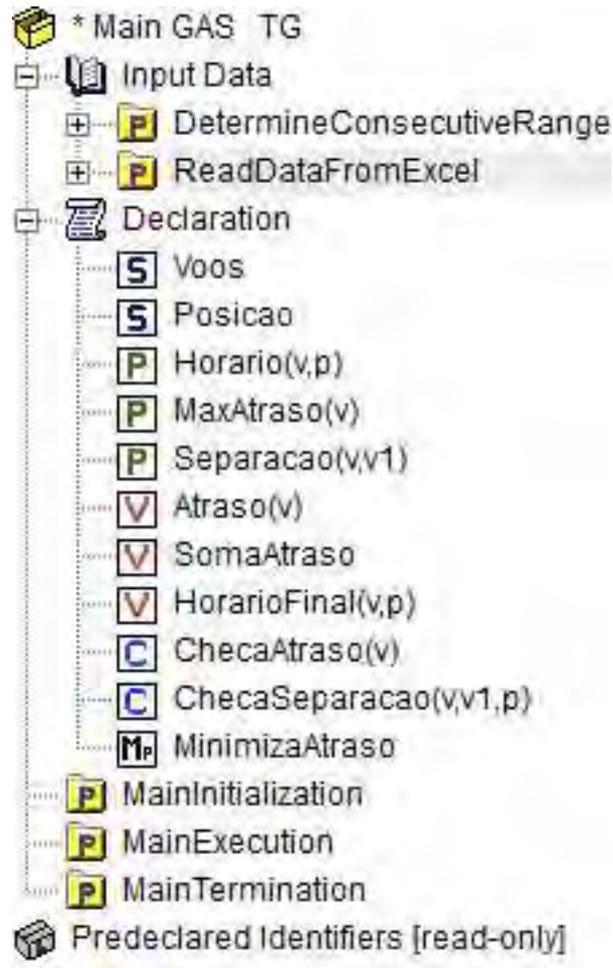


Figura 19 - Representação do modelo no software AIMMS

A seguir, apresenta-se o conceito do modelo de otimização em notação matemática para o melhor entendimento do que foi proposto.

Parâmetros:

$H_{v,p}$ – Horário em que a aeronave “v” encontra-se no ponto de controle “p”.

Max_v - Atraso máximo que pode ser imposto à uma aeronave.

$S_{v,v1}$ – Separação mínima, em tempo, entre as aeronaves “v” e “v1”.

Variável de decisão:

x_v - Atraso imposto à aeronave “v”.

Problema de otimização:

Minimizar $\sum x_v$

$x_v < Max_v$

$|H_{v,p} - H_{v1,p}| > S_{v,v1}$

7 Conclusão

A melhoria na eficiência das operações e no uso de recursos é sempre um dos fatores muito pesquisados e de grande relevância para a indústria. No caso dos congestionamentos em solo nas pistas dos aeroportos há um ganho para a comunidade, na forma da redução da emissão de poluentes devido ao menor tempo de táxi das aeronaves, e também para as linhas aéreas, cujo benefício manifesta-se na forma de redução no gasto de combustível e, conseqüentemente, nas despesas da empresa.

Desta forma, este trabalho teve como resultado as curvas de rendimento das pistas do aeroporto de Brasília a partir do amostragem gerada após os ajustes no banco de dados SGTC fornecido pelo ICEA. De posse das curvas, pode-se calcular o limiar adequado conforme o método apresentado, e, em seguida, testar a estratégia e averiguar sua eficácia para o aeroporto. Esse teste pode ser realizado pela própria torre de controle no aeroporto, uma vez que a aplicação do método pelos controladores é fácil de ser implementada, ou pode ser realizada com o auxílio de um software de simulação e a base de dados do mesmo aeroporto cujas curvas estão sendo utilizadas. Com o entendimento do processo, os resultados podem ser replicados para qualquer aeroporto, no qual congestionamentos em solo estão tornando-se mais problemáticos. Por meio recomendação de taxa de *pushbacks* proposta pelo método tem-se mais um ferramenta que pode ser implementada para servir como dado de entrada no processo de melhorias operacionais no conceito do *Collaborative Decision Making*.

Por último, o conceito apresentado de otimização da movimentação em solo serve como base para novos estudos também na atribuição de atrasos nos *gates* com base em um espaçamento mínimo entre aeronaves.

8 Referências Bibliográficas

Aeroporto de Brasília. (2014). Acesso em 05 de 05 de 2014, disponível em www.bsb.aero

AIS - Serviço de Informação Aeronáutica. (2014). Acesso em 03 de 06 de 2014, disponível em <http://www.aisweb.aer.mil.br/index.cfm>

Balakrishnan, H., Deonandan, I., & Simaiakis, I. (December de 2008). Opportunities for Reducing Surface Emissions through Surface Movement Optimization. *Report No. ICAT-2008-07* .

Cros, C., & Frings, C. (2008). Alternative taxiing means - Engines stopped.

FAA. Pilot and Air Traffic Controller Guide to Wake Turbulence.

Feron, E., Hansman, R., Odoni, A., Cots, R., Delcaire, B., Halls, W., et al. (1997). The Departure Planner: A conceptual discussion. *Massachusetts Institute of Technology* .

Google Earth. (2014).

GRU AIRPORT. (2014). Acesso em 05 de 05 de 2014, disponível em www.gru.com.br

Infraero. (2014). Acesso em abril de 2014, disponível em www.infraero.gov.br

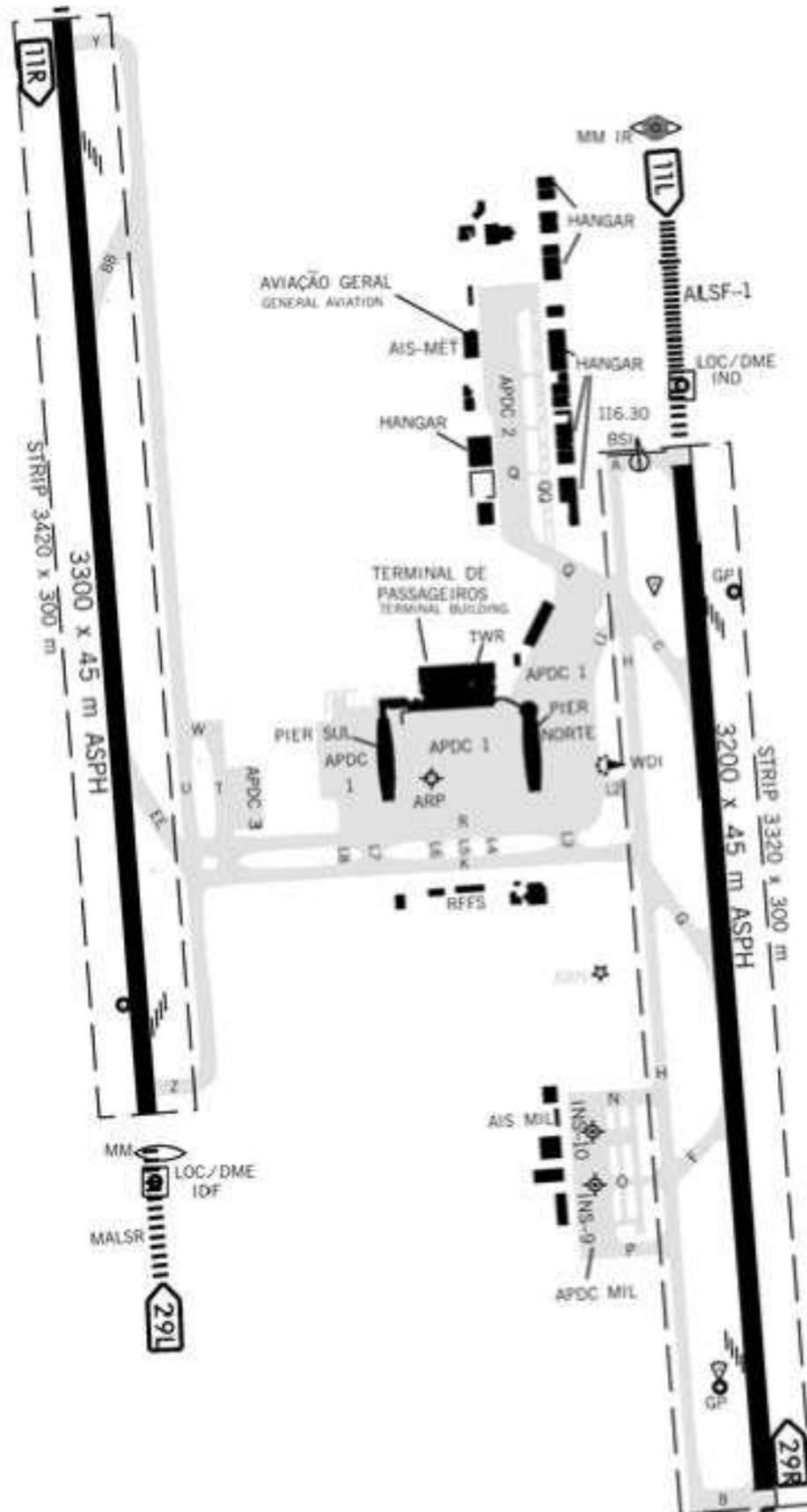
RIOgaleão. (2014). Acesso em 2014, disponível em www.riogaleao.com

Simaiakis, I., Khadilkar, H., Balakrishnan, H., Reynolds, T., & Hansman, R. (Janeiro de 2011). Demonstration of Reduced Airport Congestion Through Pushback Rate Control. *Report No. ICAT-2011-2* .

Viracopos. (2014). Acesso em 05 de 05 de 2014, disponível em www.viracopos.com

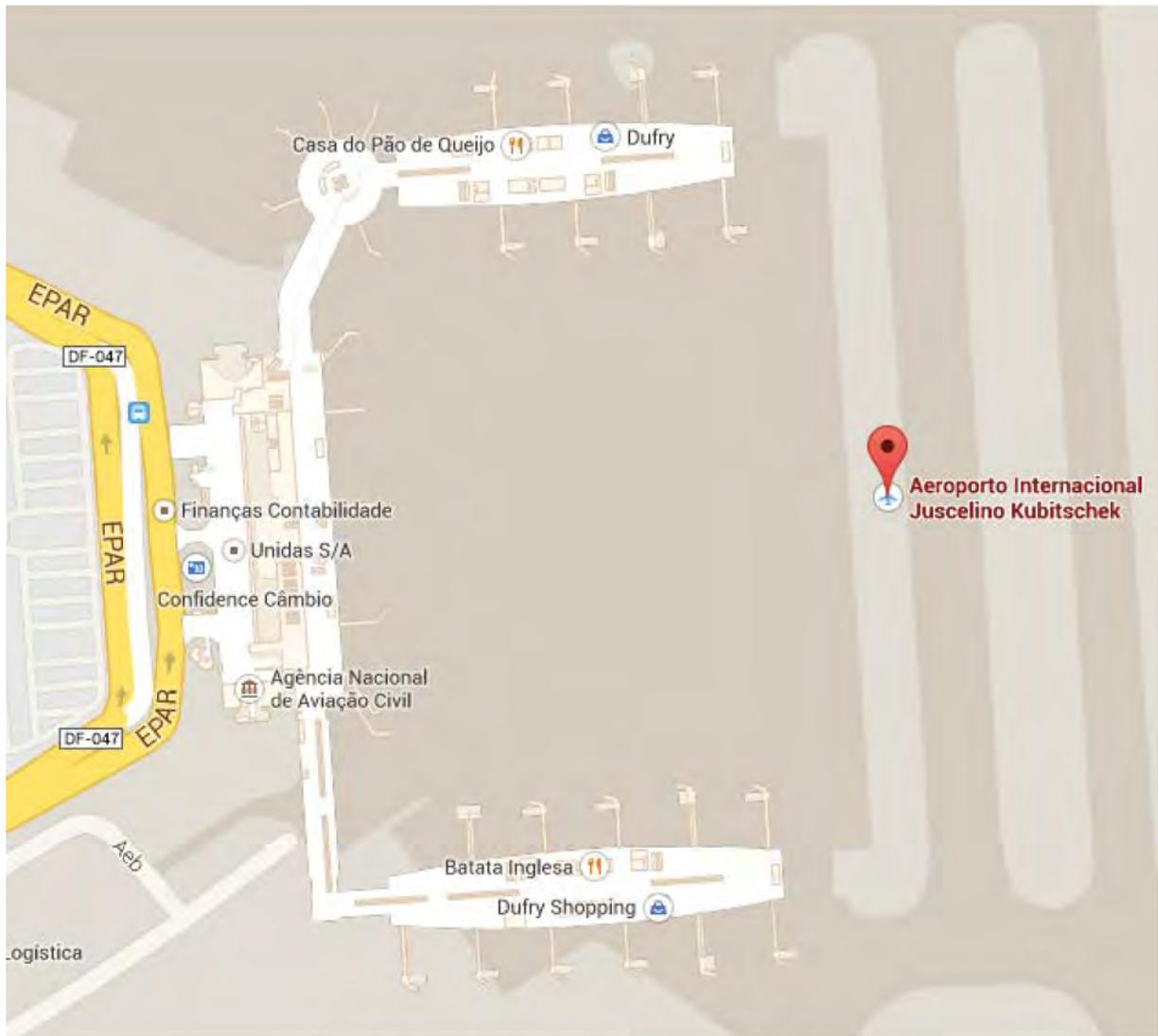
Data e Hora	Indicativo	Ação	Descrição	Oper.	D/A	Antes	Depois
7/1/2014 00:00:18	TAM3714	Criacao nova strip		LUQX	A	FPV	T
7/1/2014 00:00:25	TAM3519	Transferencia de strip		TRLN	D	y	0
7/1/2014 00:00:31	TAM3885	Mudanca de Status	Autorizado Ingresso na Pista	TRLN	D		
7/1/2014 00:00:37	TAM3208	Transferencia de strip		RAHU	D	C	G
7/1/2014 00:00:37	TAM3208	Mudanca de Status	Autorizado ACC (GND)	MTGF	D		
7/1/2014 00:01:31	GL01978	Mudanca de Status	Decolado (TWR)	TRLN	D		
7/1/2014 00:01:33	TAM3208	Mudanca de Status	Aguardando Push-Back	MTGF	D		
7/1/2014 00:01:33	TAM3208	Mudanca de Status	Autorizado Push-Back	MTGF	D		
7/1/2014 00:01:59	GL02023	Mudanca de Status	Aguardando Autorizacao ACC	RAHU	D		
7/1/2014 00:02:21	GL02023	Mudanca de Status	Autorizado ACC (CLR)	RAHU	D		
7/1/2014 00:02:21	TAM3030	Mudanca de Status	Pousado (TWR)	LUQX	A		
7/1/2014 00:02:32	TAM3030	Transferencia de strip		LUQX	A	T	G
7/1/2014 00:02:32	TAM3030	Mudanca de Status	Pousado (GND)	MTGF	A		
7/1/2014 00:02:42	TAM3030	Mudanca de Status	Posicao Autorizada	MTGF	A		
7/1/2014 00:03:00	GL01515	Mudanca de Status	Em Posicao	MTGF	A		
7/1/2014 00:03:00	GL01515	Transferencia de strip		MTGF	A	G	0
7/1/2014 00:03:39	TAM3885	Mudanca de Status	Decolado (TWR)	TRLN	D		
7/1/2014 00:03:43	GL01978	Transferencia de strip		TRLN	D	y	0
7/1/2014 00:04:28	GL01693	Mudanca de Status	Em Taxi (GND)	MTGF	D		
7/1/2014 00:05:04	TUS6575	Mudanca de Status	Aguardando Autorizacao para P...	LUQX	A		
7/1/2014 00:05:05	TUS6575	Mudanca de Status	Pouso Autorizado	LUQX	A		
7/1/2014 00:05:07	GL01515	Criacao nova strip		RAHU	D	RPL	C
7/1/2014 00:05:09	TAM3885	Transferencia de strip		TRLN	D	y	0
7/1/2014 00:05:20	GL01422	Criacao nova strip		LUQX	A	FPV	T
7/1/2014 00:06:12	TAM3208	Mudanca de Status	Em Taxi (GND)	MTGF	D		
7/1/2014 00:06:35	GL01693	Mudanca de Status	Em Taxi (TWR)	TRLN	D		
7/1/2014 00:06:35	GL01693	Transferencia de strip		MTGF	D	G	y
7/1/2014 00:06:36	TAM3208	Transferencia de strip		MTGF	D	G	y
7/1/2014 00:06:36	TAM3208	Mudanca de Status	Em Taxi (TWR)	TRLN	D		
7/1/2014 00:07:03	GL01693	Mudanca de Status	Autorizado Ingresso na Pista	TRLN	D		
7/1/2014 00:07:07	GL01420	Criacao nova strip		RAHU	D	RPL	C
7/1/2014 00:07:11	GL01768	Mudanca de Status	Aguardando Autorizacao ACC	RAHU	D		
7/1/2014 00:08:05	GL01768	Mudanca de Status	Autorizado ACC (CLR)	RAHU	D		
7/1/2014 00:08:16	TAM3208	Mudanca de Status	Autorizado Ingresso na Pista	TRLN	D		

Anexo 1 – Exemplo de dados SGTC de Brasília



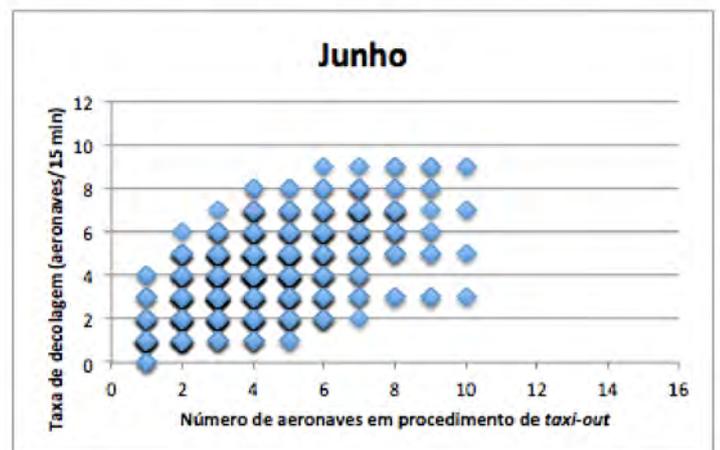
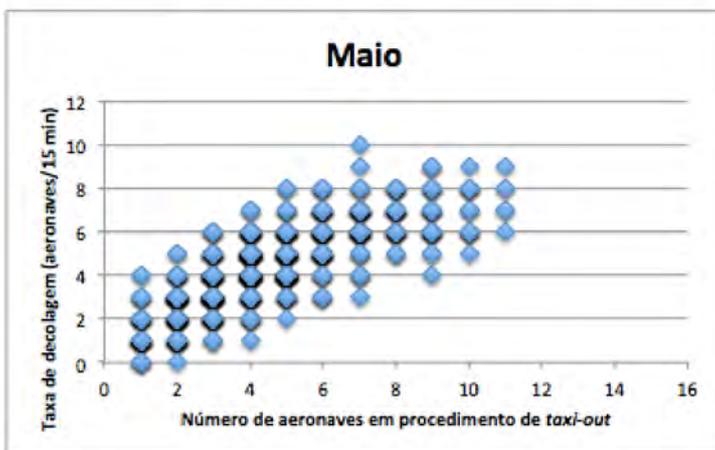
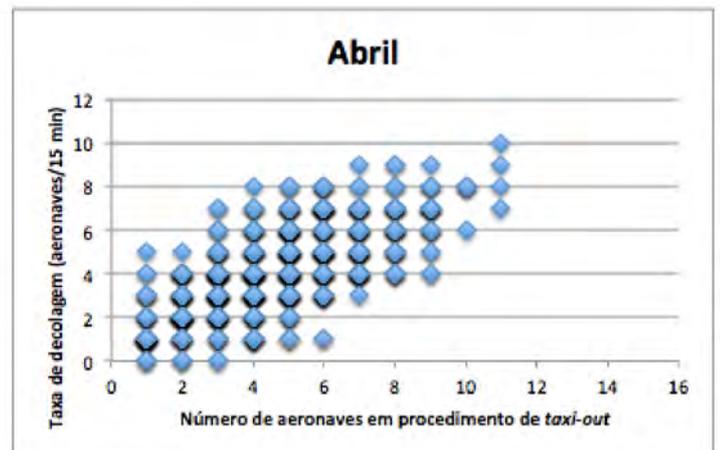
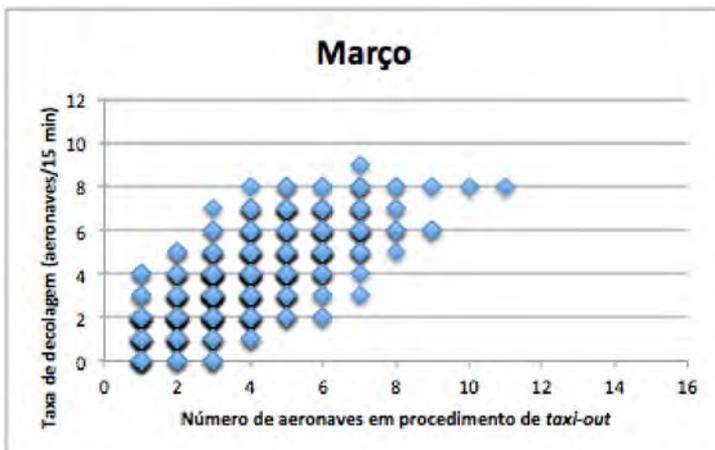
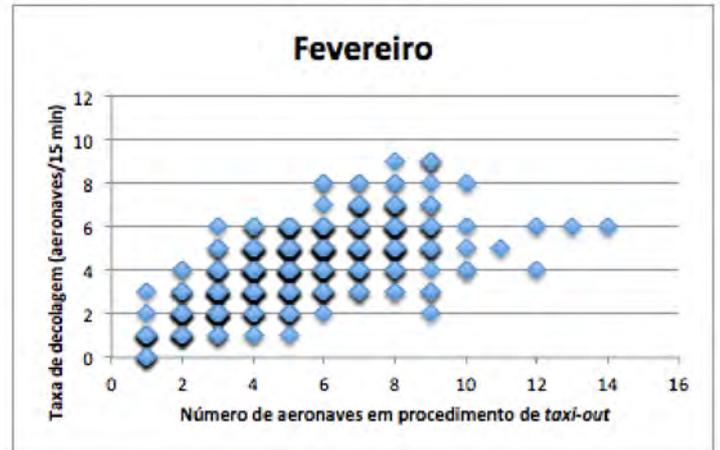
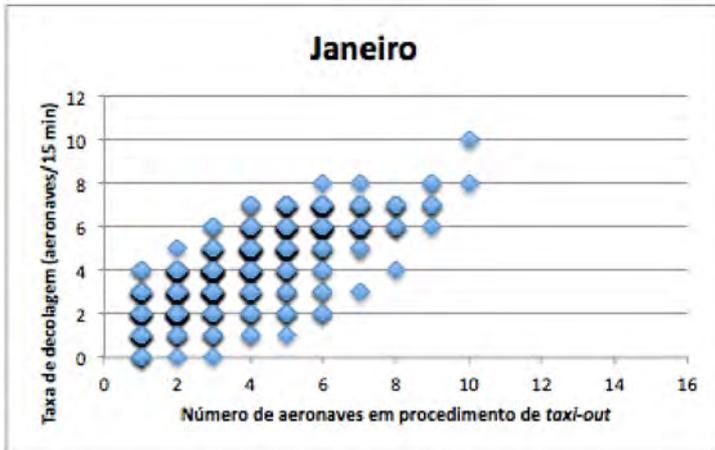
Anexo 2 - Carta do aeródromo de Brasília (adaptado)

Fonte: (AIS - Serviço de Informação Aeronáutica, 2014)

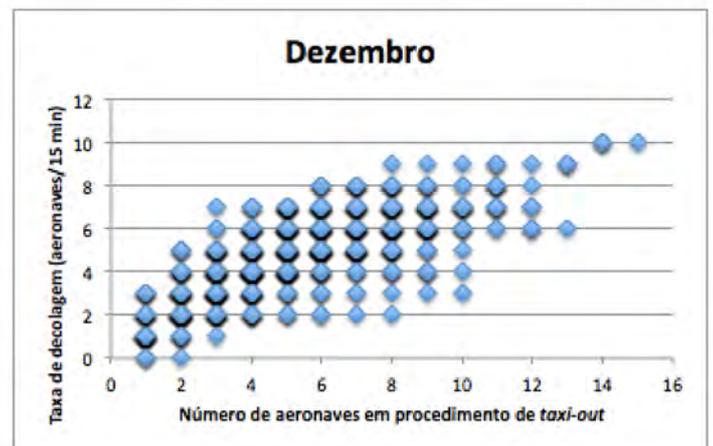
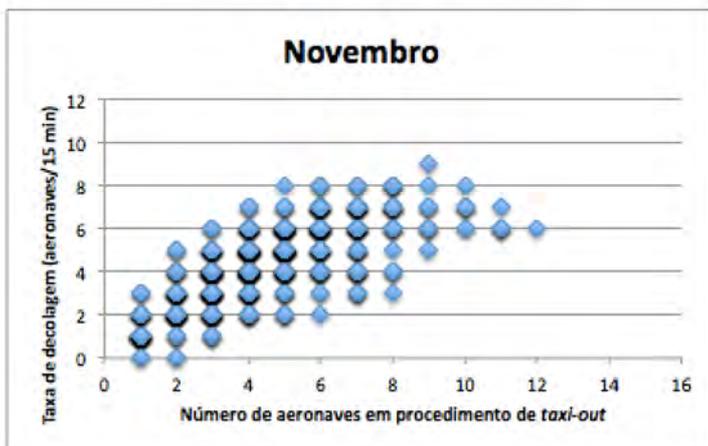
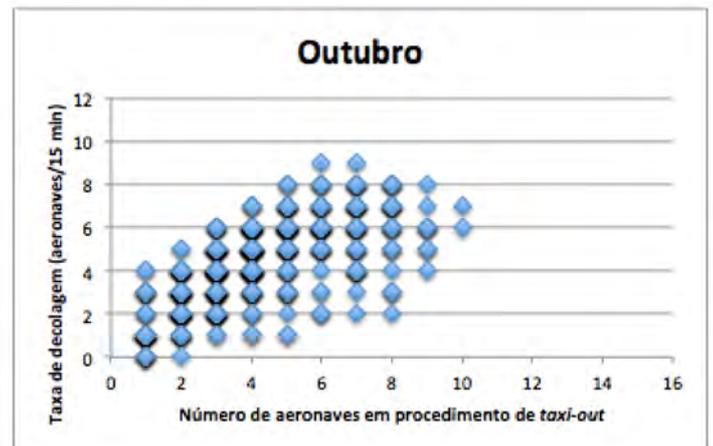
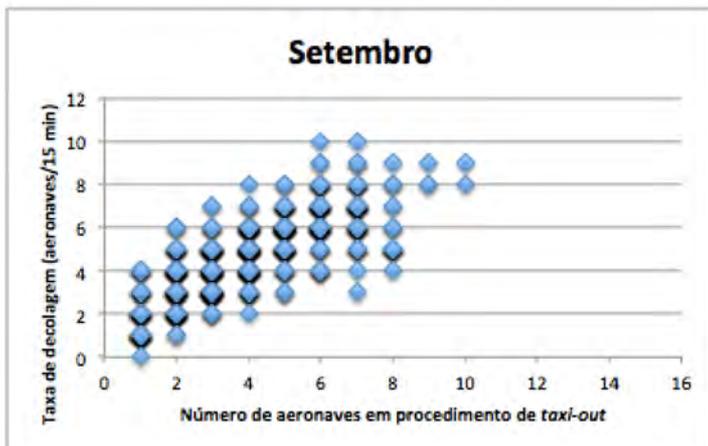
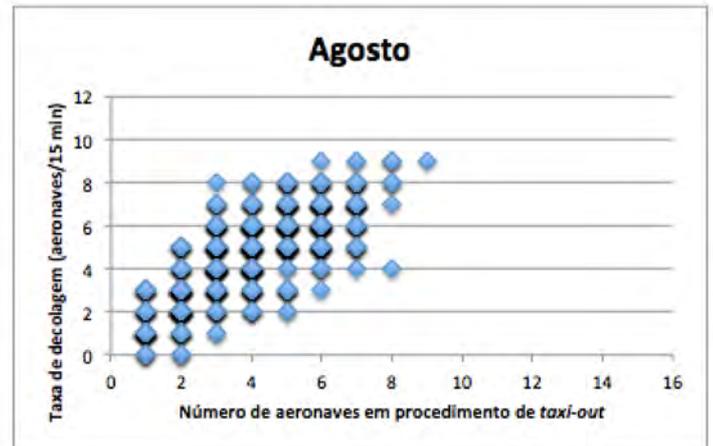
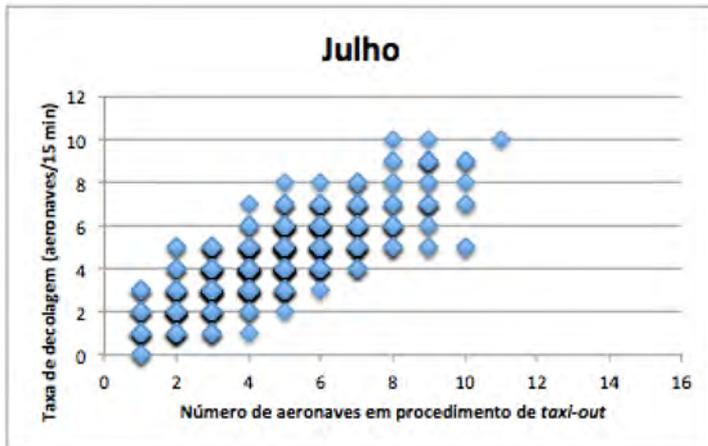


Anexo 3 - Detalhe dos gates do aeroporto de Brasília

Fonte: (Google Earth, 2014)



Apêndice 1 - Distribuições mensais dos pontos do banco de dados



Apêndice 2 - Distribuição mensal dos pontos do banco de dados (continuação)

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">21 de novembro de 2014</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-084/2014</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">53</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: <p>Estratégias de gerenciamento de fluxo de aeronaves em solo – aplicação de modelo para o aeroporto de Brasília.</p>			
6. AUTOR(ES): <p>Lucas Arêa Leão Barreto</p>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA</p>			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>Congestionamento Aeroportuário, Estratégias de Gerenciamento de Fluxo de Aeronaves em Solo, Aeroporto Internacional de Brasília..</p>			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>Planejamento de aeroportos; Aeroportos; Projeto; Controle de tráfego aéreo; Capacidade do sistema de guaiamento; Engenharia aeronáutica.</p>			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional <p>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Carlos Müller. Publicado em 2014.</p>			
11. RESUMO: <p>Nos maiores aeroportos do mundo o problema do congestionamento em solo é um problema frequentemente enfrentado, o que aumenta significativamente o tempo de táxi das aeronaves e, conseqüentemente, a queima de combustível e emissão de poluentes. A estratégia <i>Pushback Rate Control</i> tem como objetivo evitar congestionamentos na superfície do aeroporto, através da sugestão de uma taxa de <i>pushback</i> dos <i>gates</i>, a fim de reduzir o tempo que as aeronaves gastam com motores ligados durante as operações de táxi. Este trabalho apresenta o processo de aquisição e os resultados da abordagem para controlar o congestionamento em solo aplicada ao Aeroporto Internacional de Brasília. O método é explicado de maneira a fornecer o conhecimento necessário para replicar os resultados a partir de um banco de dados adequado proveniente de outros aeroportos congestionados. E também introduz o conceito de um modelo de otimização para servir como base para estudos futuros.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p>(X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO</p>			