**Universidade Federal da Paraíba - UFPB**

**Centro de Ciência Exatas e da Natureza - CCEN**

**Departamento de Informática - DI**

**Problema de Construção de Trilhos de Aeronaves (PCTA)**

**Alexander de Almeida Pinto**

**2010**

**1 - INTRODUÇÃO**

A indústria aeronáutica tem sido uma rica fonte de problemas no que diz respeito à pesquisa operacional, sendo confrontados diariamente com problemas de alto grau de complexidade e que possuem uma natureza combinatória explosiva. Por causa da dificuldade que é inerente a essa classe de problemas a qualidade das soluções obtidas manualmente são muito aquém da melhor solução possível.

Nos dias de hoje, no entanto, com o avanço da tecnologia e o aumento da competitividade desenvolver soluções com melhor qualidade acaba se tornando um fator decisivo para a permanência no mercado, tornando-se então necessário a obtenção de soluções de forma mais rápida, mais barata e utilizando menos recursos. Outra característica que reforça a necessidade da obtenção de melhores soluções é o aumento do tamanho e da complexidade das instâncias trabalhadas. A partir desse cenário pode-se perceber a necessidade de utilização de técnicas de otimização, na literatura tem se observado um crescimento no número de trabalhos que se utilizam de metaheurísticas como método de resolução.

As metaheurísticas podem ser definidas como um conjunto de procedimentos de caráter geral, com capacidade de guiar o procedimento de busca, tornando-o capaz de escapar de ótimos locais. Elas têm como objetivo, encontrar uma solução tão próxima quanto possível da solução ótima do problema com baixo esforço computacional.

Em geral, as metaheurísticas são bastante utilizadas na resolução de problemas de otimização. Esses problemas, também conhecidos como problemas NP-difíceis, podem ser definidos como um conjunto de problemas para os quais ainda não existe um algoritmo que os resolvam de forma exata e em tempo polinomial [12 de Maritan].

Para esses tipos de problemas o uso de métodos exatos é bastante restrito, uma vez que o esforço computacional para encontrar uma solução exata em instâncias reais é consideravelmente alto. No entanto, na prática, é suficiente encontrar uma solução próxima do ótimo global.

Recentemente... os trabalhos tem se baseado na solução por ...

Os principais problemas relacionados dizem respeito ao planejamento envolvendo a criação de linhas de trabalho tanto para as aeronaves quanto para a tripulação. O objetivo costuma ser a minimização dos custos operacionais ou a maximização dos rendimentos. Custos operacionais consiste nos custos envolvidos com combustíveis, óleo, taxas de aterrissagem e a perda de rendimentos com a utilização de aeronaves com menos assentos do que a demanda de passageiros, porém fatores como bem estar dos passageiros também podem ser levados em consideração.

Os problemas de planejamento que envolvem as aeronaves mais estudados na literatura são o Fleet Assigment e o Aircraft Rotation. E os que envolvem a tripulação são conhecidos como Crew Pairing e o Crew Scheduling.

O problema Fleet Assigment trata da alocação da frota, ou seja, é determinado o tipo de equipamento a ser utilizado em cada voo [Pimentel, 2005]. O problema Aircraft Rotation será descrito mais adiante. O problema Crew Pairing visa obter o melhor conjunto de pairings[[1]](#footnote-1) tal que cada voo seja coberto por pelo menos um pairing. Gastos com alojamentos, alimentação, transporte em terra e deadheads[[2]](#footnote-2) devem ser levados em consideração. O problema Crew Scheduling tem o objetivo de atribuir os pairings a tripulação disponível na companhia aérea, acrescentando as atividades de solo tais como call[[3]](#footnote-3), Stand-by duties[[4]](#footnote-4) e dias de descanso. O objetivo dessa etapa é fazer uma distribuição da forma mais justa possível, tentando balancear a quantidade de trabalho (horas a serem voadas) entre os tripulantes, e também tentar cumprir todas as solicitações da tripulação em relação a preferência dos dias de descanso e das tarefas a serem realizadas.

Após as designação da frota de aeronaves ao conjunto de voos existentes segue-se o problema de construção de trilhos de aeronaves (PCTA) que também é conhecido na literatura como Aircraft Rotation Problem (ARP). O PCTA é um dos principais problemas presentes na industria da aviação. No PCTA o objetivo é a construção, para cada uma das frotas da companhia (e para os voos a elas alocados), de sequências encadeadas de vôos que possam ser operados por uma única aeronave[Ref Livro]. Cada uma dessas sequências recebe o nome de trilho.

O sequênciamento dos voos pode ocorrer de 4 formas distintas aqui denominado de arcos. Os arcos do tipo 1 permitem a ligação de voos sem a utilização de atrasos e/ou reposicionamentos. Os arcos do tipo 2 utilizam atrasos mas não o reposicionamento. Os arcos do tipo 3 permitem o sequenciamento com a utilização de um voo de reposicionamento mas sem inserir atraso em nenhum dos voos envolvidos. Os arcos do tipo 4 utilizam-se de atrasos e de um voo de reposicionamento para fazer a ligação entre dois voos.

Para resolver o PCTA, devemos estar cientes de algumas restrições que envolvem tempo e espaço. Por exemplo, um avião não pode partir antes da chegada do vôo que lhe antecede, nem de um local diferente da cidade de destino deste mesmo vôo. Há também a restrição de que um vôo deve permanecer em solo, entre conexões, por pelo menos um período de tempo que seja suficiente para fazer a troca de passageiros e abastecimento da aeronave, esse tempo varia de acordo com o aeroporto. O PCTA sofre um grande quantidade de restrições sendo as mais importantes as temporais.

Vale ressaltar que na resolução do PCTA deve-se levar em consideração as particularidades especificas de cada companhia aérea como o número de aviões disponíveis na frota, o atraso máximo permitido nos voos bem como a quantidade máxima de voos que podem sofrer esse atraso, também pode ser especificado o número máximo de voos que podem ser cancelados, o número máximo de voos de reposicionamento que podem ser criados entre outros.

Outro aspecto importante diz respeito às restrições de manutenção. Sabe-se que um avião deve ter checagens periódicas. Oportunidades de realizar essas tarefas ocorrem apenas em algumas conexões potencialmente disponíveis. Como conseqüência, uma sequência de vôos deve ser construída de forma que essas restrições não sejam violadas. A fim de incorporar essas restrições facilmente ao nosso framework, assumimos que as rotações são designadas a tipos não específicos de aeronave. Dessa forma, se uma aeronave tem necessidade de manutenção, um vôo especial é criado com origem e destino na base de manutenção escolhida. O tempo desse vôo é exatamente o tempo de manutenção [Pontes, 2003].

De uma maneira geral, o principal objetivo do PCTA é a minimização do número de trilhos seguido da minimização do custo total dos trilhos gerados. Esse custo pode envolver diversos componentes, sendo o tempo médio diário de utilização das aeronaves um dos mais importantes[Ref Livro].

Abaixo na figura 1 temos dois exemplos de montagem de trilhos feitas a partir de um conjunto fictícios de voos. Cada caixinha laranja e azul representa um voo, onde a parte laranja representa o tempo de solo que cada voo deve obedecer e a azul seria o tempo de voo da cidade de origem para a cidade de destino. As letras A, B, C, D, E representam as cidades e a linha pontilhada indica o tempo de inicio e de termino de cada voo.

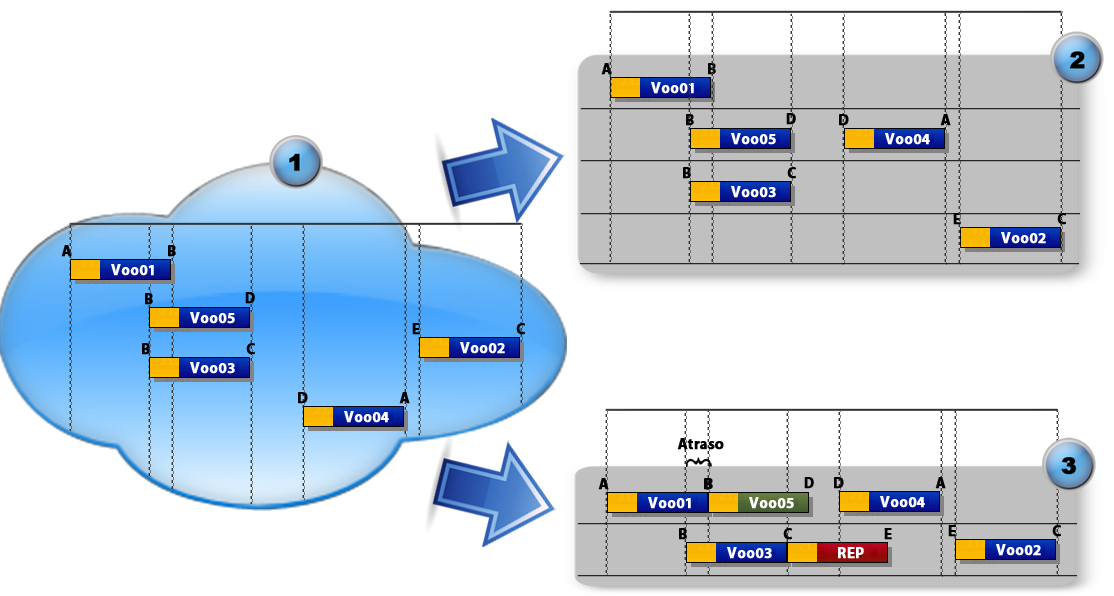


Figura 1 - Construção de trilhos de aeronaves

A parte 1 da figura representa os voos da companhia que ainda não foram cobertos por nenhuma aeronave e nas partes 2 e 3 são demonstrado duas formas de organizar esses voos em trilhos.

Na parte 2 temos a melhor forma de organizar os voos da parte 1 utilizando apenas os arcos do tipo 1, ou seja sem a utilização de atrasos ou de voos de repocisionamento. Dessa forma se consegue uma formação com 4 trilhos.

Na parte 3 temos a melhor forma de organizar os voos utilizando todos os arcos e um atraso máximo equivalente a um tempo de solo. Dessa forma se consegue uma formação com apenas 2 trilhos.

Pode-se verificar que a utilização de diferentes tipos de arcos pode proporcionar uma melhora significativa no número de trilhos. Porem essa abordagem faz com que o número de soluções possíveis se torne combinatoriamente muito superior a utilização de arcos apenas do tipo 1 que já gera uma quantidade de soluções bem elevada, por isso os arcos devem ser utilizados de forma controlada.

Nesse trabalho propomos o desenvolvimento de um método híbrido baseados em metaheurísticas e em programação para resolução do PCTA. O método proposto procura combinar a eficiência computacional das metaheurísticas com a rápida convergência dos métodos exatos. Além disso ficou constatado pelo levantamento da literatura acerca do PCTA que se tem uma falta de instâncias sobre o problema que permitam uma melhor comparação dos resultados obtidos, logo também propomos um conjunto de instância baseado em uma instância real da TAM, com vários tamanhos e complexidades.

Breve descrição de programação linear.

1.1 Objetivos do trabalho

Tendo em vista os aspectos apresentados, o objetivo principal dessa proposta de trabalho consiste no desenvolvimento de um método híbrido baseado em metaheurísticas e programação linear para a resolução do problema construção de trilhos de aeronaves (PCTA). O método proposto irá se basear em uma metaheurísticas, afim de explorar a eficiência computacional, e irá ser combinada com etapas de refinamentos composta por métodos exatos para acelerar a convergência e adicionalmente fugir de mínimos locais.

Além disso irá ser proposto um conjunto de instâncias baseados em uma instância real da TAM variando em complexidade e tamanho, essas instâncias irão permitir uma melhor comparação desse trabalho com outros.

1.2 Organização da proposta

A dissertação está estruturada da seguinte forma:

* Capítulo 1: Apresenta a motivação e as vantagens de resolver o PCTA utilizando metaheurísticas e programação linear e enfatiza a importância desse problema na indústria aeronáutica. Ao final os objetivos do trabalho são descritos.
* Capítulo 2: Apresenta a fundamentação sobre a otimização, metaheurísticas e programação linear. Na seção referente à otimização além da descrição serão discutidos algumas heurísticas construtivas e de refinamento. A seção referente às metaheurísticas irá iniciar com uma descrição seguida pela descrição das metaheurísticas utilizadas no trabalho, como o Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) e o Iterated Local Search (ILS). E a seção referente a programação linear vai descrever como o algoritmo simplex consegue resolver problemas modelados matematicamente. Ao final da fundamentação teórica será feita uma revisão dos principais trabalhos descritos na literatura relacionada ao presente trabalho.
* Capítulo 3: Mostra como foi obtida a malha da TAM e como foi gerado as instâncias que são utilizadas no trabalho.
* Capítulo 4: Descreve o método proposto nesse trabalho, os parâmetros, as restrições e a modelagem matemática utilizada.
* Capítulo 5: Apresenta alguns resultados preliminares que já foram obtidos com o método que é utilizado atualmente.
* Capítulo 6: Apresenta as referencias bibliográficas que deram suporte a confecção do presente trabalho.
* No final é apresentado o cronograma de trabalho proposto durante os 24 meses de mestrado.

1. **FUNDAMENTAÇÃO TEORICA**
   1. **Otimização Combinatória**
      1. **Heurísticas Construtívas**
      2. **Heurísticas de Refinamento**
         1. **Método da Descida/Subida**
         2. **Método da primeira melhora**
         3. **Método randômico de Descida/Subida**
         4. **Método randômico Não Ascendente/Descendente**
   2. **Metaheurísticas**
      1. **GRASP**
      2. **ILS**
   3. **Programação Linear**
   4. **Revisão da literatura**
2. **OBTENÇÃO E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS**
3. **MÉTODO PROPOSTO**

Após o fleet assignment e a escolha de que vôos farão parte da malha a ser operada pela aeronave em questão, o problema passa a melhor organização desses vôos. A forma de agrupá-los pode ter grande impacto no custo final da malha gerada, esse custo é proveniente de varios fatores, como a quantidade de aeronaves necessárias para cobrir todos os vôos, o tempo de atraso que foi imposto levando em consideração o planejamento inicial entre outros.

Para resolver esse problema, devemos estar cientes de algumas restrições que envolvem tempo e espaço. Por exemplo, uma aeronave não pode partir antes da chegada do voo que lhe antecede, nem de um local diferente da cidade de destino deste mesmo voo. Há também a restrição de que um voo deve permanecer em solo, entre conexões, por pelo menos um determinado período de tempo, que é definido pelas regras locais do aeroporto.

Outro aspecto importante diz respeito às restrições de manutenção. Sabe-se que um avião deve ter checagens periódicas. Oportunidades de realizar essas tarefas ocorrem apenas em algumas conexões potencialmente disponíveis. Como conseqüência, uma seqüência de vôos deve ser construída de forma que essas restrições não sejam violadas. A fim de incorporar essas restrições facilmente ao nosso framework, assumimos que os trilhos são designados a tipos não específicos de aeronaves. Dessa forma, se uma aeronave tem necessidade de manutenção, um vôo especial é criado com origem e destino na base de manutenção escolhida. O tempo desse vôo é exatamente o tempo de manutenção [Pontes, 2003].

A malha foi organizada de forma que cada aeronave deve operar uma seqüência válida de vôos, sendo esta chamada de trilho. Cada trilho deve ser otimizado de forma a reduzir o seu custo, que leva em considerações atrasos relativos ao planejamento original.

As restrições de conexão que envolvem tempo e espaço no ARP induzem a criação de uma rede de possíveis conexões. Nessa rede os nós representam os vôos e os arcos representam as conexões possíveis entre esses vôos. O problema pode então ser formulado como Problema de Minimização do Custo da Rede.

Dadas as possibilidades de mudanças no horário dos vôos, e também a permissão de criar vôos de reposicionamento, uma larga rede de vôos deve ser definida. As formas de ligações entre os vôos obedecem os 4 tipos de arcos seguintes:

* Arcos de conexão simples (Tipo 1) – Esses são os arcos que conectam vôos que obedecem as restrições de tempo e de espaço. Tais arcos são associados as conexões sem requerer nenhuma alteração no tempo de partida. Eles também não conectam vôos de reposicionamento. Esse tipo de arco não tem custo.
* Arcos de conexão simples com atraso (Tipo 2) – Embora os vôos nesses arcos obedeçam a restrição de espaço, o tempo disponível, que leva em consideração a diferença entre o tempo sugerido de partida para o próximo vôo, menos o tempo de solo, e o tempo esperado de chegada do vôo anterior, não é suficiente para permitir a conexão. Então, usar esse tipo de arco acarreta em atraso no tempo de partida de alguns vôos. Esse tipo de arco tem o custo igual a soma dos minutos de astrasos que foram aplicados.
* Arcos de reposicionamento (Tipo 3) – Esses arcos representam conexões entre dois vôos que chegam e partem de diferentes aeroportos, ou seja não obedecem a restrição geográfica. Entretanto, existe tempo suficiente para um vôo de reposicionamento entre as duas localidades acrescido do tempo de solo necessário. Arcos desse tipo tem o custo igual a duração do vôo de reposicionamento.
* Arcos de reposicionamento com atraso (Tipo 4) – Esses arcos representam conexões que vão precisar de reposicionamento mais alguma alteração no tempo de partida sugerido. Um arco desse tipo tem custo igual a duração do vôo de reposicionamento mais as mudanças no tempo sugerido de partida.

Devemos observar que o primeiro e o ultimo vôo de cada trilho não possuem arcos de conexão anterior e posterior respectivamente [Pontes, 2003].

Para a geração da malha, foi escolhida a metaheuristica GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), que é dividida em 2 etapas: Uma de construção, onde diversas malhas são geradas e a melhor é escolhida, e uma de refinamento, onde há uma tentativa de melhora na malha escolhida anteriormente, através de uma busca em sua vizinhança com a utilização do ILS (Iterated Local Search).

Falar sobre a aplicação da programação linear na malha obtida.

Foi desenvolvida uma interface que faz uma abstração da malha gerada para o usuário final além de facilitar a visualização do resultado, essa interface poderá ser vista na seção de resultados computacionais na Figura X.

* 1. **Método construtivo**

Nessa fase o computador é induzido a gerar uma malha de boa qualidade, iniciamos classificando os voos de acordo com seu horário de partida e seguimos construindo trilho por trilho, e então quando todos já foram selecionados os trilhos são agrupados afim de formar a malha. Os passos para essa construção são detalhados a seguir.

* + 1. **Formação de um trilho**
       1. **Inicializando um trilho**

Para inicializar um trilho iremos primeiro sortear o primeiro vôo através de uma lista dos N vôos que tenham menor horário de partida e que ainda não tenham sido alocados em nenhum outro trilho.

* + - 1. **Compondo e finalizando um trilho**

Após a escolha do primeiro vôo, ou de posse do vôo anterior, é feita uma escolha de um tipo de arco K , . Essa escolha é feita através de uma probabilidade associada a cada tipo de arco . O próximo vôo devera obedecer à regra do tipo de arco e ter horário de partida não tão distante do horário de chegada do vôo anterior. É gerado então um conjunto com todos os vôos candidatos. O conjunto será ordenado de acordo com um critério que é especifico de cada tipo de arco. Se for do tipo 1 é ordenado de acordo com o horário de partida do vôo candidato. Se for do tipo 2, 3 ou 4 é feita uma ordenação crescente de acordo com o custo associado aos vôos. De posse desse conjunto ordenado tomaremos os n primeiros vôos onde esse n é definido de acordo com as seguintes regras:

* Para Arcos do Tipo 1 tomaremos n como sendo os 15% primeiros vôos do conjunto.
* Para os demais arcos iremos escolher n de acordo com a quantidade de elementos nesse conjunto.

Caso esse conjunto gerado não apresente nenhum vôo candidato então será alterado o tipo de arco. Caso nenhum tipo de arco possua um conjunto com elementos, será definido este ultimo vôo como sendo o vôo final do trilho.

* + - 1. **Compondo a malha**

Serão gerados diferentes trilhos até que todos os vôos estejam presentes em um e apenas um trilho.

* 1. **Método de refinamento**

Após a seleção da melhor malha gerada na construção, iremos utilizar alguns algoritmos de busca na vizinhança, a fim de melhorar a solução inicialmente obtida. Os algoritmos utilizados foram: VNS e Busca local.

A busca local foi implementada visando obter melhores resultados a partir da vizinhança da malha original. Foram utilizadas métodos de busca na vizinhança, tais como Swap-1, Swap-2, Swap-3 e compactação. O Swap-n é feito pela tentativa de troca de n vôos com 1, com 2 até com n + 1 vôos. A troca é efetivada caso o custo associado a malha seja reduzido. A compactação é a tentativa de redução de um trilho da malha original, buscando inseri-lo em um trilho já existente.

O algoritmo VNS foi implementado de forma a perturbar a solução corrente, para então verificar através de uma busca local se há uma solução melhor que a original. Essa perturbação é feita com o uso de quatro Swaps-2.

* 1. **Modelo matématico**

Ainda está em fase de definição.

* 1. **Parâmetros utilizados**
  2. **Restrições consideradas**

1. **RESULTADOS PRELIMINARES**
2. **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS**

**Lucena A, Pontes R, Cabral L.** Aviação comercial controlada por máquinas inteligentes.(http://books.google.com.br/books?id=nggJZbxCw2QC&pg=PA5&dq=PCTA+trilhos&source=gbs\_selected\_pages&cad=3#v=onepage&q=PCTA%20trilhos&f=false) acessado em 13 de agosto de 2010.

**Pimentel, A. G.** (2005)Uma abordagem heurística para a solução de problemas de recobrimento de conjuntos de grande porte, com aplicação à alocação de tripulações para companhias aéreas. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

**Pontes, R., Lucena, A. e Cabral, L.** (2002) Exact and Heuristic Techniques for Solving the Aircraft

Rotation Problem. Relatório técnico do departamento de estatística da UFPB.

**Rezende, M.** (1998) “Greedy Randomized Adaptative Search Procedures (GRASP) “. Technical

Report, ATT Labs Research.

**Rubin, J.** (1973) “A Technique for the Solution of Massive Set Covering Problems with Application

to Airline Crew Scheduling”. Transportation Science.

**Clarke L, Johnson E, Nemhauser G, Zhu ZX,** (1997) “The Aircraft Rotation Problem”, Annals of

Operations Research 69: 33-46.

**Klabjan, D. Johnson, E. Nemhauser, G.** (1999)“ Solving Large Airline Crew Scheduling

Problems: Random Pairing Generation and Strong Branching” Technical Report, Georgia Institute of

Technology.

1. **CRONOGRAMA**

1. *Pairing* é o conjunto de voos que pode ser guiados por uma tripulação sem que seja violadas quaisquer regras da legislação vigente e que ao final do ultimo voo o tripulante esteja de volta a sua cidade base. [↑](#footnote-ref-1)
2. *Deadhead* é o voo que o tripulante viaja sem trabalhara com a finalidade de transporte para outra localidade normalmente para sua base ou para suprir uma nova demanda. [↑](#footnote-ref-2)
3. *Call* é o tempo que a tripulação tem para se apresentar a companhia aérea antes de iniciar de fato seu turno de trabalho. [↑](#footnote-ref-3)
4. *Stand-by duties* são turnos em que o tripulante fica a disposição da companhia aérea afim de suprir possíveis eventualidades. [↑](#footnote-ref-4)