

Final
96

Biblioteca Universitária
- UFSC -

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PLANEJAMENTO AEROPORTUÁRIO EM ESTÁGIOS SOB
CONDIÇÃO DE INCERTEZA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

DANIELA BRANDÃO NASCIMENTO



0.262.054-5



UFSC-BU

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
DEZEMBRO - 1996

**PLANEJAMENTO AEROPORTUÁRIO EM ESTÁGIOS SOB
CONDIÇÃO DE INCERTEZA**

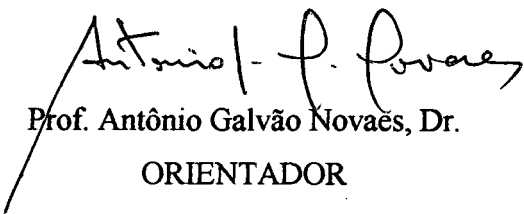
DANIELA BRANDÃO NASCIMENTO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE “MESTRE EM ENGENHARIA”
ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.
COORDENADOR DO PROGRAMA

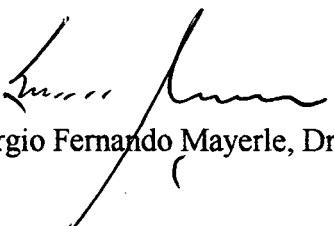
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS
PROFESSORES:



Prof. Antônio Galvão Novaes, Dr.
ORIENTADOR



Prof. Mirian Buss Gonçalves, Dra.



Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.

Agradecimentos

Ao professor Antônio Galvão Novaes, pelo estímulo e orientação, essenciais à realização deste trabalho.

Ao meu pai, professor Paulo R. Nascimento, que sempre me incentivou com seu exemplo, pelas valiosas sugestões para complementação deste.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, em especial a Mirian Buss Gonçalves, Sérgio Fernando Mayerle e Carlos Taboada, pelo apoio prestado durante o curso.

À Secretaria de Transportes e Obras, em especial aos engenheiros Alberto Goldner e Carmelo Faracco, pelo fornecimento dos dados necessários e pelas produtivas sugestões para a realização do estudo.

Ao CNPQ, pelo auxílio financeiro.

Aos amigos e colegas de mestrado, pelo apoio e valiosas horas de lazer proporcionadas.

Aos meus pais e irmãos, pelo carinho e incentivo que sempre souberam dar.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho consiste numa abordagem metodológica que possa ser utilizada como ferramenta no planejamento de sistemas aeroportuários regionais.

Primeiramente, sugere-se um modelo de localização, baseado em problemas de cobertura, que utiliza a técnica de Programação Fracional no intuito de buscar tanto a maximização da demanda atendida como a minimização de custos.

O modelo referido é aplicado a diversos estágios de planejamento ao longo de vinte anos. Para isto, são estimados os custos de instalação dos aeroportos, bem como a demanda esperada de acordo com um modelo de projeção probabilístico.

Após seu desenvolvimento, a metodologia é aplicada, utilizando-se os dados referentes ao estado de Santa Catarina. Os resultados são comparados às soluções propostas pelo Plano Aeroviário do estado e pelo trabalho de *Veloz* (1994), sendo este último a base para a presente pesquisa.

Abstract

This research consists on a methodological approach to the problem of planning local airport investments.

First, we present an airport location model based on set covering. This model uses a Fractional Programming Technique in order to seek the maximum demand satisfaction with minimum cost expenditure. The model is then applied to several airport planning stages distributed over a twenty-year time span.

A probabilistic demand forecasting model is used to project demand levels at various time horizons. The capital allocation model is then applied to each time horizon.

The methodology is applied to the state of Santa Catarina. The results are then compared with the Santa Catarina State Airport Plan and with Veloz (1994) Master Thesis.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1-	INTRODUÇÃO	
1.1-	Aspectos gerais	4
1.2-	Importância do trabalho	4
1.3-	Objetivo do trabalho	5
1.4-	Estrutura do trabalho	5

CAPÍTULO II

2-	PLANEJAMENTO AEROPORTUÁRIO	
2.1-	Aspectos gerais	7
	2.2.1- Introdução	7
	2.1.2- Objetivos de um planejamento aeroportuário	7
	2.1.3- Estudos realizados no planejamento aeroportuário	8
	2.1.4- Aspectos a serem levados em conta no planejamento aeroportuário	9
2.2-	Caracterização dos serviços aéreos existentes	10
	2.2.1- Infra-estrutura aeronáutica	10
	2.2.2- Funções dos aeroportos	11
	2.2.3- Abrangência dos aeroportos	12
2.3-	Classificação dos aeroportos	13
2.4-	Planejamento aeroportuário no Brasil	14
	2.4.1- Introdução	14
	2.4.2- Objetivos da implantação dos SITAR	15
	2.4.3- Planejamento do Transporte Aéreo Regional	16
	2.4.3.1- Aspectos gerais	16
	2.4.3.2- Os Planos Aeroviários Estaduais - PAE	16

CAPÍTULO III

3-	PROJEÇÃO DA DEMANDA SOB CONDIÇÃO DE INCERTEZA	
3.1.	Aspectos gerais	20
3.1.1-	Projeção linear	20
3.1.2-	Projeção exponencial	20
3.1.3-	Projeção por curva logística	21
3.2-	Projeções da demanda para aviação geral	21
3.2.1-	Projeção das variáveis explicativas	22
3.2.2-	Determinação dos níveis de demanda por transporte aéreo	24
3.2.2.1-	Projeção da demanda	24
3.2.2.2-	Cálculo do desvio padrão da demanda	26

CAPÍTULO IV

4-	MODELO ESTÁTICO PARA PLANEJAMENTO AEROPORTUÁRIO REGIONAL	
4.1-	Introdução	29
4.2-	Modelos para localização e cobertura de facilidades	29
4.2.1-	Problemas de cobertura	29
4.2.2-	Crerios de otimalidade em problemas de localização	30
4.3-	Formulações como PLI	31
4.3.1-	Formulação para critério Mini-Max	31
4.3.2-	Formulação para critério Mini-Soma	31
4.3.2.1-	Formulação do P-Mediana "Puro"	32
4.4-	Modelo proposto	33
4.4.1-	Aspectos gerais	33
4.4.2-	Estrutura do modelo	33
4.4.3-	Formulação do modelo PLMC - PAE	34
4.4.3.1-	Funções objetivo	35
4.4.3.2-	Restrições	36
4.4.3.3-	Variáveis de decisão	36
4.4.4-	Modelo alternativo proposto	36

4.4.5- Programa computacional elaborado para aplicação da metodologia proposta por <i>Bitran e Novaes</i> (1973)	41
--	----

CAPÍTULO V

5- MODELO RECURSIVO PARA O PLANEJAMENTO AEROPORTUÁRIO REGIONAL SOB CONDIÇÃO DE INCERTEZA	
5.1- Introdução	43
5.2- Metodologia proposta por Souza e Novaes adaptada ao problema em estudo	43
5.3- Aplicação do modelo em estágios ao planejamento aeroportuário regional	45
5.3.1- Planejamento em estágios	45
5.3.1.1- Cálculo dos prazos para revisão do sistema	46

CAPÍTULO VI

6- APLICAÇÃO DO MODELO AO PLANEJAMENTO AEROPORTUÁRIO DE SANTA CATARINA	
6.1- Introdução	48
6.2- Dados de entrada para aplicação do modelo	48
6.2.1- Nós da rede	48
6.2.1.1- Nós de serviço j	48
6.2.1.2- Nós de demanda i	48
6.2.1.3- Localidades selecionadas pelo PAESC como possíveis nós da rede	48
6.2.2- Previsão da demanda de passageiros	50
6.2.3- Hierarquização dos aeroportos	50
6.2.3.1- Categoria básica	50
6.2.3.2- Categoria A	51
6.2.3.3- Categoria B	52
6.2.3.4- Categoria C	52
6.2.3.5- Categoria D	53
6.2.4- Pesos na função objetivo	54

6.2.4.1-	Pesos W_{ik} para os nós de demanda	54
6.2.4.2-	Pesos W_{jk} para os nós de serviço	54
6.2.5-	Custos na função objetivo	56
6.2.5.1-	Custos C_{jk} nos nós de serviço	56
6.2.5.2-	Custos C_i nos nós de demanda	56
6.2.5.3-	Custos utilizados na função objetivo	56
6.2.6-	Conjunto de abrangência N_{ik}	57
6.3-	Aplicação do modelo	58
6.3.1-	Algoritmo utilizado	58
6.3.2-	Restrições adicionais inseridas no modelo	59
6.4-	Resultados obtidos	59
6.5-	Simulação dos níveis de demanda	62
6.5.1-	Introdução	62
6.5.2-	Geração dos valores associados às variáveis explicativas	62
6.5.3-	Geração da demanda a partir das variáveis simuladas	63
6.6-	Estudo da Demanda Crítica	66
6.6.1-	Aspectos gerais	66
6.6.2-	Aplicação da metodologia proposta para localização de aeroportos no estado com variação dos valores definidos para a Demanda Crítica	67
6.6.3-	Escolha da Demanda Crítica ideal	69

CAPÍTULO VII

7-	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	
7.1-	Introdução	72
7.2-	Rede proposta pelo PAESC	72
7.3-	Solução obtida por Veloz	73
7.4-	Solução apresentada neste estudo	74
7.5-	Comparação das soluções propostas	75
7.5.1-	Horizontes de planejamento previstos pelo PAESC	75
7.5.2-	Relação entre demanda atendida e custo do sistema	76

CAPÍTULO VIII

8-	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
8.1-	Conclusões	77
8.2-	Recomendações	78

CAPÍTULO IX

9-	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
----	----------------------------	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1-	População: taxa de crescimento anual e desvio padrão	22
TABELA 3.2-	Valores corrigidos para taxa de crescimento anual e desvio padrão	23
TABELA 3.3-	Recser: taxa de crescimento anual e desvio padrão	24
TABELA 3.4-	Demanda: logaritmo neperiano do valor esperado e desvio padrão	28
TABELA 6.1-	Localidades candidatas a sediar aeroportos	49
TABELA 6.2-	Recursos de investimento em infra-estrutura aeronáutica	56
TABELA 6.3-	Conjunto de abrangência associado às localidades i	58
TABELA 6.4-	Demanda simulada × Demanda média (ano base: 2002)	64
TABELA 6.5-	Demanda simulada × Demanda média (ano base: 2007)	65
TABELA 6.6-	Demanda simulada × Demanda média (ano base: 2017)	66
TABELA 6.7-	Variação do custo de implantação do sistema em função da Demanda Crítica considerada	69
TABELA 6.8-	Custo social de implantação do sistema aeroportuário regional em função da Demanda Crítica considerada	71
TABELA 7.1-	Aeroportos previstos pelo PAESC	72
TABELA 7.2-	Veloz: Aeroportos instalados - Limite de investimento = US\$1000000,00	73
TABELA 7.3-	Veloz: Aeroportos instalados - Limite de investimento = US\$ 4500000,00	74
TABELA 7.4-	Solução proposta: Aeroportos a serem instalados	75
TABELA 7.5-	Relações entre demanda atendida e custo do sistema	76

1. Introdução

1.1. Aspectos gerais

O transporte aéreo vem experimentando um crescimento significativo em todo o mundo.

Segundo *Neufville* (1976), espera-se que até a virada do século a demanda por este tipo de transporte seja de oito a dez vezes maior que a verificada em 1976.

Os aeroportos, elementos-chave da infra-estrutura aeronáutica necessária ao desenvolvimento de qualquer tipo de transporte aéreo, influenciam em muito o padrão e a velocidade do crescimento econômico de uma região, por promoverem ligação mais rápida e eficiente entre suas diversas localidades.

Sendo assim, torna-se necessária a elaboração de um planejamento aeroportuário a nível regional, no que se refere à localização, tamanho e cronograma de instalação das facilidades, de forma a garantir o atendimento efetivo da demanda com um mínimo de recurso investido.

1.2. Importância do trabalho

Segundo o IAC - Instituto de Aviação Civil, “o transporte aéreo regional vem assumindo papel de destaque dentro do panorama do transporte aéreo nacional, promovendo a ligação entre diversas localidades e integrando as várias regiões dos estados como resultado do processo de interiorização do desenvolvimento econômico” (PAESC).

No entanto, a evolução da aviação regional tem sofrido restrições devido à inexistência de infra-estrutura adequada. Esta situação se verifica principalmente através do estado precário da maioria dos aeródromos, que não oferecem condições para a operação segura e econômica das aeronaves.

Veloz (1994) ressalta em sua tese de mestrado a importância de um estudo específico de problemas de seleção da rede dos aeroportos componentes de um Plano Aeroviário Estadual, propondo em seu trabalho uma metodologia, baseada em modelos matemáticos, para o planejamento aeroportuário regional de longo prazo.

No entanto, como o próprio autor salienta em seu trabalho, “o problema foi tratado estaticamente, com dados baseados num ano de planejamento X.”

Assim, considerou-se válido aprofundar o estudo realizado por *Veloz* (1994), desenvolvendo uma metodologia para planejamento em estágios, na qual projeta-se a demanda para diversos horizontes de planejamento ao longo de vinte anos, levando-se em conta as condições de incerteza em torno desta projeção.

1.3. Objetivo do trabalho

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia que possa ser utilizada na seleção das localidades que farão parte do sistema aeroportuário regional.

Pretende-se, portanto, propor um modelo que forneça os prazos ótimos para revisão do sistema, bem como a localização e tamanho das unidades aeroportuárias, buscando a maximização da demanda atendida e a minimização dos recursos investidos.

1.4. Estrutura do trabalho

De uma forma geral, o trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- apresentação das definições e conceitos relacionados ao planejamento aeroportuário, dando ênfase aos aspectos referentes ao planejamento de sistemas aeroportuários regionais;
- apresentação de uma metodologia para projeção da demanda por transporte aéreo, aplicando-a posteriormente ao estado de Santa Catarina;
- levantamento dos modelos para localização e cobertura de facilidades citados por *Veloz* (1994) em sua tese de mestrado. Desenvolvimento de um modelo, envolvendo o conceito de Programação Fracional, para solução do problema de localização de aeroportos;

- definição de Planejamento em Estágios, e sugestão de uma metodologia para cálculo dos prazos ótimos de revisão do sistema aeroportuário;
- aplicação da metodologia proposta nos capítulos anteriores ao planejamento aeroportuário de Santa Catarina, tanto para valores de demanda calculados através do método proposto, como para valores de demanda simulados através do método de *Monte Carlo*;
- comparação dos resultados obtidos às soluções propostas por *Veloz (1994)* e pelo PAESC;
- conclusões e recomendações quanto ao prosseguimento de estudos nesta área.

2. Planejamento Aeroportuário

2.1. Aspectos gerais

2.1.1. Introdução

De acordo com *Horonjeff e Mckelvey* (1983), o planejamento de um sistema de aeroportos é a definição do número, localização e categoria (em termos de nível de serviço oferecido) dos aeroportos necessários para garantir o atendimento das necessidades imediatas e futuras de uma área metropolitana, região, estado ou país. Ele deve incluir a previsão de tempo e estimativa de custos para o desenvolvimento do sistema, bem como relacionar o planejamento à política e objetivos da comunidade que se beneficiará com sua implantação.

O fato de haver interação e até mesmo uma certa competitividade entre os aeroportos indica que o planejamento deve ser feito para o sistema como um todo, e não para aeroportos individualmente. Assim, torna-se necessário desenvolver o planejamento de aeroportos a nível nacional ou, pelo menos, a nível regional.

Neufville (1976) ressalta a necessidade de se estar atento para o fato de que a performance futura do sistema de transporte aéreo é incerta. Isto ocorre devido à própria ignorância a respeito de como o sistema trabalha, e devido ao fato da distribuição de tráfego entre aeroportos ser altamente volátil. Portanto, o planejamento de aeroportos deve ser flexível no que se refere à abordagem dos problemas e formulação de soluções.

2.1.2. Objetivos de um planejamento aeroportuário

Segundo *Horonjeff e Mckelvey* (1983), os objetivos de um planejamento aeroportuário devem incluir os seguintes itens:

- o desenvolvimento ordenado ao longo do tempo de um sistema de aeroportos adequado às necessidades presentes e futuras da aviação e promoção do padrão desejado de crescimento regional relacionado às finalidades industriais, sociais, ambientais e de lazer;

- a proteção do meio-ambiente ao longo do processo de localização e expansão dos aeroportos, evitando dessa forma acidentes ecológicos e prejuízos ambientais;
- o desenvolvimento da aviação para garantir seu papel dentro de um sistema de transporte multimodal e atendimento às necessidades da área em questão;
- a provisão da estrutura dentro da qual um aeroporto específico será instalado, consistente com as necessidades do sistema a curto e longo prazos;
- a implementação do uso da terra e planejamento do espaço aéreo que otimizem o uso desses recursos em um ambiente freqüentemente restrito;
- o desenvolvimento de planos fiscais de longo prazo e o estabelecimento de prioridades para o financiamento dos aeroportos dentro do orçamento governamental;
- a definição de mecanismos para implantação do sistema planejado, incluindo a coordenação necessária entre agentes governamentais e o envolvimento tanto da aviação pública quanto da privada e de interesses não diretamente ligados à aviação, bem como a compatibilidade com os padrões e critérios da legislação vigente.

2.1.3. Estudos realizados no planejamento aeroportuário

No planejamento aeroportuário realizam-se vários estudos, dentre os quais pode-se citar o financeiro, de tráfego e mercado, econômico e ambiental. Cada um deles é desenvolvido tanto a nível do sistema como um todo como a nível de planejamento específico de um aeroporto.

Horonjeff e Mckelvey (1983) citam os elementos básicos que um estudo para planejamento aeroportuário deve conter, incluindo os seguintes itens:

- um inventário dos aeroportos já existentes e uma identificação de outros estudos de planejamento que possam causar impacto sobre o planejamento do sistema em questão;

- a previsão da demanda, que não deve ser feita apenas com base anual, mas também para as horas de pico diário;
- o desenvolvimento de soluções alternativas que satisfaçam razoavelmente a demanda prevista, levando-se em conta fatores tais como o papel funcional do aeroporto ou aeroportos em estudo e os impactos ambientais e econômicos, bem como os recursos disponíveis na área. Um exame das localidades alternativas, incluindo uso do solo e meios de acesso, é essencial à consideração e identificação das alternativas viáveis;
- a determinação da relação custo × benefício das soluções alternativas;
- uma análise da viabilidade financeira, que difere da viabilidade econômica, já que não há garantia de que se uma proposta for economicamente viável, ela o será também financeiramente. Frequentemente o planejamento de um aeroporto é separado do planejamento administrativo e financeiro, fato que não deveria ocorrer, já que a instalação de tal facilidade é dependente das restrições financeiras existentes.

2.1.4. Aspectos a serem levados em conta no planejamento aeroportuário

Neufville (1976) salienta o fato de que uma rede de transporte aéreo sempre representa um compromisso entre duas grandes finalidades: o desejo por conexões curtas e diretas entre dois pontos quaisquer e o desejo por serviço freqüente.

De acordo com o autor, embora serviços diretos (vôos diretos) sejam convenientes quando se deseja ir de um ponto específico a outro, eles implicam em baixa freqüência no caso de haver pouca demanda, correspondendo também a grandes esperas, bem como maiores custos. Para superar tais dificuldades, as companhias aéreas encorajam os passageiros oriundos de localidades menores a percorrer um maior número de ligações, passando por aeroportos polarizadores até chegar em seu destino final. Esse procedimento obviamente acresce o tempo de viagem de alguns passageiros, mas traz vantagens compensatórias: por concentrar seu tráfego, as linhas aéreas têm mais passageiros em poucas ligações, podendo assim promover serviço

mais freqüente e utilizar aeronaves mais econômicas e maiores, reduzindo conseqüentemente o custo total e tempo de muitas viagens.

Em alguns pontos no entanto, os possíveis ganhos em tempo e dinheiro devido à concentração de serviço aéreo igualam-se ao custo extra e maior tempo de viagem correspondente a um percurso com maior número de ligações.

Desse modo, cabe ao planejador analisar o trade-off entre a diminuição do custo das viagens e o conseqüente aumento do tempo gasto pelos passageiros, na hora de definir o número de ligações e de aeroportos da rede aeroviária.

2.2. Caracterização dos serviços aéreos existentes

2.2.1. Infra-estrutura aeronáutica

A infra-estrutura aeronáutica compreende o espaço aéreo, a infra-estrutura civil e serviços de proteção ao vôo implantados nos aeródromos e aeroportos. A seguir, encontram-se descritos cada um desses elementos:

- **Aeródromo**

Corresponde a toda área de terra, água ou flutuante, destinada à chegada, partida e movimentação de aeronaves;

- **Aeroporto**

Refere-se a todo aeródromo, para uso público, dotado de instalações e facilidades, em apoio às operações de aeronaves, embarque e desembarque de pessoas e cargas;

- **Espaço aéreo**

Para fins aeronáuticos, o espaço aéreo foi dividido em dois segmentos: o superior, que se estende acima da altitude de 6000 m e o inferior, localizado entre esse valor e a superfície terrestre. A parcela superior é basicamente utilizada pelas aeronaves comerciais, enquanto que na parte inferior desenvolvem-se as operações da aviação regional, geral e os procedimentos para pouso e decolagem;

- Serviços de proteção ao voo

- Os órgãos de proteção ao voo, tais como as estações de comunicação (ECM) e meteorologia (EMS), as torres de controle (TWR) e os centros de controle de aproximação aérea (APP e ACC, respectivamente) têm por finalidade operar os sistemas e equipamentos de auxílio à navegação e cobertura do espaço aéreo.

- Os radioauxílios às operações aéreas são os equipamentos eletrônicos destinados a proteger e controlar a navegação, aproximação e pouso de aeronaves, possibilitando o voo por instrumentos (IFR). Pode-se citar como exemplo os radiofaróis (NDB e VOR), os radares de aproximação e vigilância e os sistemas de pouso por instrumentos.

- Os auxílios visuais são os elementos que permitem a aproximação, o pouso e a movimentação de aeronaves em períodos noturnos e os facilitam durante o dia. Compreendem a sinalização diurna (sinais e marcação da pista de pouso, indicadores de direção do vento, sinais de limite do campo, etc.) e balizamento noturno (farol rotativo de aeródromo - FR, sistema de indicação visual do ângulo de aproximação - VASIS, luzes da pista de pouso, etc.).

2.2.2. Funções dos aeroportos

Segundo o IAC - Instituto de Aviação Civil, os aeroportos pertencentes a um sistema caracterizam-se por exercer uma das duas funções básicas elementares, referentes a atividades de transporte:

- Atendimento à demanda global

Estes aeroportos são implantados em virtude de uma exigência em termos de demanda, ou seja, existem na medida em que promovem atividade de transporte aéreo, necessidade decorrente das características sócio-econômicas de uma dada região;

- Apoio às operações

Um aeroporto exerce uma função de apoio às operações quando tem por objetivo servir a uma necessidade específica da aviação, ou seja, existe em virtude de motivos internos à atividade aeronáutica. Dessa forma, a instalação do aeroporto não

visa atender às necessidades da demanda de um dado local, mas sim criar condições de segurança nas rotas estabelecidas pela primeira função.

Pode-se citar como exemplo as facilidades construídas para servirem como centro de abastecimento de aeronaves em rotas longas, ou para proporcionarem cobertura do espaço aéreo.

A maioria dos aeroportos existentes exercem as duas funções citadas anteriormente, havendo raros casos de facilidades destinadas a um único fim.

2.2.3. Abrangência dos aeroportos

A atuação de um aeroporto pode se estender por um determinado espaço ou região, constituindo a área por ele abrangida. Esta pode estar contida dentro dos limites da localidade em que foi instalada a unidade aeroportuária ou expandir-se por diversos municípios. O IAC define vários tipos de áreas de abrangência, que têm as seguintes conotações:

- **Área de influência**

Consiste no espaço geográfico imediatamente atingido por um aeródromo público. A demanda de passageiros gerada na área utiliza apenas este terminal para início e fim de suas viagens aéreas. Suas dimensões variam de acordo com diversos fatores, mas principalmente em função das vias terrestres de ligação. Quanto melhor o estado da malha rodoviária que circunda a facilidade, mais amplos os limites desta área;

- **Área de polarização**

Compreende espaços que são atingidos de alguma forma pelo aeroporto em questão, ainda que neles existam outras unidades de caráter público. De maneira geral, o tráfego gerado pelas áreas de influência de pequenos aeródromos é canalizado para a unidade polarizadora da região, e assim sucessivamente até os principais centros do país;

- Área de cobertura

As duas áreas anteriormente caracterizadas são definidas de acordo com a função que exercem no atendimento à demanda global. A área de cobertura refere-se à função de apoio às operações e compreende o espaço que se beneficia da existência do aeródromo, através do incremento à segurança de vôo. Sua dimensão depende apenas de fatores técnicos, como alcance dos auxílios implantados, autonomia das aeronaves, etc..

Cabe salientar que a área de polarização engloba a área de influência, mas não necessariamente a de cobertura.

Na prática, define-se a importância relativa de cada área dentro dos diversos grupos de aeroportos, permitindo a posterior hierarquização entre as unidades e uma conseqüente organização do sistema.

2.3. Classificação dos aeroportos

Um sistema aeroportuário é composto por diversas unidades, que podem ser agrupadas de acordo com suas características. O IAC propõe a seguinte classificação para os aeroportos:

- Aeroportos Internacionais

São aqueles que apresentam infra-estrutura compatível com as aeronaves de grande porte, capazes de promover transporte aéreo de longo curso. Possuem equipamentos e serviços para atendimento às necessidades específicas deste segmento da aviação;

- Aeroportos Polarizadores Estaduais ou Aeroportos Principais (“Hubs”)

Em geral, compreendem os aeroportos de capitais ou grandes cidades, possuindo capacidade para operação de aeronaves de grande e médio porte. Possuem vasta área de influência e polarização que, na maioria das vezes, extrapola os limites físicos do seu estado;

- **Aeroportos Regionais**

São os que atuam como elemento de aglutinação e distribuição da demanda gerada em diversos municípios, localidades, projetos, etc., apoiados em cidades de maior influência regional;

- **Aeroportos sub-regionais**

Atendem à função de distribuição do sistema regional proposto, de forma a integrar hierarquicamente a demanda dos núcleos locais aos aeroportos regionais ou principais. Possuem normalmente uma importância de caráter imediato, tendendo a se estabilizar conforme o desenvolvimento das unidades aeroportuárias de maior porte;

- **Aeroportos Locais**

Desempenham funções de alimentação aos aeroportos sub-regionais ou diretamente aos regionais e principais, compondo desta forma a estrutura do sistema. Sua área de influência restringe-se ao município onde se localiza, podendo em alguns casos avançar em função da sua distância aos aeroportos hierarquicamente superiores. Estes aeroportos caracterizam-se pela operação exclusiva de aeronaves da aviação geral e por possuírem algum potencial de demanda não regular;

- **Aeroportos Complementares e de Apoio**

São aqueles que desempenham funções de apoio à comunidade em pontos de difícil acesso, ou ainda funções de apoio a rotas de aeronaves leves. Incluem-se também nesta categoria aqueles aeródromos já possuidores de uma infra-estrutura que merece ser preservada.

2.4. Planejamento aeroportuário no Brasil

2.4.1. Introdução

O transporte aéreo nasceu no Brasil na década de 20, e experimentou uma rápida evolução durante o período compreendido entre o término da II Guerra Mundial e o final dos anos 50, dado o grande número de aeronaves disponíveis, a facilidade de aquisição de equipamentos sobressalentes, taxas de câmbio favoráveis e

carência de serviços de transporte de superfície. Esse desenvolvimento ocasionou o surgimento de um elevado número de companhias aéreas, muitas das quais com estrutura organizacional precária.

Devido à mudança do modelo econômico ocorrida no Brasil no início da década de 60, houve um aumento significativo das tarifas aéreas, como consequência da diminuição dos subsídios governamentais, que passou a incentivar cada vez mais o desenvolvimento do transporte rodoviário. Este fato gerou uma alteração na composição do quadro das companhias aéreas, com desativação de algumas e aglutinação de outras em consórcios.

Com o aperfeiçoamento cada vez maior da tecnologia envolvida na indústria aeronáutica, intensificou-se a incorporação de equipamentos de médio porte, turboélice e a jato às frotas das empresas aéreas do país, em substituição às tradicionais aeronaves a pistão, que possuíam menor capacidade de transporte.

Assim, as cidades com menor capacidade de geração de demanda foram sendo abandonadas pelas empresas aéreas, que concentraram seus investimentos nas linhas onde o emprego das novas aeronaves mostrava-se mais atrativo economicamente. Para se ter uma idéia da gravidade da situação, em 1974, das 344 cidades brasileiras que já tinham sido servidas por transporte aéreo, apenas 129 ainda permaneciam beneficiadas por tal serviço.

Com o intuito de reverter este quadro, reativando os serviços de atendimento a localidades de médio e baixo potencial de tráfego, o Ministério da Aeronáutica criou o SITAR - Sistemas Integrados de Transporte Aéreo Regional.

2.4.2. Objetivos da implantação dos SITAR

O PAESC - Plano Aeroviário Estadual de Santa Catarina sintetiza os objetivos da implantação dos SITAR nos itens apresentados a seguir:

- reativamento dos serviços de transporte aéreo prestados às comunidades relativamente isoladas dos grandes centros econômicos do país, devido à distância e/ou precariedade dos transportes de superfície;
- prestação de um serviço demandado pela população política e economicamente influente, oferecendo um sistema de transporte mais veloz que os concorrentes;

- criação de empresas de estrutura administrativa simples, reduzindo a um mínimo os custos operacionais de serviços e oferecendo transporte aéreo com os seguintes requisitos essenciais: segurança, regularidade, potencialidade, simplicidade e assistência efetiva às localidades servidas;
- evitar a concorrência entre os operadores de transporte aéreo regional, reduzindo assim os possíveis custos por ela gerados;
- incentivo de acordos operacionais entre os operadores de transporte aéreo regional e os operadores de transporte aéreo doméstico, criando sistemas de redes de alimentação para estes últimos;
- incentivo ao desenvolvimento da indústria aeronáutica nacional criando um mercado para absorção de seu produto, especialmente projetado para atender mercados de médio e baixo potencial de tráfego.

2.4.3. Planejamento do Transporte Aéreo Regional

2.4.3.1. Aspectos gerais

O planejamento aeroviário regional tem por meta definir e orientar o desenvolvimento da infra-estrutura aeronáutica (veículos, vias e terminais) de modo a torná-la capaz de atender a demanda por transporte aéreo, adequando-a ao desenvolvimento sócio-econômico da região.

Na prática, procura-se atingir tal intento através da elaboração do Plano Aeroviário Estadual - PAE. Estes planos vêm sendo elaborados desde 1981 pelo Departamento de Aviação Civil - DAC, através do Instituto de Aviação Civil - IAC.

2.4.3.2. Os Planos Aeroviários Estaduais - PAE

Os Planos Aeroviários Estaduais - PAE visam definir e orientar o desenvolvimento da infra-estrutura no interior do estado, possibilitando o

atendimento das demandas da aviação civil e favorecendo seu desenvolvimento econômico.

De acordo com definição apresentada no PAESC, os planos aeroviários abrangem os aeroportos considerados relevantes no contexto aeroviário estadual, englobando:

- unidades de caráter nitidamente regional, que atuam como elementos de polarização da demanda de diversos municípios e atendem às comunidades de porte médio, de expressiva posição na hierarquia funcional das cidades;
- unidades de caráter local, com influência sobre um pequeno número de cidades que constituem os centros iniciais de geração ou distribuição de demanda;
- unidades localizadas em posições remotas ou de difícil acesso, onde a aviação desempenha importante papel como meio básico de ligação;
- unidades localizadas em posições estratégicas, necessárias à evolução plena da aviação, cobertura do espaço aéreo e incremento da segurança das operações.

A elaboração de um PAE é precedida de estudos sócio-econômicos, análise do transporte aéreo e previsão de demanda e estudos de infra-estrutura.

Os estudos sócio-econômicos consistem na análise econômica e de demanda por transporte aéreo, visando fornecer, em termos numéricos, o fluxo de passageiros nas cidades e em ligações aéreas a partir de históricos da aviação na região (ou em regiões semelhantes), juntamente com os resultados dos levantamentos sócio-econômicos.

A análise do transporte aéreo busca identificar as regiões que possuem viabilidade econômica de operação de uma linha regular, bem como quantificar o volume de passageiros e determinar a aeronave crítica, de forma a direcionar o dimensionamento das instalações necessárias.

Sob a designação de infra-estrutura aeronáutica, estão compreendidos o espaço aéreo, toda infra-estrutura aeroportuária e serviços de proteção ao vôo implantados nos aeródromos e aeroportos. Para efeito desta avaliação, considera-se a

infra-estrutura sob dois aspectos: quanto às condições físicas e operacionais e quanto às possibilidades de desenvolvimento.

A partir das três análises descritas acima, tem-se condições de escolher as unidades que comporão o sistema aeroportuário do estado. Define-se então a rede ou sistema de aeroportos regionais, que são selecionados e hierarquizados de acordo com uma tipologia previamente estabelecida, que compreende o planejamento geral do aeroporto, sua área patrimonial, configuração da área de movimentos e terminal de passageiros.

A partir desta fase apresenta-se o problema em estudo: o processo de seleção da rede de aeroportos que formará o PAE. Este processo é interativo, sendo que os especialistas em cada um dos campos preliminares de estudo estabelecem a estrutura de composição do sistema subjetivamente.

Cabe salientar que, como cita *Veloz* (1994) em seu estudo, os objetivos e metas na escolha dos aeroportos que irão compor a rede não são claramente definidos. Apesar de se dizer nos PAE que “os objetivos do sistema incluem a maximização do número de cidades e outras áreas potenciais a serem atendidas, através da implantação de unidades hierarquizadas e interdependentes, observando as restrições de menor custo empregado e de segurança operacional”, isto não se verifica na prática.

Veloz (1994) pôde comprovar este fato quando participou da escolha da rede do Estado do Tocantins, que segundo ele pode ser resumido nos seguintes procedimentos:

- apresentação por parte da equipe de estudo sócio-econômico das localidades candidatas a formar parte da rede com nível regional e sub-regional;

- apresentação por parte da equipe de estudo de demanda por transporte aéreo das localidades que mantiveram este tipo de operação nos últimos dois anos e localidades que intervieram como ligações a outras;

- realização de uma primeira discussão, onde selecionou-se outras localidades, além das já selecionadas, como candidatas a fazer parte da rede;

- início da escolha por parte do grupo das localidades que formarão parte da rede, determinando as que terão categoria regional e sub-regional. Quando são apresentadas localidades em conflito ou concorrência, a escolha é feita com base na análise de infra-estrutura e perspectivas de desenvolvimento;
- terminada a escolha das unidades regionais e sub-regionais, procede-se de maneira similar à escolha das unidades com nível local e complementar, com base na opinião dos especialistas nos três campos de estudos preliminares;
- depois de se chegar a um consenso, fica definida a rede de aeroportos para o Plano.

3. Projeção da demanda sob condição de incerteza

3.1. Aspectos gerais

Há uma variedade considerável de técnicas para projeção da demanda disponíveis aos planejadores de aeroportos, que vão desde julgamentos subjetivos até modelos matemáticos sofisticados. De acordo com *Horonjeff e McKelvey* (1983), a seleção de uma metodologia em particular é função da disponibilidade de dados, recursos, tempo e do grau de precisão desejado.

Segundo os autores, “a técnica de projeção é baseada num exame do padrão histórico da atividade e assume que os fatores determinantes da variação da demanda no passado continuarão influenciando da mesma maneira no futuro.” A análise da demanda geralmente requer a definição de limites superiores e inferiores, bem como o nível de confiança dentro do qual pode-se considerar válida a projeção.

Os autores ainda ressaltam que a deficiência da técnica de projeção é não mostrar a relação causal entre variáveis dependentes e independentes. Contudo, é muito eficiente para projeções de curto prazo, em que a resposta às mudanças dos fatores estimulantes das variáveis dependentes é normalmente menos dinâmica.

3.1.1. Projeção linear

É utilizada para um padrão de demanda que apresenta relação linear com a variável tempo. Trata-se de um modelo pouco usado, visto que o processo de crescimento da demanda raramente segue uma tendência linear.

3.1.2. Projeção exponencial

Para uma situação em que a variável dependente apresenta uma taxa de crescimento constante ao longo do tempo, indica-se normalmente a projeção exponencial. Este fenômeno ocorre freqüentemente em projeções dentro da aviação, já que o crescimento da população, com influência direta sobre o crescimento da demanda por transporte aeroviário, freqüentemente tende a crescer ou decrescer segundo uma percentagem média anual.

3.1.3. *Projeção por curva logística*

Em situações em que a taxa de crescimento médio anual começa a diminuir gradativamente com o tempo, pode ser apropriado analisar as tendências com a utilização de uma curva logística. Nessas situações, ocorre frequentemente um período inicial de crescimento anual, um período intermediário de crescimento constante e um período final em que a taxa de crescimento diminui até o ponto onde ocorre saturação do mercado (*Horonjeff e McKelvey, 1983*).

3.2. *Projeções da demanda para aviação geral*

Neste estudo, utilizar-se-á a metodologia de projeção da demanda desenvolvida pelo IAC, que utilizou como base do estudo métodos econométricos.

Encontra-se no PAESC um modelo ajustado do tipo *cross-section* para a projeção do volume de passageiros a serem transportados em vôos de aviação geral, em que utilizou-se como base de dados o volume de passageiros transportados em 1980 para um conjunto de aeroportos brasileiros com características semelhantes às da região sul. Considerou-se como variáveis explicativas a população municipal da cidade onde se localiza o aeroporto e a receita municipal gerada em atividades do setor de serviços.

Obteve-se a seguinte equação ajustada por análise de regressão:

$$\text{Ln PAX} = 0,4305006 \times \text{Ln RECSER} + 0,50899 \times \text{Ln POP} - 4,070027$$

$$R^2 = 0,74$$

onde:

LnPOP = logaritmo neperiano da população do município onde se situa o aeroporto;

LnRECSER = logaritmo neperiano da receita gerada no setor de serviços do município onde se situa o aeroporto (em cruzeiros de 1980);

LnPAX = logaritmo neperiano do volume anual de passageiros embarcados + desembarcados em vôos de aviação geral nos aeroportos da rede.

3.2.1. *Projeção das variáveis explicativas*

Para efetuar a projeção, supôs-se que as variáveis explicativas têm crescimento exponencial ao longo do tempo.

(1) População Municipal

Para projeção da população associada a cada município, fez-se uma análise de regressão a partir de dados coletados nos Censos Demográficos realizados pelo IBGE, correspondentes aos anos 1940, 1950, 1960, 1970, 1980 e 1991. Obteve-se então a taxa de crescimento anual e desvio padrão da regressão da população. Esses valores encontram-se na *tabela 3.1*.

TABELA 3.1
(ano base: 1991)

POPULAÇÃO: TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL E DESVIO PADRÃO

MUNICÍPIO	NOME	TAXA CRES. ANUAL (%)	DESVIO PADRÃO	R ²	C. V. (D.P./POP ₉₁)
1	Blumenau	3,44	23999,88	0,98	0,11
2	Caçador	2,30	382,56	0,99	0,0073
3	Chapecó	3,64	12038,53	0,96	0,0989
4	Concórdia	1,41	6616,88	0,81	0,1036
5	Criciúma	3,02	11104,33	0,98	0,076189
6	Lages	0,66	11851,33	0,68	0,078364
7	São Miguel D'Oeste	2,17	7339,63	0,76	0,175777
8	Três Barras	4,07	1172,76	0,96	0,075672
11	Araranguá	2,98	1033,35	0,99	0,02134359
12	Dionísio Cerqueira	-0,03	1141,93	0,01	0,1616959
13	Imbituba	2,16	545,55	0,99	0,017704
14	Joaçaba	1,57	1091,71	0,97	0,039153
15	Laguna	1,26	538,66	0,99	0,012051
16	São Joaquim	-0,68	962,31	0,91	0,043163
17	Curitibanos	0,98	5695,26	0,59	0,136502
18	Lontras / Rio do Sul	1,96	4803,61	0,87	0,11
19	Videira	2,52	896,68	0,99	0,025323
20	Mafra	1,47	857,96	0,99	0,018362
21	São Francisco do Sul	1,55	1850,03	0,78	0,062937
22	Xanxerê	1,78	1611,19	0,97	0,043089

A regressão feita para os municípios 6, 12 e 17 forneceu um R^2 baixo. Sendo assim, optou-se por considerar a taxa de crescimento anual calculada a partir das duas últimas observações para os municípios 6 e 17, e taxa de crescimento anual nula para o município 12. Portanto, as novas taxas para estes três municípios têm os seguintes valores, apresentados na *tabela 3.2*:

TABELA 3.2
(ano base: 1991)

POPULAÇÃO: VALORES CORRIGIDOS PARA TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL E DESVIO PADRÃO

MUNICÍPIO	NOME	TAXA CRES. ANUAL (%)	C.V. _{·médio} * (D.P./POP ₉₁)	DESVIO PADRÃO
6	Lages	1,00	0,07	10586,45
12	Dionízio Cerqueira	0,00	0,07	960,40
17	Curitibanos	1,00	0,07	2920,61

* C.V._{·médio} igual à média aritmética dos coeficientes de variação associados aos demais municípios.

(2) Receita do Setor de Serviços - RECSER

Calculou-se a taxa de crescimento a partir de dados coletados nos Censos de Serviço realizados pelo IBGE, correspondentes aos anos 1970, 1975 e 1980. Por falta de dados referentes a um maior período de tempo, não foi possível se fazer uma análise de regressão, e considerou-se como taxa de crescimento anual aquela correspondente ao período entre 1975 e 1980.

Para o cálculo do desvio padrão, tomou-se como base o ICMS arrecadado no estado de Santa Catarina (*Séries Estatísticas de Santa Catarina - SEPLAN*), e a partir de dados históricos referentes a um período de 11 anos, calculou-se o desvio padrão e coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e o ICMS arrecadado em 1980). Considerou-se então que o coeficiente de variação referente à receita de serviços é igual ao observado com relação ao ICMS.

Os valores da taxa de crescimento anual e desvio padrão da RECSER encontram-se na *tabela 3.3*.

TABELA 3.3
(ano base: 1980)

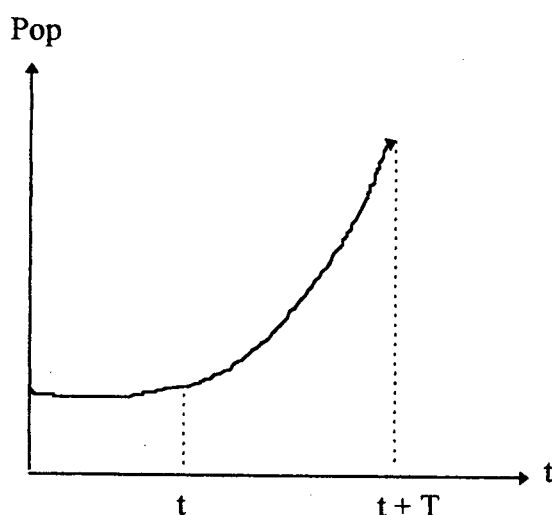
RECSER: TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL E DESVIO PADRÃO

MUNICÍPIO	NOME	RECSER ₈₀ (Cr\$)	DESVIO PADRÃO (Cr\$)	TAXA CRES. (%)
1	Blumenau	3.037.162,30	546.689,21	11,00
2	Caçador	223.115,27	40.160,75	0,49
3	Chapécó	601.212,71	108.218,29	13,00
4	Concórdia	287.062,92	51.671,33	10,00
5	Criciúma	846.096,25	152.297,33	12,00
6	Lages	844.042,83	151.927,71	-0,25
7	São Miguel D'Oeste	203.737,75	36.672,80	4,00
8	Três Barras	69.477,82	12.506,01	35,00
11	Araranguá	412.517,04	74.253,07	16,00
12	Dionízio Cerqueira	26.959,15	4.852,65	-3,00
13	Imbituba	368.132,93	66.263,93	3,00
14	Joaçaba	406.333,18	73.139,97	4,00
15	Laguna	266.385,88	47.949,46	12,00
16	São Joaquim	96.478,23	17.366,08	-3,00
17	Curitibanos	234.955,71	42.292,03	3,00
18	Lontras / Rio do Sul	452.322,70	81.418,09	4,00
19	Videira	228.900,89	41.202,16	-1,00
20	Mafra	193.223,04	34.780,15	3,00
21	São Francisco do Sul	389.345,10	70.082,12	23,00
22	Xanxerê	231.556,26	41.680,13	14,00

3.2.2. Determinação dos níveis de demanda por transporte aéreo

3.2.2.1. Projeção da demanda

Admite-se que a demanda, num certo instante de tempo t , pode ser calculada com base num modelo de projeção probabilístico das variáveis explicativas, descrito a seguir:



onde

$$\text{Pop}_{t+T} = \text{Pop}_t \times (1 + f_{\text{Pop}})^T + \zeta_{\text{Pop}} \times \sigma_{\text{Pop}}$$

sendo:

Pop_t = população existente no ano t ;

f_{Pop} = taxa de crescimento anual da população;

T = período de tempo considerado;

ζ_{Pop} = variável aleatória normal normalizada;

σ_{Pop} = desvio padrão da população;

Pop_{t+T} = população projetada para o ano $t + T$.

O mesmo vale para a variável RECSER, ou seja:

$$\text{RECSER}_{t+T} = \text{RECSER}_t \times (1 + f_{\text{RECSER}})^T + \zeta_{\text{RECSER}} \times \sigma_{\text{RECSER}}$$

sendo:

RECSER_t = receita de serviço arrecadada no ano t ;

f_{RECSER} = taxa de crescimento anual da receita de serviço;

T = período de tempo considerado;

ζ_{RECSER} = variável aleatória normal normalizada;

σ_{RECSER} = desvio padrão da receita de serviços;

RECSER_{t+T} = valor da receita de serviços projetado para o ano $t + T$.

A partir da definição do período T para o qual será feita a projeção e dos valores simulados para ζ_{Pop} e ζ_{RECSER} , tem-se condições de calcular Pop_{t+T} e $RECSER_{t+T}$. Com base nesta estimativa, calcula-se a demanda por transporte aéreo para o ano t + T.

Esta metodologia para cálculo da demanda será aplicada no estudo de caso, descrito no capítulo 6.

3.2.2.2. Cálculo do desvio padrão da demanda

O cálculo do desvio padrão associado à demanda de passageiros é efetuado com base no desvio padrão das variáveis explicativas, de acordo com a metodologia proposta por *Naylor, Balintfy, Budick e Chu* (1971).

Os autores propõem o seguinte:

- Seja μ_x e σ_x , μ_y e σ_y a média e desvio padrão das variáveis x e y respectivamente

- Seja $y = \ln x$ (distribuição lognormal)

$$\mu_x = \exp [\mu_y + \sigma_y^2/2]$$

$$\sigma_x^2 = \mu_x^2 [\exp(\sigma_y^2) - 1]$$

de onde se tira:

$$\mu_y = \ln \mu_x - 1/2 \times \ln [\sigma_x^2 / \mu_x^2 + 1]$$

$$\sigma_y^2 = \ln(\sigma_x^2 / \mu_x^2 + 1)$$

Utilizando-se as fórmulas supracitadas, pode-se calcular o desvio padrão do logaritmo neperiano da população e da receita de serviços. Posteriormente, calcula-se o valor médio e desvio padrão do logaritmo neperiano da demanda utilizando as seguintes fórmulas:

$$\mu_{\ln D} = a_0 \times \mu_y + a_1 \times \mu_z - c$$

$$\sigma^2_{\ln D} = a_0^2 \times \sigma^2_y + a_1^2 \times \sigma^2_z$$

onde:

$\mu_{\ln D}$ = valor médio do logaritmo neperiano da demanda

μ_y = valor médio do logaritmo neperiano da população

μ_z = valor médio do logaritmo neperiano da receita de serviços

c = constante de valor igual a 4,070027 (*)

$\sigma^2_{\ln D}$ = variância do logaritmo neperiano da demanda

a_0 = coeficiente de valor igual a 0,50899 (*)

σ^2_y = variância do logaritmo neperiano da população

a_1 = coeficiente de valor igual a 0,4305006 (*)

σ^2_z = variância do logaritmo neperiano da receita de serviços.

(*) Valores extraídos da fórmula proposta pelo PAESC para projeção da demanda de passageiros.

A tabela 3.4 fornece os resultados encontrados.

TABELA 3.4
(ano base: 1991)

DEMANDA:

LOGARITMO NEPERIANO DO VALOR ESPERADO E DESVIO PADRÃO

MUNICÍPIO	NOME	DESVIO PADRÃO LN(DEMANDA)	DESVIO PADRÃO DEMANDA
1	Blumenau	0,154114845	528,58
2	Caçador	0,092152045	68,89
3	Chapecó	0,142977524	206,54
4	Concórdia	0,130426745	109,51
5	Criciúma	0,139142067	234,23
6	Lages	0,098829827	237,84
7	São Miguel D'Oeste	0,153136535	87,52
8	Três Barras	0,178216765	31,89
11	Araranguá	0,13166429	104,26
12	Dionizio Cerqueira	0,097876604	16,02
13	Imbituba	0,119910357	76,93
14	Joaçaba	0,104839623	72,05
15	Laguna	0,131020277	85,84
16	São Joaquim	0,084156713	32,80
17	Curitibanos	0,106586458	69,99
18	Lontras / Rio do Sul	0,122666469	114,26
19	Videira	0,096310159	59,60
20	Mafra	0,103563387	61,82
21	São Francisco do Sul	0,159206196	85,10
22	Xanxerê	0,133771289	72,65

4. Modelo estático para planejamento aeroportuário regional

4.1. Introdução

Segundo *Galvão* (1981), os problemas de Localização de Facilidades dizem respeito à escolha de um ou mais locais para o assentamento de instalações (depósitos de distribuição, escolas, hospitais, etc.) que tenham por finalidade atender à população de uma determinada área geográfica. O autor cita que “a escolha de onde localizar as instalações é feita através da otimização de uma função objetivo bem definida, obedecendo as restrições do problema.”

Os problemas de localização vêm sendo estudados com maior interesse por parte dos pesquisadores desde a década de 60, sendo que atualmente a literatura a respeito do assunto é bastante vasta.

De acordo com *Galvão* (1981), há uma tendência em se focar o problema de Localização de Facilidades como um caso de Localização em Redes, onde o espaço de soluções compreende o conjunto das ligações (arcos) e o conjunto dos nós (vértices). Este enfoque apresenta características que simplificam a modelagem dos problemas de localização, dentre elas a natureza discreta das variáveis, o número finito de vértices e arcos, a conectividade entre vértices, além de propriedades matemáticas relevantes.

No problema em estudo, as ligações da rede estão representando as rotas e os nós os pontos de demanda, fornecimento ou conexão.

Neste capítulo, far-se-á referência aos modelos de Localização de Facilidades descritos por *Veloz* (1994) em sua tese de mestrado, cabendo salientar que existem outras metodologias propostas por diferentes autores, além das descritas aqui, para a solução de tal problema.

4.2. Modelos para localização e cobertura de facilidades

4.2.1. Problemas de cobertura

Segundo *Toregas* (1971), resolver um problema de cobertura significa encontrar o número mínimo de facilidades e suas respectivas localizações de modo a

possibilita que cada ponto de demanda tenha acesso a pelo menos uma delas, limitadas a um custo máximo (medido em termos de tempo ou distância) previamente definido.

Quando o problema de cobertura envolve a determinação do número mínimo de facilidades necessárias para atender a todo um conjunto de usuários, chama-se PROBLEMA DE COBERTURA TOTAL (ou LSCP).

Em certos casos, não é possível instalar o número de facilidades necessárias para “cobrir” todos os usuários. Desse modo, pode-se desejar que as k facilidades disponíveis sejam localizadas de tal modo que o maior número possível de usuários seja coberto. Nesta situação, tem-se um PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE MÁXIMA COBERTURA (ou PLMC).

4.2.2. Critérios de otimalidade em problemas de localização

A escolha do critério de otimalidade a ser adotado é a decisão mais importante no processo de solução dos problemas de localização. *Veloz* (1994) cita em seu trabalho os dois critérios mais encontrados na literatura, que são:

(1) Critério Mini-Max

Adota-se este critério quando o objetivo é minimizar o maior custo (distância ou tempo) de qualquer vértice à facilidade a ele alocada. É o critério mais indicado na localização de “facilidades de emergência”, tais como postos policiais, hospitais, dentre outras. Neste caso, as localizações de facilidades são chamadas de Centros da Rede.

(2) Critério Mini-Soma

Dá-se preferência a este critério quando o objetivo mais apropriado é minimizar a soma total dos custos (distâncias ou tempos) dos vértices da rede às facilidades a eles alocadas. É o critério mais indicado nos problemas de localização de depósitos, dentre outros. Neste caso, as localizações de facilidades são chamadas de Medianas da Rede.

4.3. Formulações como PLI

A maioria das formulações dos problemas de localização de facilidades como Programação Linear Inteira (PLI) são tratadas dentro de uma classe especial deste tipo, conhecida como Programação Linear Inteira Zero-Um (ou bivalente).

4.3.1. Formulação para critério Mini-Max

A formulação do problema Mini-Max como um PLI do tipo zero-um pode ser estabelecida da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } n = \sum_{j=1}^n c_j \times x_j$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j=1}^n a_{ij} \times x_j \geq 1, i = 1, \dots, m$$

$$x_j = (0,1), j = 1, \dots, n$$

- Os valores a_{ij} são os “coeficientes de cobertura” e terão valor um se o usuário i for coberto pelo local j ; caso contrário, serão iguais a zero. Da mesma forma, x_j será igual a 1 se a facilidade for localizada em j e 0 em caso contrário.

- As restrições definem que cada um dos m usuários sejam cobertos por pelo menos uma das n facilidades.

- c_j é o custo de se locar uma facilidade no local j , que pode ser expresso também em termos de distância. No caso da adoção do critério Mini-Max, c_j é o maior custo até o local j , dentre os associados aos usuários cobertos por j .

4.3.2. Formulação para critério Mini-Soma

Como cita *Veloz* (1994) em seu trabalho, além do problema de mini-soma puro, dois outros problemas mais gerais são amplamente discutidos na literatura.

Trata-se dos problemas P-Mediana com Custos Fixos e o Simple Plant Location Problem.

O problema das P-Mediana com Custos Fixos considera que, de uma localidade para outra, modificam-se os custos de implantação da facilidade. Por esta razão, estes custos devem ser incluídos na função objetivo.

Já o problema Simple Plant Location não limita o número p de instalações, visto que o mesmo faz parte da solução, como consequência do equilíbrio entre os custos fixos e os custos das distâncias entre as facilidades e os usuários.

4.3.2.1. Formulação do P-Mediana "Puro"

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \times y_{ij}$$

$$\text{sujeito a } \sum_{i=1}^n y_{ij} = 1, j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ii} = p$$

$$y_{ii} \geq y_{ij}, i, j = 1, \dots, n$$

$$y_{ij} = 0 \text{ ou } 1, i, j = 1, \dots, n$$

onde:

- $[Y_{ij}]$ é a matriz de alocação $n \times n$, tal que

$$y_{ij} = 1, \text{ se o vértice } x_j \text{ for alocado a } x_i$$

$$0, \text{ caso contrário}$$

$$y_{ii} = 1, \text{ se } x_i \text{ for vértice mediano}$$

$$0, \text{ caso contrário}$$

- $[D_{ij}]$ é a matriz de distâncias ponderadas da rede, isto é, a matriz de distâncias da rede com as colunas j multiplicada pelo peso v_j . Nessa matriz tem-se $d_{ii} = 0$, para todo i .

O primeiro conjunto de restrições garante que qualquer vértice x_j seja alocado a uma e apenas uma mediana x_i . O segundo conjunto garante a presença de p medianas na solução ótima. Finalmente, o terceiro conjunto garante que vértices não medianos sejam alocados apenas a vértices medianos.

4.4. Modelo proposto

4.4.1. Aspectos gerais

Veloz (1994) cita em seu trabalho que pode-se utilizar uma formulação, proposta por *Moore e Reville* (1982), que defina uma hierarquia de categorias de aeroportos em função do tamanho, capacidade e recursos disponíveis, associando-se a cada uma a abrangência de localidades consideradas cobertas. Pode-se também utilizar um peso, que representa o valor para o serviço e cresce gradativamente em relação ao benefício de cobertura.

Além disso, o autor ressalta a possibilidade de se utilizar o critério de otimalidade relacionado à população (passageiros) atendida pelo sistema.

Pelo fato dos recursos necessários para implantação da rede serem limitados e designados por organismos governamentais, utilizar-se-á a visão Multi-Objetivo. Propõe-se portanto que o modelo utilize como critérios de otimalidade a maximização da demanda a ser atendida e a minimização dos recursos investidos no sistema.

Em se tratando de um problema de Localização de Facilidades (aeroportos), utilizar-se-á o modelo de Localização e Cobertura Máxima como base apropriada para estudá-lo.

4.4.2. Estrutura do modelo

Segundo o enfoque proposto por *Veloz* (1994), a rede em estudo conterà três tipos de nós e dois tipos de arcos, definidos como segue:

- Nó de Serviço j : refere-se a uma localidade que necessite ter acesso ao sistema de transporte aéreo e seja considerada pelos estudos do PAE como um município que dispõe ou dispôs de aviação regular, geralmente aeroportos regionais ou sub-regionais;

- **Nó de Demanda i:** uma localidade que requer acesso ao sistema de transporte aéreo mas foi considerada nos estudos do PAE como não dispondo de aviação regular, dedicando-se somente à aviação geral (aeroportos locais e complementares);
- **“Hub” ou Polarizador:** refere-se a um município, destino para os serviços aéreos oriundos dos nós de serviço e demanda, que integra o sistema de transporte aéreo nacional, geralmente aeroportos principais e polarizadores;
- **Rota PAE:** a disponibilidade de serviço aéreo regular entre um nó de serviço (origem) e um Hub (destino), estabelecida pelos estudos da previsão de rota aérea nos PAE e pelas companhias de transporte aéreo;
- **Rota de Cobertura de um nó de demanda:** a possibilidade de dispôr-se de serviço entre um nó de demanda i e um de serviço j, obedecendo à área de abrangência especificada para este nó de serviço.

4.4.3. Formulação do modelo PLMC - PAE

Veloz formula o modelo PLMC - PAE da seguinte maneira:

$$\text{Max } Z1 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} W_{ik} \times a_i \times Y_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} W_{jk} \times a_j \times X_{jk}$$

$$\text{Min } Z2 = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} \times X_{jk} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} C_{ik} \times Y_{ik}$$

$$\text{s.a.: } \sum_{k \in K_j} X_{jk} \leq 1, \text{ para todo } j \in J \quad (1)$$

$$\left(\sum_{j \in N_{ik}} X_{jk} \right) - Y_{ik} \geq 0, \text{ para todo } i \in I \text{ e } k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} Y_{ik} \leq 1, \text{ para todo } i \in I \quad (3)$$

$$Y_{ik} = (0,1), \text{ para todo } i \in I \text{ e para todo } k \in K \quad (4)$$

$$X_{jk} = (0,1), \text{ para todo } j \in J \text{ e para todo } k \in K \quad (5)$$

onde:

- K = conjunto de categorias permitidas em j $\{A, B, C, D\}$;
- I = conjunto dos nós de demanda;
- J = conjunto dos nós de serviço;
- k = categoria de serviço;
- i = nó de demanda;
- j = nó de serviço;
- N_{ik} = conjunto de nós j com possibilidade de cobrir um nó específico i (distância de i a j está dentro da abrangência), desde que estejam operando na categoria k ;
- W_{ik} = peso para o benefício de cobrir a localidade i ;
- W_{jk} = peso para o benefício de proporcionar ao nó j um aeroporto de categoria k ;
- a_i = demanda prevista na localidade i ;
- a_j = demanda prevista na localidade j ;
- c_{jk} = custo de oferecer ao aeroporto j um serviço de categoria k ;
- c_{ik} = custo de oferecer ao nó i um serviço aeroportuário de categoria básica;
- $Y_{ik} = 1$, se o nó i for coberto por um aeroporto j , pertencente ao conjunto N_{ik}
0, caso contrário;
- $X_{jk} = 1$, se o aeroporto j for servido com a categoria k
0, caso contrário.

4.4.3.1. Funções Objetivo

A função objetivo $Z1$ mede o número de passageiros a serem beneficiados com o sistema em cada localidade, multiplicado pelo peso correspondente. Os pesos W_{jk} variam de acordo com a categoria k do aeroporto a ser instalado em j , pois quanto maior o grau da categoria k na hierarquia dos níveis de serviço, maior a capacidade do aeroporto em termos de demanda atendida. Já os pesos W_{ik} exprimem a importância da participação da localidade i no sistema.

A função objetivo $Z2$ mede o total de recursos necessários para instalação dos aeroportos no estado.

Deseja-se portanto a maximização do número de passageiros a serem atendidos pelo sistema, bem como a minimização dos recursos necessários para implantação do mesmo.

4.4.3.2. Restrições

O conjunto de restrições (1) tem por objetivo garantir a existência de somente uma categoria de serviço da hierarquia estabelecida em cada localidade j .

As restrições (2) garantem que todo aeroporto i seja coberto por um aeroporto j de categoria k , pertencente ao conjunto de abrangência N_{ik} . Este conjunto é definido previamente para cada nó i em cada categoria pelo estudo de cobertura do PAE.

As restrições (3) garantem que cada nó i seja coberto por apenas um nó j , assegurando assim que a demanda i entre no máximo uma vez na função objetivo. No entanto, percebe-se que não há restrição quanto a um nó j cobrir vários nós i .

Finalmente, as restrições (4) e (5) indicam que as variáveis Y_{ik} e X_{jk} são inteiras binárias (0, 1).

4.4.3.3. Variáveis de Decisão

As variáveis X_{jk} assumem valor 1 caso o potencial nó de serviço j seja servido com um aeroporto de categoria k , e valor 0 em caso contrário.

As variáveis Y_{ik} assumem valor 1 caso o potencial nó de demanda i seja servido por um aeroporto de categoria básica e coberto por um aeroporto j de categoria k . Caso isto não ocorra, assumem valor 0.

4.4.4. Modelo alternativo proposto

Veloz (1994) propôs em seu trabalho que a função objetivo Z_2 fosse definida como uma restrição, limitada pelo máximo valor a que o estado estaria disposto a investir na implantação do sistema aeroportuário. Este enfoque no entanto não garante que seja alcançado o máximo benefício (demanda atendida) por recurso investido. Sendo assim, optou-se por reformular o problema, adaptando-o para um caso de Programação Fracional.

Segundo *Bitran e Novaes* (1973), a Programação Fracional resolve uma classe de problemas em que a função objetivo é representada por uma fração. O numerador e o denominador são expressões lineares, bem como as restrições.

No caso em estudo, a função objetivo passará a ser definida por uma fração, na qual o numerador será a expressão Z1 (quantidade de passageiros atendida) e o denominador a expressão Z2 (quantia total investida em unidades monetárias). Pretende-se então maximizar o benefício gerado através da implantação do sistema (em termos de passageiros atendidos) por unidade de recurso investido.

Para solução do novo problema, estudou-se a possibilidade de utilização de três diferentes metodologias, descritas a seguir:

(1) Metodologia Iterativa

Consiste em resolver o problema tendo como função objetivo a maximização de Z1, restringindo a quantia total investida a um valor máximo CT, que sofreria incrementos a cada iteração, buscando-se obter a quantia CT* que gere o máximo benefício por valor investido.

Assim, o PLMC - PAE poderia ser reformulado como segue:

$$\text{Max } Z1 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} W_{ik} \times a_i \times Y_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} W_{jk} \times a_j \times X_{jk}$$

$$\text{s.a.: } \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} \times X_{jk} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} C_{ik} \times Y_{ik} \leq \text{CT}$$

$$\sum_{k \in K_j} X_{jk} \leq 1, \text{ para todo } j \in J$$

$$\left(\sum_{j \in N_{ik}} X_{jk} \right) - Y_{ik} \geq 0, \text{ para todo } i \in I \text{ e } k \in K$$

$$\sum_{k \in K} Y_{ik} \leq 1, \text{ para todo } i \in I$$

$$Y_{ik} = (0,1), \text{ para todo } i \in I \text{ e para todo } k \in K$$

$$X_{jk} = (0,1), \text{ para todo } j \in J \text{ e para todo } k \in K$$

obs.: CT é incrementado a cada iteração até que se obtenha o valor CT* correspondente ao máximo benefício por recurso investido.

(2) Metodologia proposta por *Charnes e Cooper* (1962)

Charnes e Cooper resolveram o problema adicionando uma variável t , de tal forma que o denominador possa ser transformado numa constante CT diferente de zero. Por outro lado, define-se um novo conjunto de variáveis transformadas XT_{jk} e YT_{ik} , tal que $XT_{jk} = X_{jk} \times t$ e $YT_{ik} = Y_{ik} \times t$. Assim, o problema pode ser modelado como segue:

$$\text{Max } Z1 = \left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} W_{ik} \times a_i \times YT_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} W_{jk} \times a_j \times XT_{jk} \right) / CT$$

$$\text{s.a.: } \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} \times XT_{jk} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} C_{ik} \times YT_{ik} = CT$$

$$\sum_{k \in K_j} XT_{jk} \leq t, \text{ para todo } j \in J$$

$$\left(\sum_{j \in N_{ik}} XT_{jk} \right) - YT_{ik} \geq 0, \text{ para todo } i \in I \text{ e } k \in K$$

$$\sum_{k \in K} YT_{ik} \leq t, \text{ para todo } i \in I$$

$$XT_{jk} \geq 0, \text{ para todo } j \in J \text{ e para todo } k \in K$$

$$YT_{ik} \geq 0, \text{ para todo } i \in I \text{ e para todo } k \in K$$

$$t \geq 0.$$

O problema transformado poderia ser resolvido facilmente pelo método Simplex, já que se enquadra dentro da programação linear.

No entanto, esta metodologia não pode ser aplicada no caso em estudo, pelo fato das variáveis X_{jk} e Y_{ik} serem binárias. Não há como garantir que esta restrição seja respeitada com a inclusão da variável t no problema. Sendo assim, a hipótese de aplicação desta metodologia foi descartada.

(3) Metodologia proposta por *Bitran e Novaes* (1973)

Considerando um problema geral de Programação Fracional representado da seguinte maneira:

$$\text{Max } L = \frac{\alpha_0 + \langle \alpha, X \rangle}{\beta_0 + \langle \beta, X \rangle}$$

$$\text{s.a.: } AX \leq b$$

$$X \geq 0$$

onde a notação $\langle \alpha, X \rangle$ representa o produto escalar entre os vetores $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ e $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, o mesmo valendo para a notação $\langle \beta, X \rangle$.

O algoritmo proposto por *Bitran e Novaes* pode ser descrito da seguinte forma:

FASE 1

Na fase 1 do algoritmo procura-se encontrar um ponto subótimo X^* que esteja relativamente próximo do ótimo verdadeiro X^{**} . Uma maneira de se obter isso é definir um PPL em que a função objetivo seja representada por uma família de retas paralelas ortogonais à reta $\beta_0 + \langle \beta, X \rangle = 0$.

É resolvido o seguinte PPL:

$$\text{Max } F = k_1x_1 + k_2x_2 + \dots + k_nx_n = KX$$

$$\text{s.a.: } AX \leq b$$

$$X \geq 0$$

onde $k_i = \alpha_i - g\beta_i$

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i^2} \quad (\text{constante})$$

Aplicando o método Simplex obtém-se uma solução subótima X^* . Substitui-se X^* na equação de L , obtendo-se seu valor correspondente, ou seja,

$$L(X^*) = \frac{\alpha_0 + \langle \alpha, X^* \rangle}{\beta_0 + \langle \beta, X^* \rangle}$$

FASE 2

Na fase 2 do algoritmo considera-se a direção formada pelo pivô e pelo ponto X^* . Assim, resolve-se um PPL em que a direção das retas representativas da função objetivo é paralela à reta formada pelo pivô e pelo ponto X^* , formulado como segue:

$$\text{Max } F' = K'X = k'_1x_1 + k'_2x_2 + \dots + k'_nx_n$$

$$\text{s.a.: } AX \leq b$$

$$X \geq 0$$

$$\text{onde } k'_i = \alpha_i - \beta_i L(X^*)$$

Aplicando o método Simplex obtém-se uma nova solução subótima X^{**} .

FASE 3

Comparam-se as soluções subótimas X^{**} e X^* ; se $X^{**} = X^*$ o problema está resolvido, e X^{**} (ou X^*) é a solução. Se $X^{**} \neq X^*$, volta-se à fase 2, substituindo-se X^* por X^{**} . Repete-se o processo, até que se obtenha $X^{**} = X^*$ (convergência).

Segundo *Bitran e Novaes* (1973), ao contrário do problema típico de Programação Linear, em que a função objetivo representa uma família de retas paralelas entre si, no caso da Programação Fracional pode-se demonstrar que a função objetivo representa um feixe de retas passando por um mesmo ponto, denominado pivô, para o problema a duas variáveis.

CONVERGÊNCIA DO ALGORITMO:

O Simplex definido na fase 2 garante que a solução subótima X^{**} é um ponto extremo do conjunto convexo das soluções viáveis. Além disso, o gradiente $\nabla X_0 L$, definido pela expressão $\nabla X_0 L = \frac{1}{\beta_0 + \langle \beta, X_0 \rangle} \times [\alpha - L(X_0) \times \beta]$, possui mesmo sentido do vetor $\alpha - L(X_0) \times \beta$, o que garante que, sempre que se aplicar a fase 2 a partir de um ponto X^* , o processo fornece uma solução X^{**} tal que $L(X^{**}) > L(X^*)$. Como salientam os autores, isso significa que as soluções viáveis, obtidas na aplicação da fase 2, vão sucessivamente melhorando. Por outro lado, sabe-se que o número de pontos extremos é finito, significando que se atinge a solução ótima com um número finito de iterações.

4.4.5. Programa computacional elaborado para aplicação da metodologia (3)

Optou-se por utilizar a metodologia proposta por *Bitran e Novaes* (1973), que já engloba o conceito de Programação Fracional, sem a necessidade de resolver o problema várias vezes até encontrar o máximo benefício por valor investido, como proposto na metodologia (1).

Para isso, desenvolveu-se um programa computacional em linguagem Pascal denominado PROGRAMACAO_FRACIONAL_01, composto basicamente por três procedures:

a) Procedure Dados

Consiste na entrada de dados do problema, onde são fornecidos os seguintes valores:

- coeficientes da matriz A , associados às restrições do problema;
- pesos associados às localidades j ;
- pesos associados às localidades i ;
- custos associados à instalação de um aeroporto de categoria k na localidade j ;
- custos associados à instalação de um aeroporto na localidade i a ser coberto por outro de categoria k ;
- demanda associada às localidades j e i ;

- coeficientes do vetor B, associados às restrições do problema;
- coeficientes C1, associados ao numerador da função objetivo (produto do peso pela demanda de cada localidade);
- coeficientes C2, associados ao denominador da função objetivo (valor igual ao custo de instalação dos aeroportos).

b) Procedure Balas

Consiste na programação em linguagem Pascal do Algoritmo de Balas, utilizado na resolução de problemas de programação linear inteira em que as variáveis de decisão estão restritas aos valores zero e um.

Esta procedure, publicada por *Syslo, Deo e Kowalik* (1982), resolve problemas do seguinte tipo:

$$\min Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

$$\text{s.a. } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$x_j = 1 \text{ ou } 0, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{onde } c_j \geq 0$$

Para possibilitar a utilização da Procedure Balas, todas as restrições foram definidas como sendo do tipo menor ou igual. Para isto, inverteu-se o sinal na procedure Dados dos coeficientes associados a restrições que, originalmente, eram do tipo maior ou igual.

Pelo mesmo motivo, o problema passou a ser definido como de minimização, havendo inversão de sinal para os coeficientes da função objetivo com sinal negativo, bem como utilização de variável complementar.

c) Procedure P_Fracional

Consiste no emprego da metodologia descrita no item (3) para resolução do problema de Programação Fracional.

5. Modelo recursivo para o planejamento aeroportuário regional sob condição de incerteza

5.1. Introdução

No Brasil, a expansão da economia e o crescimento regional sofrem grandes variações ao longo do tempo. Assim, há épocas de grande desenvolvimento e outras de relativa estagnação.

Segundo *Souza e Novaes (1996)*, planejar nessas condições a implantação de instalações que envolvam investimentos elevados passa a ser uma tarefa complexa, já que envolve, dentre outras coisas, a previsão da demanda em função do crescimento da população, renda ou produto interno bruto do país.

Essa situação é válida também para o planejamento de uma rede regional de aeroportos, onde torna-se interessante planejar a implantação do sistema em estágios.

O planejamento em estágios permite uma reavaliação periódica do sistema, para posterior correção ou minimização de possíveis falhas na previsão da demanda e custos envolvidos na instalação dos aeroportos.

No artigo intitulado *Expansão de Sistemas de Transporte com Demanda Estocástica (Souza e Novaes, 1996)*, encontra-se descrita uma metodologia para determinação do intervalo de tempo ótimo entre a adição (ou expansão) de instalações no sistema considerado, de modo a minimizar o valor presente do investimento necessário. Esta metodologia permite também a introdução dos efeitos probabilísticos na projeção da demanda, o que não elimina totalmente as incertezas, mas reduz seus efeitos no limite de informação disponível.

5.2. Metodologia proposta por Souza e Novaes adaptada ao problema em estudo

Seguindo a metodologia proposta por *Souza e Novaes (1996)*, admite-se que, num certo instante de tempo t_0 , haja m municípios candidatos a sediar aeroportos, cujas populações (e conseqüentes níveis de demanda) crescem de formas diferentes no tempo. As demandas $D^0_1, D^0_2, \dots, D^0_m$ de cada município associadas ao tempo t_0 são conhecidas. Conhece-se também os níveis de demanda $D^*_1, D^*_2, \dots, D^*_m$, que

justificam a implantação de um aeroporto de categoria k em cada município considerado. O crescimento da demanda é descrito por um processo geométrico, de taxa $\mu'j$:

$$D_j(t) = D_j^0 \times \exp[\mu'j \times t]$$

onde $\mu'j$ é a taxa geométrica de crescimento dada por:

$$\mu'j = \ln(1 + \mu_j)$$

sendo μ_j a taxa aritmética de crescimento equivalente.

Seja t_1, t_2, \dots, t_m , o tempo para que a demanda de cada município chegue ao valor crítico. O valor esperado e variância da variável t_j é calculado através das seguintes fórmulas:

$$E[t_j] = \frac{\ln D_j^* - \ln D_j^0}{\mu'j}$$

$$\text{var}[t_j] = \frac{\sigma^2}{\mu'^2} E[t_j]$$

Seja τ o menor valor observado dentre os tempos t_j dos m municípios.

Seja F_τ a função de repartição da variável aleatória τ e G_τ sua complementar, ou seja:

$$G_\tau(x) = \text{prob}(x > \tau) = 1 - \text{prob}(x \leq \tau) = 1 - F_\tau(x).$$

Admitindo-se independência estatística entre o crescimento da demanda nos vários municípios, pode-se escrever:

$$\text{prob}(x > \tau) = \text{prob}(t_1 > \tau) \times \text{prob}(t_2 > \tau) \times \dots \times \text{prob}(t_m > \tau).$$

Assim,

$$F_{\tau}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - F_{\tau}(\tau)] \quad (1)$$

Nas condições práticas comuns, as distribuições de t_1, t_2, \dots, t_m , bem como a distribuição de τ podem ser aproximadas por distribuições normais. Nesse caso o valor esperado de τ coincide com a mediana (valor mais provável) e, por este motivo, adotou-se como critério para determinação de $\tau_{\text{médio}}$ aquele que iguale a expressão (1) a 0,5.

Vale observar que o método para se determinar $\tau_{\text{médio}} = E[\tau]$ é iterativo.

5.3. Aplicação do modelo em estágios ao planejamento aeroportuário regional

5.3.1. Planejamento em estágios

O planejamento do sistema aeroportuário regional será executado da seguinte maneira: a partir do ano inicial t_0 , calcula-se o prazo Δt , com base nas demandas iniciais e críticas de cada localidade, em que o sistema deve ser revisto. Com os dados referentes ao ano $t = t_0 + \Delta t$, resolve-se o problema de localização de facilidades, como já descrito no capítulo 4.

Após isso, t passa a ser o ano inicial, ou seja, $t_0 = t$, repetindo-se o processo acima descrito até completar um período de tempo igual a 20 (vinte) anos a partir da data inicial de estudo.

Cabe ressaltar que, de acordo com o PAESC, as recomendações quanto ao planejamento do sistema aeroportuário são estabelecidas para um horizonte de 20 (vinte) anos, havendo dois horizontes intermediários, correspondentes ao planejamento de curto e médio prazos (5 e 10 anos, respectivamente). Considerando

como início de estudo o ano 1997, segundo esse critério o sistema teria que ser revisto em 2002, 2007 e 2017.

A idéia portanto é a seguinte: calcula-se o prazo Δt e o ano de revisão t , comparando o valor obtido com a data recomendada anteriormente. Se o valor calculado for menor que o prazo estabelecido pelo PAESC, o sistema será revisto em t . Caso contrário, segue-se os horizontes de planejamento recomendados pelo plano para revisão do sistema.

5.3.1.1.. Cálculo dos prazos para revisão do sistema

Para aplicação da metodologia proposta por *Souza e Novaes (1996)*, elaborou-se o programa PRAZOS em linguagem Pascal, que calcula os prazos para revisão da capacidade do sistema.

O programa PRAZOS está estruturado da seguinte maneira:

a) Procedure Dados

Consiste na entrada de dados do problema, em que são fornecidos os seguintes valores com base no ano t_0 (ano inicial) considerado:

- demanda associada a cada município;
- taxa aritmética de crescimento da demanda;
- desvio padrão da taxa aritmética de crescimento da demanda;
- demanda crítica, definida como aquela que justifica a instalação (ou expansão) de um aeroporto de categoria k em cada município.

b) Procedure Normal

Determina a função densidade acumulada, considerando uma distribuição normal. É utilizada para determinar a f.d.a. de $\tau_{\text{médio}}$.

c) Procedure Fibonacci

Utiliza o método de Fibonacci para determinar o valor esperado do prazo para revisão do sistema.

d) Function f

Determina o valor esperado do tempo associado a cada município, com respectivo desvio padrão, para se atingir a demanda crítica. Após isto calcula-se o valor de f, que indica a proximidade do intervalo de tempo encontrado na procedure Fibonacci em relação ao valor procurado (aquele que fornece uma f.d.a. igual a 0,5).

e) Procedure Det_Expon

Calcula o prazo para revisão do sistema para os casos determinístico e probabilístico.

O programa PRAZOS permite a introdução do desvio padrão da demanda. Assim, tem-se condições de determinar o prazo para revisão do sistema, tanto para o caso probabilístico como para o determinístico.

6. Aplicação do modelo ao planejamento aeroportuário de Santa Catarina

6.1. Introdução

No presente capítulo, far-se-á uma aplicação do modelo proposto ao estado de Santa Catarina.

Os dados de entrada foram obtidos com base nos estudos preliminares de demanda por transporte aéreo e de infra-estrutura, realizados pelo IAC para elaboração do PAESC.

As localidades consideradas “candidatas” a fazer parte da rede são um conjunto de todos os possíveis pontos de geração/atração de tráfego aéreo regional e geral no estado.

6.2. Dados de entrada para aplicação do modelo

6.2.1. Nós da rede

6.2.1.1. Nós de serviço j

São os nós candidatos a comportar aeroportos regionais ou sub-regionais, cujas definições foram apresentadas no capítulo 2.

6.2.1.2. Nós de demanda i

São os nós que podem ingressar na rede como aeroportos locais e/ou complementares, cujas definições foram apresentadas no capítulo 2.

6.2.1.3. Localidades selecionadas pelo PAESC como possíveis nós da rede

Através de estudos realizados pelo IAC para elaboração do PAESC, escolheu-se as localidades candidatas a fazer parte do conjunto de nós da rede aeroportuária, apresentadas na *tabela 6.1*.

Observa-se que, das localidades consideradas pelo IAC, Itajaí (10), por ser um elemento polarizador e administrado pela Empresa Brasileira de Infra-estrutura aeroportuária - INFRAERO, não foi considerado. No caso de Tubarão (9) e Laguna (15), que se encontram dentro da mesma área de movimento terminal (TMA), ou seja, sua separação é menor que 50 km, apenas Laguna foi considerado. Isto porque, já que não se pode considerar estes dois municípios simultaneamente, optou-se por trabalhar com Laguna, que apresenta melhores condições de utilização.

Além disso, em virtude de sua importância a nível Federal, os aeroportos de Florianópolis, Joinville e Navegantes foram objeto de planos específicos de desenvolvimento elaborados pelo IAC, não entrando portanto neste estudo.

TABELA 6.1
(Horizonte de 20 anos)

LOCALIDADES CANDIDATAS A SEDIAR AEROPORTOS

j	LOCALIDADE
1	Blumenau
2	Caçador
3	Chapecó
4	Concórdia
5	Criciúma
6	Lages
7	São Miguel D'Oeste
8	Três Barras
9	Tubarão
10	Itajaí
i	LOCALIDADE
11	Araranguá
12	Dionízio Cerqueira
13	Imbituba
14	Joaçaba
15	Laguna
16	São Joaquim
17	Curitibanos
18	Lontras/Rio do Sul
19	Videira
20	Mafra
21	São Francisco do Sul
22	Xanxerê

6.2.2. Previsão da demanda de passageiros

A demanda de passageiros para os vários horizontes de planejamento considerados no estudo foi calculada com base na metodologia já descrita no capítulo 3.

6.2.3. Hierarquização dos aeroportos

Todos os componentes deste caso em estudo enquadram-se na categoria de aeroportos de pequeno porte, que corresponde a toda unidade aeroportuária em que a atividade determinante da rotina operacional é constituída pela operação de aeronaves de aviação geral e de aviação regional, com baixo volume de passageiros por ano (na ordem de milhares).

De acordo com definição do IAC, estes tipos de aeroportos subdividem-se em cinco categorias, descritas a seguir.

6.2.3.1. Categoria básica

É composta por aeroportos locais e complementares de importância econômica básica. Destina-se ao tráfego de aeronaves leves, e apresenta as seguintes características operacionais:

- Aeronave Crítica

EMB-110

- Passageiros Hora-Pico

25

- Pista de Pouso

1200 m/Cs

- Pátio de Aeronaves

4200 m²

- Terminal de Passageiros

100 m²

- Tipo de Operação

VFR

6.2.3.2. Categoria A

É composta por aeroportos de utilização sub-regionais de importância econômica média e de tradição nos setores de aviação. Destina-se ao tráfego de aeronaves leves de aviação geral, com as seguintes características operacionais:

- Aeronave Crítica

EMB-110

- Passageiros Hora-Pico

25

- Pista de Pouso

1200 m/Cs

- Pátio de Aeronaves

4200 m²

- Terminal de Passageiros

100 m²

- Tipo de Operação

VFR /IFR

O volume de passageiros/ano, movimentos/ano e recursos necessários serão estimados em função de cada localidade conforme as metas previstas para ela.

6.2.3.3. Categoria B

É composta por aeroportos regionais e sub-regionais de importância econômica maior, operando plenamente com aeronaves EMB-110. Apresenta as seguintes características operacionais:

- Aeronave Crítica

EMB-110

- Passageiros Hora-Pico

40

- Pista de Pouso

1500 m/Cs/PAV

- Pátio de Aeronaves

4200 m² - 6000 m²

- Terminal de Passageiros

200 m² - 300 m²

- Tipo de Operação

VFR/IFR

O volume de passageiros/ano, movimentos/ano e recursos necessários são estimados em função de cada localidade conforme as metas previstas para ela.

6.2.3.4. Categoria C

É composta por aeronaves de utilização regionais e sub-regionais onde existe potencial de demanda e previsão de aviação regional, para os quais se prevê a operação da aeronave EMB-120 Brasília, com as seguintes características operacionais:

- Aeronave Crítica

EMB-120

- Passageiros Hora-Pico

60

- Pista de Pouso

1800 m/Cs

- Pátio de Aeronaves

6000 m²

- Terminal de Passageiros

300 m²

- Tipo de Operação

IFR

O volume de passageiros/ano, movimentos/ano e recursos necessários serão estimados em função de cada localidade conforme as metas previstas para ela.

6.2.3.5. Categoria D

É composta por maiores aeroportos regionais, situada na área de polarização abrangente e volume de tráfego elevado, para a qual se prevê a operação plena da aeronave EMB-120 Brasília, com as seguintes características operacionais:

- Aeronave Crítica

EMB-120

- Passageiros Hora-Pico

80

- Pista de Pouso

1800 m/Cs

- Pátio de Aeronaves

7400 m² - 9200 m²

- Terminal de Passageiros

300 m²

- Tipo de Operação

IFR

O volume de passageiros/ano, movimentos/ano e recursos necessários são estimados em função de cada localidade conforme as metas previstas para ela, o que significa que as características aqui apresentadas podem variar.

6.2.4. Pesos na função objetivo

6.2.4.1. Pesos W_{ik} para os nós de demanda

Os pesos W_{ik} expressam o benefício de se atender à demanda prevista para o aeroporto i .

Assumiu-se arbitrariamente para todos os potenciais nós i da rede um peso igual a 1. No entanto, como o objetivo é que o coeficiente $W_{ik} \times a_i$ (peso multiplicado pela demanda) expresse a importância da participação do nó i na rede, este valor pode ser modificado em função de estratégias de desenvolvimento definidas para a região (incentivo ao crescimento econômico de determinadas localidades), ou da política adotada na revisão do sistema.

6.2.4.2. Pesos W_{jk} para os nós de serviço

Associado à categoria de serviço considerada e à localidade j , tem-se diferentes pesos W_{jk} . Para a definição dos valores a eles associados, adotou-se o seguinte critério:

- seja H_k a capacidade de um aeroporto de categoria k , expressa em passageiros hora-pico;
- seja D_j a demanda prevista para um aeroporto j , expressa também em passageiros hora-pico.

Se a relação $\frac{H_k}{D_j}$ for menor que 1, ou seja, se a capacidade de um aeroporto de categoria k for menor que a demanda prevista para o nó j, o peso W_{jk} correspondente será igual à relação $\frac{H_k}{D_j}$ elevada à quarta potência. Caso isto não ocorra, ou seja, se a relação $\frac{H_k}{D_j}$ for maior ou igual a 1, assumir-se-á o valor 1 para W_{jk} .

Em resumo, se $\frac{H_k}{D_j} < 1$, $W_{jk} = \left(\frac{H_k}{D_j}\right)^4$. Caso contrário, $W_{jk} = 1$.

Para a definição da demanda D_j em passageiros hora-pico, adotou-se o critério sugerido por *Horonjeff e Mckelvey* (1983). Os autores sugerem uma correlação entre o número de passageiros hora-pico e a demanda anual e, com base em dados de vários aeroportos dos E.U.A., estabeleceram os seguintes valores:

- correlação entre pico mensal e demanda anual: 9,5 %;
- correlação entre pico diário e pico mensal: 3,5 %;
- correlação entre pico horário e pico diário: 15 %.

Multiplicando esses valores, chega-se a uma correlação entre pico horário e demanda anual igual a 0,05 %.

Vale lembrar que o objetivo do presente estudo restringe-se em propor uma metodologia que possa facilitar o planejamento aeroportuário regional, no que diz respeito à localização das unidades que compõem a rede. Sendo assim, adotou-se os valores propostos pelos autores, sem a preocupação em investigar sua consistência. Para o planejamento propriamente dito, haveria a necessidade de coletar dados referentes à demanda por transporte aéreo em municípios já possuidores de infraestrutura aeroportuária, e com características semelhantes às das localidades i e j. Deste modo, ter-se-ia condições de estabelecer uma correlação mais realista entre a demanda anual e o pico horário.

6.2.5. Custos na função objetivo

6.2.5.1. Custos Cjk nos nós de serviços

O custo Cjk expressa os recursos em infra-estrutura aeroportuária, necessários para implantação de um aeroporto de categoria k no município j.

Os valores aqui adotados, extraídos da tese de *Veloz* (1994), foram calculados com base nos índices expostos no PAESC, deduzindo a parcela referente a reaproveitamento das instalações existentes.

6.2.5.2. Custos Ci nos nós de demanda

O custo Ci expressa os recursos previstos para proporcionar ao nó i a instalação de um aeroporto de categoria básica. Os valores foram também extraídos da tese de *Veloz* (1994).

6.2.5.3. Custos utilizados na função objetivo

Na *tabela 6.2*, encontram-se listados os custos Cjk e Ci a serem utilizados na função objetivo.

TABELA 6.2
(ano base: 1996)

Recursos de investimento em infra-estrutura aeronáutica atualizados para jan/96 (US\$)						
mun. J	cat. A	cat. B	cat. C	cat. D	mun. I	cat. básica
1	-	-	-	-	11	45943,84
2	190053,94	230214,41	541766,34	541766,34	12	104600,82
3	-	217120,81	417614,20	539141,38	13	101413,23
4	218121,28	281625,58	587314,63	587314,63	14	101607,48
5	59899,01	59899,01	134941,86	158091,43	15	155152,44
6	-	268452,47	388510,16	510033,32	16	75661,85
7	211800,44	211800,44	412181,10	522414,31	17	214058,03
8	351699,32	503027,05	591244,02	656078,92	18	46764,14
					19	118857,94
					20	112137,52
					21	221066,31
					22	146912,20

observação:

- Os espaços com hífen correspondem às categorias dos aeroportos já existentes.

6.2.6. Conjunto de abrangência Nik

De acordo com o PAESC, estabelece-se na aviação regional um sistema de polarização sucessiva, com suas extremidades nos aeródromos de área de influência mais restrita e, a nível nacional, nos principais pólos sócio-econômicos do país. Este encadeamento já ocorre de maneira espontânea, englobando tanto os aeroportos regionais de maior importância a nível de demanda atendida como aqueles menos relevantes, de onde fluem passageiros em aeronaves leves provenientes das comunidades próximas.

Segundo a definição do PAESC, a área de cobertura de um aeródromo “refere-se à função de apoio às operações e compreende o espaço que se beneficia da existência do aeródromo através do incremento à segurança do vôo”. A dimensão desta área depende de fatores técnicos, dentre os quais pode-se citar o alcance dos auxílios implantados, autonomia das aeronaves, etc..

Com base nos estudos de cobertura e polarização realizados pelo IAC, *Veloz* (1994) propôs o seguinte: “para as categorias A e B poder-se-ia assumir uma distância de cobertura máxima de 40 milhas (65 km) e para as categorias C e D uma distância de cobertura de aproximadamente 85 milhas (140 km).”

Seguindo esse critério, estabeleceu-se o conjunto Nik para cada elemento i , formado pelos aeroportos j que, ao operar na categoria k , teriam condições de cobrir o referido nó.

A *tabela 6.3* apresenta os elementos do conjunto Nik associado a cada localidade i .

TABELA 6.3

CONJUNTO DE ABRANGÊNCIA ASSOCIADO ÀS LOCALIDADES i

localidade i	conjunto Nik	
	categorias A e B	categorias C e D
11	5	5
12	7	3, 7
13	-	7
14	4, 2	4, 2, 6, 3
15	5	5
16	5	5, 6
17	2, 6	2, 6, 1, 4
18	1	1, 6
19	2	2, 3, 4, 6
20	8	8, 1, 2
21	-	1
22	3, 4	3, 4, 7

6.3. Aplicação do modelo

6.3.1. Algoritmo utilizado

Após a obtenção dos dados de entrada, passou-se à aplicação do modelo proposto, seguindo o algoritmo descrito a seguir:

PASSO 1: atualização das projeções de demanda associadas ao ano inicial t_0 , bem como dos aeroportos já decididos e executados;

PASSO 2: utilização do programa PRAZOS para determinação do tempo t para revisão do sistema;

PASSO 3: comparação da data $t_0 + t$ com a data de revisão t_{PAESC} prevista pelo PAESC. Se $t_0 + t < t_{PAESC}$, $t = t_0 + t$. Senão, $t = t_{PAESC}$;

PASSO 4: utilização do programa PROGRAMACAO_FRACIONAL_01 para aplicação do modelo proposto de localização de facilidades, com os dados de entrada atualizados para o ano t ;

PASSO 5: obtenção dos resultados. Verificar se já se completou um período de estudo de 20 anos, a partir do primeiro ano considerado. Em caso afirmativo, chegou-se ao final do planejamento. Senão, fazer $t = t_0$ e voltar ao PASSO 1.

6.3.2. Restrições adicionais inseridas no modelo

Para utilização do programa PROGRAMACAO_FRACIONAL_01, houve a necessidade de se adicionar algumas restrições, além das já previstas na modelagem do problema de Programação Fracional:

1. Descartou-se a possibilidade de um aeroporto já instalado j passar a ter, de um horizonte de planejamento para o outro, uma categoria hierarquicamente inferior. Para isso, adicionou-se restrições que obrigam tal facilidade a manter uma categoria igual ou superior à já existente.
2. Atribuiu-se custo infinito à categoria de um aeroporto j já pertencente à rede aeroviária. Utilizou-se este artifício no intuito de diminuir a relação $\frac{\text{demanda}}{\text{custo}}$, incentivando assim a expansão do sistema aeroportuário com a instalação de outros aeroportos na rede, ou com a expansão do próprio aeroporto j . A adoção deste critério foi necessária pois percebeu-se que, com a utilização da Programação Fracional, há uma tendência muito forte de o sistema não se expandir, na tentativa de diminuir os custos de investimento.
3. A expansão do sistema aeroportuário regional está restrita a um limite superior de recurso, correspondente ao máximo valor que o Estado dispõe-se a investir. Assim, adicionou-se uma restrição que limita o recurso investido a uma determinada quantia, a ser definida pelo planejador do sistema.

6.4. Resultados obtidos

Planejou-se a expansão do sistema aeroportuário do estado até o ano 2017, dado que o estudo foi iniciado no ano $t_0 = 1997$.

Adotando arbitrariamente um limite superior de investimento de US\$1000000,00 ao longo dos 20 (vinte) anos de planejamento, obteve-se o seguinte resultado:

ANO $t_0 = 1997$

- Prazo para revisão do sistema

CASO DETERMINÍSTICO: 19 anos e 3 meses

CASO PROBABILÍSTICO: 10 anos

- Data definida para revisão do sistema

ano 2002 (prazo estipulado pelo PAESC)

ANO $t_0 = 2002$

- Municípios com aeroportos instalados

(limite superior de investimento = US\$1000000,00)

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA	COBERTO POR
1	Blumenau	D	-
3	Chapecó	A	-
5	Criciúma	C	-
6	Lages	A	-
16	São Joaquim	BÁSICA	5C
18	Lontras / R. Do Sul	BÁSICA	1D
20	Mafra	BÁSICA	1D

Valor total investido: US\$415449,21

- Prazo para revisão do sistema

CASO DETERMINÍSTICO: 20 anos e 6 meses

CASO PROBABILÍSTICO: 10 anos

- Data definida para revisão do sistema

ano 2007 (prazo estipulado pelo PAESC)

ANO t_0 = 2007

- Municípios com aeroportos instalados

(limite superior de investimento = US\$584550,79)

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA	COBERTO POR
1	Blumenau	D	-
3	Chapecó	A	-
5	Criciúma	D	-
6	Lages	A	-
15	Laguna	BÁSICA	5D
16	São Joaquim	BÁSICA	5D
18	Lontras / R. Do Sul	BÁSICA	1D
20	Mafra	BÁSICA	1D
22	Xanxerê	BÁSICA	3A

Valor total investido: US\$325214,21

- Prazo para revisão do sistema

CASO DETERMINÍSTICO: 15 anos e 8 meses

CASO PROBABILÍSTICO: 10 anos

- Data definida para revisão do sistema

ano 2017 (prazo estipulado pelo PAESC)

ANO t_0 = 2017

- Municípios com aeroportos instalados

(limite superior de investimento = US\$259336,58)

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA	COBERTO POR
1	Blumenau	D	-
3	Chapecó	A	-
5	Criciúma	D	-
6	Lages	A	-
15	Laguna	BÁSICA	5D
16	São Joaquim	BÁSICA	5D
18	Lontras / R. Do Sul	BÁSICA	1D
20	Mafra	BÁSICA	1D
22	Xanxerê	BÁSICA	3A

Valor total investido: zero.

6.5. Simulação dos níveis de demanda

6.5.1. Introdução

Como já descrito no capítulo 3, a demanda por transporte aéreo num certo instante de tempo t pode ser calculada com base na população e na receita de serviços, projetadas a partir de um modelo probabilístico. Nele, considera-se não apenas o valor médio da variável, mas também a variação aleatória em torno deste.

No presente item, pretende-se utilizar a técnica de *simulação* para gerar os valores associados às variáveis explicativas, utilizando-os posteriormente no cálculo da demanda, efetuado com base na fórmula proposta pelo PAESC.

6.5.2. Geração dos valores associados às variáveis explicativas

Admitindo que os níveis associados à população e à receita de serviços têm distribuição normal em torno da média, simulou-se valores para essas variáveis, utilizando o método de *Monte Carlo*.

A transformação dos números aleatórios em variáveis aleatórias normais normalizadas foi efetuada utilizando-se as fórmulas sugeridas por *Banks e Carson* (1984), apresentadas a seguir:

$$z_1 = (-2 \ln R_1)^{1/2} \times \cos(2\pi R_2)$$

$$z_2 = (-2 \ln R_1)^{1/2} \times \sin(2\pi R_2)$$

onde

R_1 e R_2 = números aleatórios uniformemente distribuídos independentes entre 0 e 1;

z_1 e z_2 = variáveis aleatórias normais normalizadas independentes.

Para cada ano t considerado no estudo, foram feitas 64 simulações, observando-se um limite de tolerância estatística de forma a garantir, com probabilidade de 99 %, que 90 % dos valores gerados estejam dentro do intervalo limitado pelo desvio padrão associado à variável. Chegou-se a esse número através da seguinte fórmula, proposta por *Bowker e Lieberman* (1959):

$$n = \left(\frac{2 - \alpha}{\alpha} \right) \left(\frac{\chi_{1-\gamma;4}^2}{4} \right) + \frac{1}{2}$$

onde

α = erro admitido;

$\chi_{1-\gamma;4}^2$ = ponto de percentagem 100 (1- γ) da distribuição qui-quadrada com quatro graus de liberdade.

No intuito de evitar uma dispersão muito grande em torno da média, que tenderia a se acentuar ao longo dos anos considerados no estudo, utilizou-se a técnica de *redução de variância* desenvolvida por Hillier e Lieberman (1967). Esta consiste na utilização dos números aleatórios decimais e dos seus complementares para gerar observações, promovendo assim uma estimativa mais próxima da média, sem comprometer a aleatoriedade dos valores obtidos.

6.5.3. Geração da demanda a partir das variáveis simuladas

A seguir, encontram-se listados os níveis de demanda obtidos a partir da simulação das variáveis explicativas, para cada horizonte de planeamento considerado no estudo de caso.

Observa-se que a maior parte dos valores encontrados está relativamente próxima do valor médio, utilizado na aplicação do modelo proposto, cujos resultados foram apresentados no item 6.4.

TABELA 6.4
(Ano base: 2002)

DEMANDA SIMULADA × DEMANDA MÉDIA

MUNICÍPIO	NOME	DEM. SIMULADA (passageiros)	DEM. MÉDIA (passageiros)
1	Blumenau	17084	16387
2	Caçador	1121	980
3	Chapecó	7346	7048
4	Concórdia	3298	3477
5	Criciúma	9399	8481
6	Lages	2891	2681
7	São Miguel D'Oeste	1117	1073
8	Três Barras	5910	5579
11	Araranguá	5186	4937
12	Dionízio Cerqueira	127	130
13	Imbituba	1227	1190
14	Joaçaba	1280	1250
15	Laguna	2317	2646
16	São Joaquim	280	289
17	Curitibanos	1036	1006
18	Lontras / Rio do Sul	1857	1860
19	Videira	772	725
20	Mafra	1097	1074
21	São Francisco do Sul	5901	5633
22	Xanxerê	2747	2658

TABELA 6.5

(Ano base: 2007)

DEMANDA SIMULADA × DEMANDA MÉDIA

MUNICÍPIO	NOME	DEM. SIMULADA (passageiros)	DEM. MÉDIA (passageiros)
1	Blumenau	24144	21737
2	Caçador	1322	1085
3	Chapecó	11184	9502
4	Concórdia	4063	4878
5	Criciúma	12986	11102
6	Lages	3132	2816
7	São Miguel D'Oeste	1321	1292
8	Três Barras	12320	11471
11	Araranguá	7678	6795
12	Dionízio Cerqueira	113	129
13	Imbituba	1369	1319
14	Joaçaba	1439	1404
15	Laguna	3054	3319
16	São Joaquim	268	278
17	Curitibanos	1115	1126
18	Lontras / Rio do Sul	2092	2156
19	Videira	776	737
20	Mafra	1218	1190
21	São Francisco do Sul	9487	9200
22	Xanxerê	3819	3524

TABELA 6.6
(Ano base: 2017)

DEMANDA SIMULADA × DEMANDA MÉDIA

MUNICÍPIO	NOME	DEM. SIMULADA (passageiros)	DEM. MÉDIA (passageiros)
1	Blumenau	62327	40465
2	Caçador	1793	1244
3	Chapecó	22257	19291
4	Concórdia	6489	8866
5	Criciúma	24903	21040
6	Lages	3534	2929
7	São Miguel D'Oeste	1663	1706
8	Três Barras	40732	51151
11	Araranguá	16850	14948
12	Dionizio Cerqueira	112	113
13	Imbituba	1736	1670
14	Joaçaba	1878	1800
15	Laguna	5298	5762
16	São Joaquim	235	235
17	Curitibanos	1301	1346
18	Lontras / Rio do Sul	2738	2818
19	Videira	843	801
20	Mafra	884	1455
21	São Francisco do Sul	24929	24256
22	Xanxerê	7377	6776

Tendo como base a demanda simulada, aplicou-se novamente o modelo proposto para localização de aeroportos. Os resultados obtidos são iguais aos já apresentados no item 6.4.

6.6. Estudo da Demanda Crítica

6.6.1. Aspectos gerais

Como já definido anteriormente, a Demanda Crítica refere-se àquela que justifica a instalação ou expansão de um aeroporto de categoria k. Na aplicação da metodologia aqui proposta para localização de facilidades, utilizou-se para definição da Demanda Crítica associada a cada categoria de aeroportos a correlação proposta

por *Horonjeff e Mckelvey* (1983) entre demanda hora-pico e demanda média anual atendida.

No entanto, com a utilização destes valores para cálculo dos prazos de revisão do sistema aeroportuário, obteve-se períodos muito grandes, o que gerou uma certa desconfiança quanto à sua consistência.

Assim, optou-se por fazer uma análise de como varia a configuração do sistema em cada horizonte de planejamento estudado e o recurso necessário para instalação do mesmo, em função do valor considerado da Demanda Crítica.

6.6.2. Aplicação da metodologia proposta para localização de aeroportos no estado com variação dos valores definidos para a Demanda Crítica

Para possibilitar a análise da variação do custo de implantação do sistema aeroportuário em função do valor definido para a Demanda Crítica, estipulou-se diferentes valores para esta variável, repetindo o estudo de caso para cada valor considerado.

Considerou-se os seguintes valores:

Demanda Crítica inicial (utilizada no estudo de caso descrito no item 6.3)

DEMANDA CRÍTICA	CATEGORIA DO AEROPORTO
50000 passageiros	A
80000 passageiros	B
120000 passageiros	C
160000 passageiros	D

Demanda Crítica = 1/5 da Demanda Crítica inicial

DEMANDA CRÍTICA	CATEGORIA DO AEROPORTO
10000 passageiros	A
16000 passageiros	B
24000 passageiros	C
32000 passageiros	D

Demanda Crítica = 1/8 da Demanda Crítica inicial

DEMANDA CRÍTICA	CATEGORIA DO AEROPORTO
6250 passageiros	A
10000 passageiros	B
15000 passageiros	C
20000 passageiros	D

Demanda Crítica = 1/10 da Demanda Crítica inicial

DEMANDA CRÍTICA	CATEGORIA DO AEROPORTO
5000 passageiros	A
8000 passageiros	B
12000 passageiros	C
16000 passageiros	D

Demanda Crítica = 1/15 da Demanda Crítica inicial

DEMANDA CRÍTICA	CATEGORIA DO AEROPORTO
3333 passageiros	A
5333 passageiros	B
8000 passageiros	C
10667 passageiros	D

Com a realização do estudo de caso para cada valor acima listado, pôde-se chegar à seguinte conclusão: ao final dos 20 (vinte) anos considerados no planejamento aeroportuário, a configuração do sistema é igual para todos os casos analisados. No entanto, à medida que a Demanda Crítica diminui, antecipa-se a realização dos investimentos necessários para implantação do sistema, já que o período entre revisões do mesmo diminui. Dessa forma, aumenta o valor presente do custo de instalação dos aeroportos.

A *tabela 6.7* apresenta os valores encontrados referentes ao custo de implantação do sistema (valor presente) em função da Demanda Crítica definida, considerando-se uma taxa de juro anual de 12 %.

Tabela 6.7
(ano base: 1997)

**VARIAÇÃO DO CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA
DEMANDA CRÍTICA CONSIDERADA**

DEMANDA CRÍTICA	ANO DE CONCLUSÃO DA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA (US\$)
inicial	2007	340447,31
1/5 da inicial	2006	353012,54
1/8 da inicial	2003	400500,68
1/10 da inicial	2002	448560,76
1/15 da inicial	1999	630195,57

6.6.3. Escolha da Demanda Crítica ideal

Se por um lado a diminuição da Demanda Crítica aumenta o custo de implantação do sistema aeroportuário, há também um acréscimo do número de pessoas beneficiadas pelo mesmo num menor período de tempo.

Assim, constatou-se a necessidade de definir a Demanda Crítica que, quando utilizada no planejamento do sistema, gere o menor “custo social” para sua implantação.

Entende-se por **custo social para implantação do sistema** a soma das parcelas referentes ao custo de instalação dos aeroportos e ao custo dos potenciais usuários que não são atendidos pelo mesmo, ou seja:

$$CS = C_{instal} + C_{não\ atendimento}$$

onde:

CS = Custo Social para implantação do sistema aeroportuário;

C_{instal} = custo de instalação dos aeroportos;

$C_{não\ atendimento}$ = custo do não atendimento a potenciais usuários do sistema.

A segunda parcela do cálculo do custo social refere-se ao valor que uma pessoa que necessita utilizar o sistema aeroportuário regional gasta “a mais” por não ter acesso a ele. Definiu-se portanto o trajeto médio percorrido pelos usuários do transporte aéreo regional a partir de dados históricos encontrados no PAESC, que

corresponde à rota *Porto Alegre - Chapecó*. Após definida a rota padrão dos usuários do sistema, calculou-se a diferença de custo entre percorrê-la por transporte aéreo e por transporte rodoviário (seu principal concorrente).

A diferença entre o percurso da rota padrão pelos dois meios de transporte foi calculada da seguinte forma:

$$CTR - CTA = C_{\text{horário}} \times (TTR - TTA) - (CPA - CR)$$

onde:

CTR = custo para se percorrer a rota padrão por rodovia;

CTA = custo para se percorrer a rota padrão por via aérea;

$C_{\text{horário}}$ = custo por hora de um executivo (valor estimado igual a R\$45,45);

TTR = tempo gasto para se percorrer a rota padrão por rodovia (valor extraído do PAESC = 7,97 horas);

TTA = tempo gasto para se percorrer a rota padrão por via aérea (valor extraído do PAESC = 1,5 horas);

CPA = custo da passagem aérea para se percorrer a rota padrão (valor obtido através da Companhia Aérea RIO-SUL = R\$203,34);

CR = custo para se percorrer a rota padrão por rodovia (igual à distância de 430 km multiplicado pelo custo/km estimado de R\$0,11).

Através da fórmula acima apresentada, chegou-se a um custo igual a R\$138,02. Esse valor, multiplicado pelo número de pessoas que deixarão de ser atendidas pelo sistema, resultará na segunda parcela do custo social.

O cálculo do custo social para implantação do sistema corresponde ao somatório do custo social referente a cada ano do período de planejamento (1997 - 2017).

Os valores encontrados encontram-se na *tabela 6.8*.

TABELA 6.8
(ano base: 1997)

***CUSTO SOCIAL DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA AEROPORTUÁRIO
REGIONAL EM FUNÇÃO DA DEMANDA CRÍTICA CONSIDERADA***

DEMANDA CRÍTICA	CUSTO SOCIAL (valor presente em R\$)
inicial	58143086,17
1/5 da inicial	57839281,24
1/8 da inicial	57219699,17
1/10 da inicial	56058251,83
1/15 da inicial	58485049,76
tendendo a zero	60350972,96

Através dos valores apresentados na *tabela 6.8*, chega-se à conclusão de que a Demanda Crítica ideal, segundo o critério de geração do menor custo social ao longo dos 20 anos de planejamento, é a correspondente a 1/10 da Demanda Crítica inicial.

Cabe ressaltar que o objetivo deste item restringe-se em propor uma metodologia para cálculo da Demanda Crítica ideal, não tendo como finalidade apresentar resultados precisos. Na prática, haveria a necessidade de buscar valores mais consistentes dos parâmetros envolvidos neste cálculo.

7. Análise comparativa dos resultados

7.1. Introdução

Nesta análise, pretende-se comparar o resultado (total de passageiros cobertos, recursos necessários e número de aeroportos) obtido no presente estudo às soluções propostas no Plano Aeroviário de Santa Catarina e no trabalho de *Veloz* (1994).

7.2. Rede proposta pelo PAESC

A *tabela 7.1* apresenta as localidades selecionadas para fazerem parte do sistema aeroportuário proposto no PAESC. Tal sistema, se implementado totalmente até o ano 2017, beneficiaria a 159567 passageiros com a implantação de quinze aeroportos, necessitando-se de um recurso total igual a US\$ 4331543,03.

TABELA 7.1
(ano base: 2017)

AEROPORTOS PREVISTOS PELO "PAESC"

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA
1	Blumenau	D
2	Caçador	D
3	Chapecó	D
4	Concórdia	D
5	Criciúma	D
6	Lages	D
7	São Miguel D'Oeste	D
8	Três Barras	D
12	Dionízio Cerqueira	-
14	Joaçaba	-
15	Laguna	-
16	São Joaquim	-
17	Curitibanos	-
18	Lontras / Rio do Sul	-
19	Videira	-

7.3. Solução obtida por Veloz (1994)

Veloz (1994) executou em seu estudo seis rodadas do modelo por ele proposto. Em cada uma, a função objetivo de cobertura foi maximizada e a função de custo restrita a ser menor ou igual aos seguintes valores (em milhões de dólares): 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 4.5, 5.0.

As tabelas 7.2 e 7.3 apresentam os resultados obtidos, considerando-se os limites de investimento de US\$ 1000000,00 e US\$ 4500000,00, respectivamente.

TABELA 7.2
(ano base: 2017)

AEROPORTOS INSTALADOS - LIMITE DE INVESTIMENTO = US\$1000000,00

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA	COBERTO POR
1	Blumenau	D	-
3	Chapecó	C	-
5	Criciúma	D	-
6	Lages	A	-
14	Joaçaba	-	3C
15	Laguna	-	5D
18	Lontras / Rio do Sul	-	1D
21	S. Francisco do Sul	-	1D

- Número de passageiros atendidos pelo sistema: 118361.
- Custo do sistema (1994): US\$ 1093187,00.
- Custo do sistema (atualizado para jan/96): US\$1100296,00.

TABELA 7.3
(ano base: 2017)

AEROPORTOS INSTALADOS - LIMITE DE INVESTIMENTO = US\$4500000,00

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA	COBERTO POR
1	Blumenau	D	-
3	Chapecó	D	-
4	Concórdia	D	-
5	Criciúma	D	-
6	Lages	D	-
7	São Miguel D'Oeste	D	-
8	Três Barras	D	-
11	Araranguá	-	5D
12	Dionízio Cerqueira	-	3D
13	Imbituba	-	7D
14	Joaçaba	-	2D
15	Laguna	-	5D
16	São Joaquim	-	5D
17	Curitibanos	-	2D
18	Lontras / Rio do Sul	-	1D
19	Videira	-	2D
20	Mafra	-	1D
21	S. Francisco do Sul	-	1D
22	Xanxerê	-	3D

- Número de passageiros atendidos pelo sistema: 207428.
- Custo do sistema (1994): US\$ 4388710,00.
- Custo do sistema (atualizado para jan/96): US\$ 4417249,79.

7.4. Solução apresentada neste estudo

No presente estudo, o investimento máximo ao longo dos vinte anos de planejamento foi limitado ao valor de US\$1000000,00. Com base neste dado, obteve-se o resultado, já apresentado no item 5.4, que apresenta um total de 10 aeroportos pertencentes ao sistema proposto, beneficiando a 115719 passageiros a um custo de US\$740663,42. A tabela 7.4 apresenta a configuração do sistema proposto ao final dos 20 anos de planejamento.

TABELA 7.4
(ano base: 2017)

AEROPORTOS A SEREM INSTALADOS

MUNICÍPIO	NOME	CATEGORIA	COBERTO POR
1	Blumenau	D	-
3	Chapecó	A	-
5	Criciúma	D	-
6	Lages	A	-
11	Araranguá	-	5D
15	Laguna	-	5D
16	São Joaquim	-	5D
18	Lontras / Rio do Sul	-	1D
20	Mafra	-	1D
22	Xanxerê	-	3A

7.5. Comparação das soluções propostas

Na comparação das três soluções apresentadas anteriormente, dois aspectos podem ser salientados: a questão dos horizontes de planejamento e a relação entre demanda atendida e custo do sistema.

7.5.1. Horizontes de planejamento previstos pelo PAESC

Como já citado anteriormente, o PAESC determina três horizontes de planejamento, correspondentes ao planejamento de curto, médio e longo prazos (5, 10 e 20 anos, respectivamente).

No entanto, tanto a solução proposta por tal plano como a proposta por *Veloz* (1994) não definem os prazos para instalação dos aeroportos, ou seja, não indicam os aeroportos que devem ser implantados em cada horizonte previsto.

Este estudo indica os aeroportos que devem ser instalados em cada horizonte de planejamento, além de sugerir uma metodologia, descrita no capítulo 5, para o cálculo dos prazos ótimos de revisão do sistema.

7.5.2. Relação entre demanda atendida e custo do sistema

Tanto o PAESC como *Veloz* (1994) ressaltam a importância de se maximizar o número de pessoas atendidas pelo sistema a um custo mínimo. Tal objetivo é também pretendido neste estudo.

Assim, considera-se importante comparar a relação, apresentada na *tabela 7.5*, entre a demanda atendida e o custo do sistema das três soluções propostas.

É importante observar que, como foram utilizados diferentes limites superiores de investimento na obtenção das soluções apresentadas, não se pode simplesmente medir a eficiência de cada sistema proposto através do número de pessoas por ele atendidas. Se fosse utilizado este critério, a solução restrita a um limite maior seria a mais “eficiente”. No entanto, não é necessariamente a que obtém o maior aproveitamento por unidade monetária investida. Por isso, optou-se por fazer a comparação das três soluções através da relação $\frac{\text{Benefício}}{\text{Custo}}$.

TABELA 7.5
(ano base: 2017)

RELAÇÕES ENTRE DEMANDA ATENDIDA E CUSTO DO SISTEMA

	RELAÇÃO - em Pass/US\$
Solução proposta pelo PAESC	0,037
Solução 1 proposta por Veloz	0,108
Solução 2 proposta por Veloz	0,047
Solução proposta neste estudo	0,156

Como pode ser visto, a solução proposta neste estudo é a que gera maior benefício por recurso investido.

8. Conclusões e Recomendações

8.1. Conclusões

Acredita-se que o objetivo de desenvolver uma metodologia para o planejamento aeroportuário em estágios, de forma a garantir que o sistema proposto gere o máximo benefício por recurso investido, tenha sido atingido.

Na definição dos prazos ótimos para revisão do sistema, dois aspectos devem ser salientados:

- a importância de se considerar a aleatoriedade em torno dos valores da demanda, como forma de obter prazos mais seguros para revisão do sistema, diminuindo assim o risco de que a rede proposta não acompanhe o crescimento da demanda na região;
- a necessidade de se buscar valores para a Demanda Crítica que, quando utilizados na determinação dos prazos para revisão do sistema, gerem o menor custo possível para a sociedade, englobando aqui os custos de instalação dos aeroportos, bem como o custo dos indivíduos que não terão acesso à rede. Valores de Demanda Crítica inadequados podem comprometer a eficiência da metodologia proposta.

Cabe ressaltar que a configuração da rede aeroviária ao longo dos vinte anos considerados no estudo depende em grande parte dos recursos disponíveis em cada etapa do planejamento. Assim, cabe aos administradores do Estado definir o limite de recursos disponíveis, lembrando que tal valor terá grande influência nos resultados obtidos, e não o oposto, como ocorre na rede sugerida pelo PAESC.

8.2. Recomendações

Através do estudo de caso realizado, percebeu-se que a utilização da técnica de Programação Fracional para localização dos aeroportos da rede pode limitar a expansão do sistema, na busca de um valor máximo para a relação $\frac{\text{Benefício}}{\text{Custo}}$. Assim, corre-se o risco de atender a uma demanda muito baixa, no intuito de reduzir o investimento necessário para implantação da rede proposta. Por isso, deve ser estudada a possibilidade de se adicionar uma restrição ao problema, que limite a demanda atendida em cada horizonte a um valor mínimo, a ser definido pelo planejador do sistema de acordo com as necessidades da região.

Numa situação real, pode ser considerada a possibilidade de aeroportos principais (“Hubs”) cobrirem aeroportos locais, desde que estejam a uma distância de cobertura menor ou igual àquela já definida anteriormente.

Considera-se interessante fazer uma análise de como variam os resultados (configuração da rede proposta, prazos para revisão do sistema e custo de implantação do mesmo) à medida que variam os parâmetros relacionados às variáveis explicativas do crescimento da demanda. Em outras palavras, seria interessante se fazer um estudo semelhante ao já realizado com relação à Demanda Crítica, agora para os parâmetros *taxa de crescimento anual e desvio padrão* das variáveis População e Receita de Serviço. Assim, ter-se-ia condições de verificar a influência de tais parâmetros nos resultados obtidos, e assim determinar o grau de precisão necessário na fase de coleta de dados para a projeção da demanda.

A metodologia proposta no presente estudo poderia ser ampliada para a definição das rotas de atendimento às populações cobertas. Poderiam ser considerados vários “Hubs” (em vez de somente um como é feito atualmente), bem como possíveis ligações entre os nós de serviço, na tentativa de otimizar o transporte aéreo regional de acordo com critérios pré-estabelecidos. Pode-se inclusive estudar a possibilidade de gerar uma rede multimodal, buscando encontrar o modo de transporte mais eficiente para cada rota.

9. Referências bibliográficas

- BANKS, J. and CARSON, J. S., *Discrete - Event System Simulation*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- BITRAN, G. and NOVAES, A. G., *Linear Programming with a Fractional Objective Function*, *Operations Research*, vol. 21, número 1, janeiro - fevereiro, 1973.
- BOWKER, A. H. and LIEBERMAN, G. J., *Engineering Statistics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1959.
- CHARNES and COOPER, *Programming with Linear Fractional Functionals*, *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 9, setembro - dezembro, 1962.
- Conjuntura Econômica, *Taxas de Juros Internacionais*, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro - R.J., março, 1996.
- ELETROSUL - Centrais Elétricas do Sul do Brasil - S.A. (1993 e 1994), *Estimativa da População dos Municípios Catarinenses*, Florianópolis - S.C..
- GALVÃO, R. D., *Modelos e Algoritmos para Problemas de Localização em Redes*, *Revista Pesquisa Operacional*, vol. 1, número 1, outubro, 1981.
- HILLIER, F. S. and LIEBERMAN, G. J., *Operations Research*, Holden-Day, Inc., San Francisco, California, 1967.
- HORONJEFF, R., *Planning and Design of Airports*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1962.
- HORONJEFF and McKELVEY, *Planning and Design of Airports*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1983.

- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1940, 1950, 1960, 1970, 1980 e 1991), *Censo Demográfico de Santa Catarina*, Rio de Janeiro - R.J..
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1970, 1975 e 1980), *Censo dos Serviços de Santa Catarina*, Rio de Janeiro - R.J..
- Ministério da Aeronáutica, *Plano Aeroviário do Estado de Santa Catarina - PAESC*, IAC, Rio de Janeiro - R.J., 1989.
- MOORE, G. and REVELLE, C., *The hierarchical service location problem*, Management Science, 28, 775-780, 1982.
- NAYLOR, T. H., BALINTFY, J. L., BUDICK, D. S. e CHU, K., *Técnicas de Simulação em Computadores*, Editora Vozes Ltda., Rio de Janeiro - R.J., 1971.
- NEUFVILLE, R., *Airport Systems Planning*, The Macmillian Press Ltd., London, 1976.
- NOVAES, A. G., *Métodos de Otimização - aplicações aos transportes*, Editora Edgard Blücher, São Paulo - S.P., 1978.
- SYSLO, M., DEO, N. and KOWALIK, J.S., *Discrete Optimization Algorithms with Pascal Program*, Prentice-Hall, Inc., USA, 1982.
- SOUZA e NOVAES, *Expansão de Sistemas de Transportes com Demanda Estocástica*, Anais do Congresso Técnico-Científico de Engenharia Civil, vol. 6, abril, 1996.
- TORGAS, C., *Location under maximum travel time constraints*, Ph.D. diss., Cornell University, Ithaca, New York, 1971.
- VELOZ, D. E., *Planejamento de Sistemas Aeroviários: uma visão metodológica*, Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro - R.J., 1994.