

OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE SLOTS NO PROGRAMA DE OPÇÕES DE TRAJETÓRIAS COLABORATIVO ADAPTADO AO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

Natan Rodrigues

Leonardo Cruciol

Li Weigang

Universidade de Brasília

TransLab – Departamento de Ciência da Computação

RESUMO

O Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (CTOP), possibilita à cada companhia aérea compartilhar suas opções de rota de voo com o centro de controle de tráfego aéreo e, assim, alcançar melhores objetivos de negócios e reduzir os custos operacionais estratégicos. No Brasil, há esforços e estudos iniciais para verificação dos benefícios da implementação do CTOP para melhorar a fluência do tráfego aéreo, diminuindo os atrasos, ampliando a segurança e incrementando os resultados financeiros das companhias aéreas. Este artigo apresenta uma abordagem utilizando Algoritmos Genéticos para otimização da alocação de slots durante a execução do CTOP simulado em uma aplicação com dados do espaço aéreo brasileiro. No estudo de caso foi possível uma redução entre 90% e 99% dos atrasos das companhias aéreas do cenário simulado.

ABSTRACT

The Collaborative Trajectory Options Program (CTOP) makes each airline possible to share its route options to air traffic control center, and so achieve better business goals by reducing strategic operational costs. In Brazil, there are initial efforts to verify the benefits of CTOP implementation to improve air traffic fluency, reduce delays, increase safety and increase airline financial results. This paper presents a novel approach for Brazilian airspace using Genetic Algorithms to optimize slots allocation during CTOP. The case study presented a reduction between 90% and 99% of delays of the airlines in the simulated scenario.

1. INTRODUÇÃO

É evidente o crescimento da informação, conectividade e acesso aos meios de transporte aéreos em todo o mundo, inclusive no Brasil, sendo confirmado com os dados de movimentos operacionais de aeroportos no Brasil (Infraero, 2017a) reflexo também da atividade relacionada à grandes eventos realizados no Brasil nos últimos anos (Infraero, 2017b).

Com esse crescimento de fluxo de aeronaves e utilização de aeroportos em todo o mundo, logo também surge a necessidade de utilização e desenvolvimento de métodos que auxiliem na tomada de decisões, para então manter a eficiência e segurança do Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM), auxiliando de forma geral todos os envolvidos, como, empresas aéreas e órgãos de controle e fiscalização.

Surgiu nos EUA o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (CTOP), um programa que busca melhorar o resultado de negócios pelos usuários e companhias aéreas do espaço aéreo norte-americano, permitindo o envio de preferência de rotas pelas companhias aéreas para a *Federal Aviation Administration* (FAA), por meio do *Trajectory Options Set* (TOS) quando ocorrer alguma restrição na capacidade de voos em determinada área.

Determinados voos são selecionados para receberem as restrições do CTOP e então, após o envio do TOS pela companhia aérea, o órgão responsável determina a ordem final dos voos utilizando um algoritmo geral de alocação. Esta pesquisa irá propor um modelo de algoritmo que busque uma melhor distribuição de slots por intervalo de tempo e os melhores horários de slots, possibilitando no fim uma otimização da alocação geral de slots, definida em (Golibersuch, 2012), resultando em um possível menor atraso dos voos capturados no CTOP.

Ainda sem implantação no espaço aéreo brasileiro, podemos de acordo com a utilização do CTOP no espaço aéreo norte-americano propor a utilização do CTOP no Brasil, considerando de forma ajustada as demandas do EUA para o Brasil com o objetivo de melhorar o resultados operacionais dos agentes envolvidos no ambiente do espaço aéreo brasileiro.

Este artigo está dividido da seguinte maneira, conforme a seguir. Na seção 2 é feita uma revisão teórica acerca do CTOP. A seção 3 descreve os trabalhos relacionados na literatura. Na seção 4 a abordagem utilizando AG no CTOP para otimização é proposta. A seção 5 apresenta o estudo de caso e análise dos resultados. Na seção 6, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2. PROGRAMA DE OPÇÕES DE TRAJETÓRIA COLABORATIVO (CTOP)

A *Federal Aviation Administration* (FAA) apresentou a implementação da iniciativa *Next Generation Air Transportation System* (NextGen)(FAA, 2012a), visando a melhoria de gerenciamento e atividades derivadas do espaço aéreo norte-americano. O Programa de Opções de Trajetória Colaborativa (*Collaborative Trajectory Options Program* - CTOP), foi lançado em 2012 dentro do NextGen, sendo o objetivo principal um melhor gerenciamento de tráfego aéreo considerando os integrantes e usuários do espaço aéreo norte-americano e seus objetivos de negócio, as características de cada voo e as restrições do espaço aéreo (FAA, 2012b, 2012c; Novak *et al*, 2010).

Um dos objetivos do CTOP é a possibilidade que a interferência do órgão de controle de tráfego aéreo gere uma menor insatisfação dos usuários do espaço aéreo norte-americano, ou seja, as companhias aéreas, possibilitando que as preferências de rotas alternativas, mudanças de rotas e de horário, sejam informados e disponibilizados ao órgão de controle por meio do *Trajectory Options Set* (TOS) de cada voo. Assim, o CTOP permite que cada companhia aérea informe um conjunto de opções de trajetórias para cada voo que são passíveis de restrição pelo CTOP, e, então, o órgão de controle possa escolher e tomar decisões baseadas nas restrições existentes para cada Área de Restrição de Fluxo (*Flow Constrained Area* – FCA) e as preferências de cada companhia aérea. Um exemplo de CTOP pode ser verificado na Figura 1, com duas FCA's (FCA001 e FCA002) e com três rotas distintas entre um aeroporto de origem e três aeroportos de destino no espaço aéreo norte-americano.

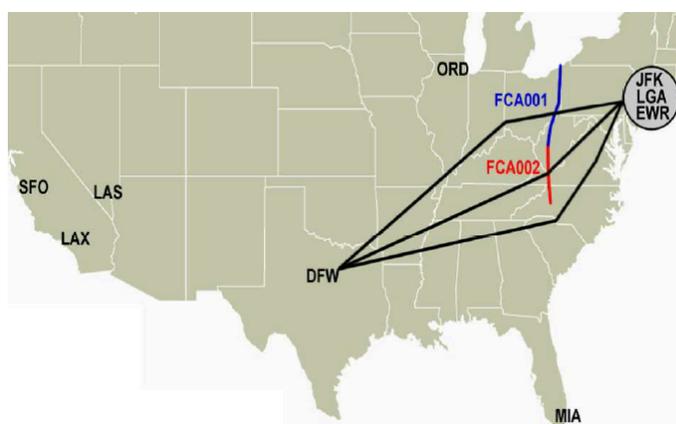


Figura 1: Exemplo de CTOP (Cruciol *et al.*, 2015).

2.1. Conjunto de Opções de Trajetória (TOS)

O Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set - TOS*) apresenta as possibilidades ou opções de rotas para cada voo baseadas em uma ordem de preferência onde a companhia aérea irá utilizar em determinado voo. Conforme apresentado na Figura 2, existe uma variação de rotas possíveis para determina trajetória entre dois aeroportos, onde determinada companhia aérea informa à FAA a sua preferência para cada voo.

Seguindo as restrições de capacidade para determinadas áreas de voo, a FAA irá verificar o TOS de cada voo, enviado pela companhia aérea, e então será determinada a ordem final. Só há a utilização de TOS quando existe um CTOP iniciado e para os voos que foram escolhidos para receberem restrições do programa.

Rota	Altitude	Velocidade	Custo Relativo da Trajetória (RTC)	Horário de Início Válido da Trajetória (TVST)	Horário de Término Válido da Trajetória (TVET)	Tempo Mínimo de Notificação Exigido (RMNT)
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	350	480	0	13:00	-	-
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	370	480	10	13:00	15:00	-
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	350	480	20	13:00	16:00	45
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	370	480	25	13:00	15:50	45
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	350	480	40	13:00	16:00	-
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	370	480	45	13:00	15:00	-

Figura 2 : Exemplo de TOS (Kim e Clarke, 2014).

A ordem final de associação é dada pelo horário mínimo de cada rota enviada à uma das FCA's, sendo conhecida como fila *Initial Arrival Time (IAT)*. O *Early Arrival Time (EAT)* significa, considerando todas as rotas enviadas, o horário mínimo que a aeronave consegue entrar no FCA. No CTOP, o slot é o horário definido para que uma aeronave efetue a entrada em uma FCA, porém a aeronave poderá entrar após o horário estabelecido, gerando um atraso para a configuração de slots definida. A ordem de IAT será utilizada para verificar qual o slots disponível analisando os horários EAT's de cada FCA para associar os voos.

3. TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção descreverá os trabalhos relacionados acerca do tema desta pesquisa. A pesquisa bibliográfica realizada até o momento mostra que há temas e técnicas interessantes, atuais e de mesmo domínio, que buscam a tentativa de resolução de problemas relacionados ao CTOP.

3.1. Abordagem Greedy em dois módulos para otimização no CTOP

A FAA apresentou o CTOP com o objetivo principal de proporcionar um melhor ATM para os usuários do espaço aéreo norte-americano e melhorar os objetivos de negócio das companhias aéreas considerando as características de cada voo e as restrições do espaço aéreo.

Na pesquisa realizada em (Kim e Clarke, 2014), os autores definiram um modelo utilizando dois módulos, para selecionar o melhor TOS para cada voo inserido no CTOP, considerando a

existência de múltiplas FCA's e o processo de negociação envolvendo companhias aéreas pelos melhores *slots* disponíveis. Logo, a pesquisa foi baseada em um problema de otimização de alocação de voos de determinada companhia aérea para redução de atrasos, inserida na demanda CTOP.

Na Figura 3, é possível verificar a comparação dos resultados alcançados pelos autores, com o atraso inicial para os voos capturados no CTOP, os voos alocados depois do primeiro módulo e os da lista final associada após o segundo módulo.

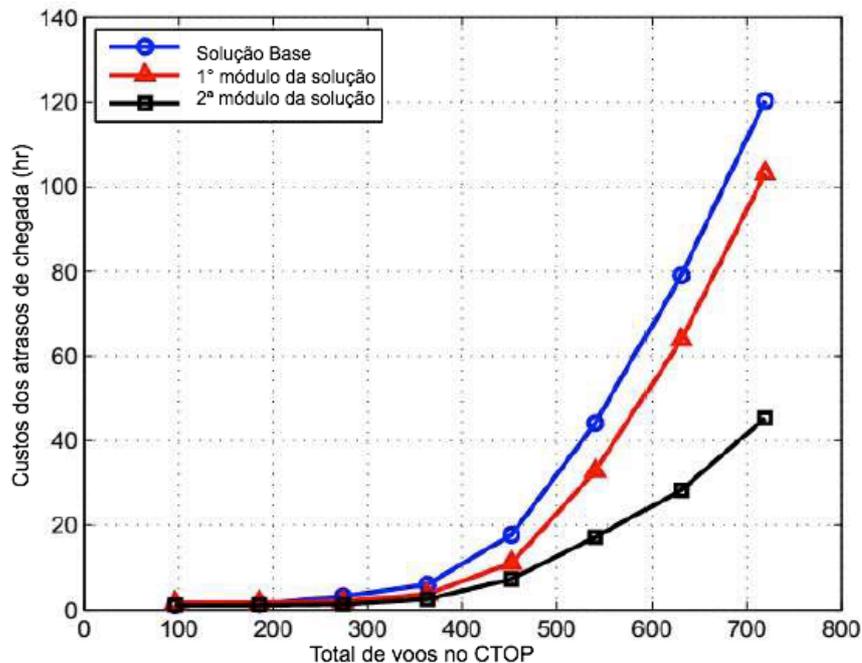


Figura 3: Comparação entre as soluções utilizadas.

O modelo foi desenvolvido em dois passos utilizando algoritmo de busca *Greedy*, obtendo uma redução de 60% dos custos operacionais.

3.2. Teoria dos Jogos para sugestão de trajetórias no CTOP

A proposta presente na pesquisa do autor em (Cruciol *et al*, 2015), foi desenvolvida utilizando Teoria dos Jogos para a sugestão de trajetórias pelas companhias aéreas para os voos capturados no CTOP. Na modelagem o autor utilizou um problema de Teoria dos Jogos, o Dilema dos Prisioneiros, como solução.

Utilizando todas as combinações possíveis e considerando o atraso mínimo para os voos de determinada companhia aérea, então é gerado o valor global de atrasos para os voos da companhia.

Após gerar e simular aproximadamente 20.000 negociações de trajetórias entre determinadas companhias aéreas ambientadas no CTOP, os resultados obtidos apresentaram desempenho superiores em comparação com a estratégia atualmente utilizada no CTOP. Foi possível uma redução de 537 horas de atraso para determinada companhia aérea.

4. ABORDAGEM UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OTIMIZAÇÃO

4.1. Algoritmos Genéticos

Proposto por (Holland, 1992), Algoritmos Genéticos (AG) são métodos de busca que utilizam mecanismos inspirados na teoria evolutiva e genética dos seres vivos. De acordo com (Srinivas e Patnaik, 1994) os AG, são uma alternativa para busca de boas soluções em um espaço de busca grande e complexo, ou seja, são muito eficientes para busca de soluções ótimas, em uma variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais.

Segundo o autor em (Grefenstette, 1986), por ser inspirado na teoria evolutiva de seres vivos, um AG utiliza o conceito de geração e população, onde durante cada iteração (geração) do algoritmo a população atual é verificada, e então com base nessa população o algoritmo gera uma nova população de possíveis soluções da busca.

4.2. Proposta e Modelagem da Abordagem em AG

Existem diversas propostas de resolução do problema de estratégias para o envio de trajetórias de voos e alocação de *slots*, conforme descrito na Seção 4, onde os autores utilizam o desenvolvimento de soluções baseadas em algoritmos inteligentes. Com base na utilização de algoritmos inteligentes e novos métodos que possam proporcionar melhores resultados para o CTOP é proposta uma otimização utilizando AG com o intuito de obtermos o melhor conjunto de *slots* de uma demanda CTOP.

Foi definida uma abordagem para a cenário do CTOP no Brasil utilizando AG que verifique o o melhor conjunto de *slots* que proporcione uma alocação de *slots* ótima e então gere um menor atraso para os voos inseridos no CTOP. As definições de ATM e CTOP foram representadas

O AG será executado na etapa de definição do conjunto de *slots* necessário para a alocação dos voos, buscando o melhor conjunto de *slots* e então otimizando a próxima etapa de alocação dos voos. Desta maneira, conforme a Figura 4, serão seguidos alguns passos para então ocorrer a otimização da aplicação proposta:

- Carga dos Voos: nesse passo serão capturados alguns voos disponíveis em um banco de dados. Os voos serão disponibilizados de acordo com um cenário definido, ou seja, seguindo uma data, horário, FCA, companhia aérea e outras informações pertinentes para simulação do CTOP e alocação de *slots*;
- Escolha da Distribuição de Voos: nessa etapa é definido uma distribuição de voos para cada companhia aérea;
- Definição dos *slots* das FCA's Disponíveis: é definido um conjunto de *slots* disponíveis onde os voos capturados no CTOP poderão ser alocados nas FCA's. Com base em um intervalo de tempo é definida uma proporção de *slots* por intervalo de tempo em cada FCA;
- Definição dos Horários de EAT dos Voos: neste passo são gerados os horários de entrada dos voos em cada FCA;

- Início da Aplicação do CTOP: nesta etapa o algoritmo de alocação de *slots* do CTOP é iniciado;
- Ordenação dos Voos por IAT: neste passo os voos são ordenados pelo horário EAT gerando a lista de IAT. Essa lista é necessária para alocação dos voos nos *slots*;
- Alocação dos Voos: nesta etapa os voos são alocados de acordo com a lista de IAT e a disponibilidade dos *slots*;
- Início do Algoritmo Genético: nesta etapa é iniciado o AG. A população inicial é o conjunto de *slots* com voos alocados resultantes da etapa anterior;
- Obtenção do Conjunto Ótimo de *slots*: o AG executado na etapa anterior tem como resultado um conjunto ótimo de *slots*, sendo então disponibilizado para a aplicação.
- Geração da Lista Final de Voos do CTOP: com os voos alocados no conjunto ótimo de *slots* é gerada uma lista de final de voos do CTOP.
- Sugestão ao Órgão Responsável: é sugerida uma lista final de voos do CTOP que possibilite um menor atraso para as companhias aéreas e órgãos responsáveis.

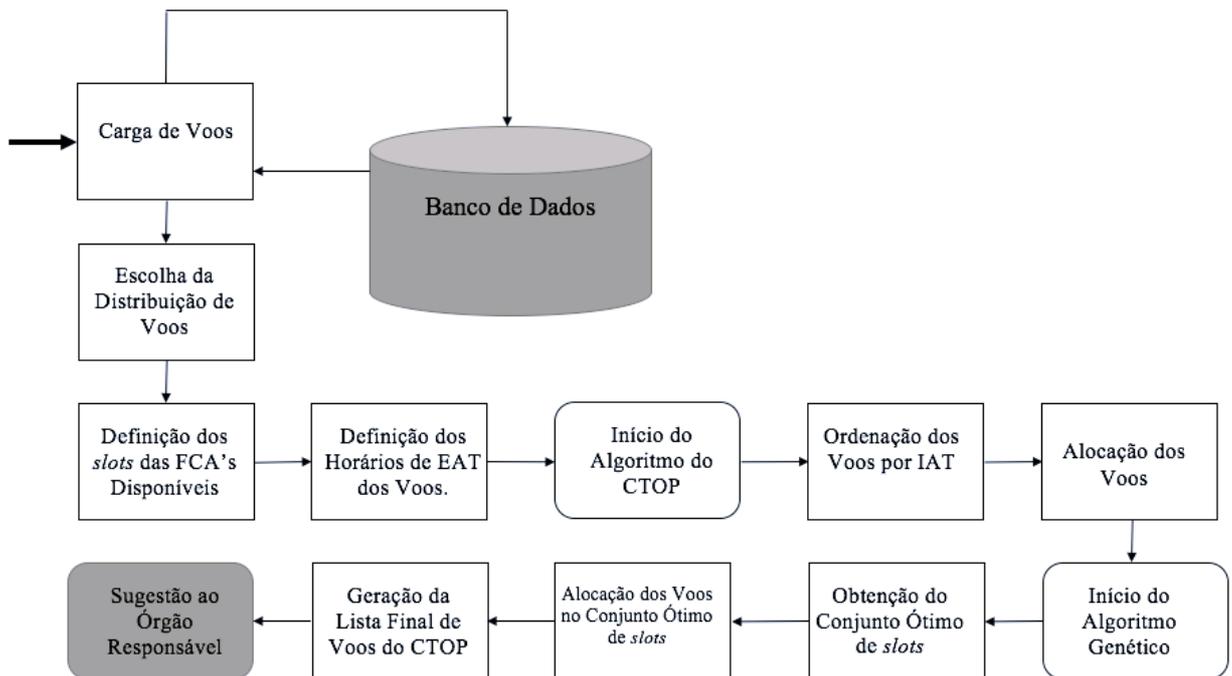


Figura 4: Arquitetura da otimização com AG.

5. ESTUDO DE CASO

5.1. Cenário de simulação e ambientação

Um estudo de caso foi desenvolvido para validação do modelo proposto com base em

informações do espaço aéreo brasileiro. Foi ambientada uma simulação com duas FCAs, FCA1 e FCA2; duas companhias aéreas, Companhia Aérea A e Companhia Aérea B e voos de 9 aeroportos brasileiros. Foram definidos dois cenários, horário de normal e horário de pico. Para o horário normal foram utilizados 96 voos e para o horário de pico, 135 voos. Foi feita uma distribuição dos voos capturados com 50% dos voos para a Companhia Aérea A e 50% dos voos para a Companhia Aérea B.

Conforme apresentado na Figura 5, os voos tem origem no seguintes aeroportos, identificados pelo código aeroportuário da Associação Internacional de Transporte Aéreo (*International Air Transport Association* - IATA): Aeroporto Internacional de Fortaleza - Pinto Martins (FOR), Aeroporto Internacional de Recife - Gilberto Freyre (REC), Aeroporto de Teresina - Senador Petrônio Portella (THE), Aeroporto Internacional de Salvador - Luiz Eduardo Magalhães (SSA), Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek (BSB), Aeroporto Internacional Belo Horizonte-Confins - Tancredo Neves (CNF), Aeroporto Internacional de Goiânia - Santa Genoveva (GYN). Os voos tem como destino dois aeroportos, Aeroporto de Congonhas - Deputado Freitas Nobre (CGH) e Aeroporto Internacional de Guarulhos - Governador André Franco Montoro (GRU).

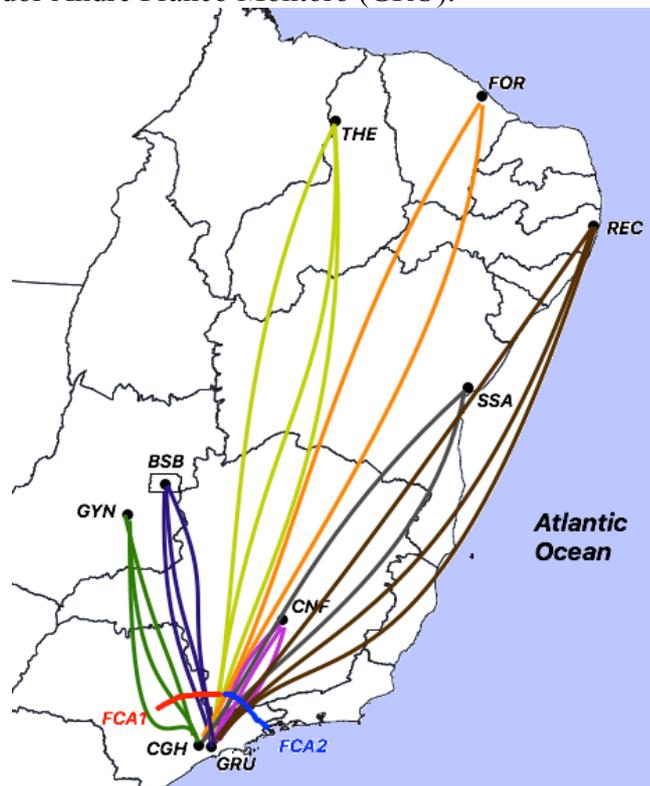


Figura 5: Voos e rotas entre nove aeroportos brasileiros.

Para efeito de simulação de um cenário no espaço aéreo brasileiro onde exista uma maior concorrência de *slot* por parte dos voos e companhias aéreas e também um cenário com uma quantidade maior de voos em comparação com a realidade brasileira foi simulado um cenário de congestionamento e restrição, onde a quantidade de voos é maior que a quantidade de *slots* disponíveis das FCAs.

Conforme apresentadas na Figura 5, as FCAs estão geograficamente delimitadas à aproximadamente 300km do CGH e do GRU. Essa distância possibilita que o tempo de entrada

das aeronaves na FCA corresponda à um intervalo de 30 a 45 minutos antes do horário de chegada nos aeroportos de destino.

Pela premissa da FCA ser a restrição da quantidade de voos que irá sobrevoar por determinada região e durante determinada faixa de horário, então foi definido que a capacidade para cada FCA será duas aeronaves em cada período de 15 minutos. A faixa de horário de determinado cenário é aproximadamente 04h (16h às 19h59, no horário de pico e 20h às 23h50 no horário normal). Dessa forma, teremos um subcenário com 64 *slots* pois serão 32 *slots* para cada FCA.

5.2. Análise dos resultados

5.2.1. Horário de Pico

A Figura 6 mostra o atraso geral e os atrasos da Companhia Aérea A e Companhia Aérea B durante a execução da otimização com AG. É possível verificar que em comparação com a alocação geral do CTOP (1ª geração) há um decaimento dos atrasos durante a execução do AG, alcançando menores e melhores valores na última geração.

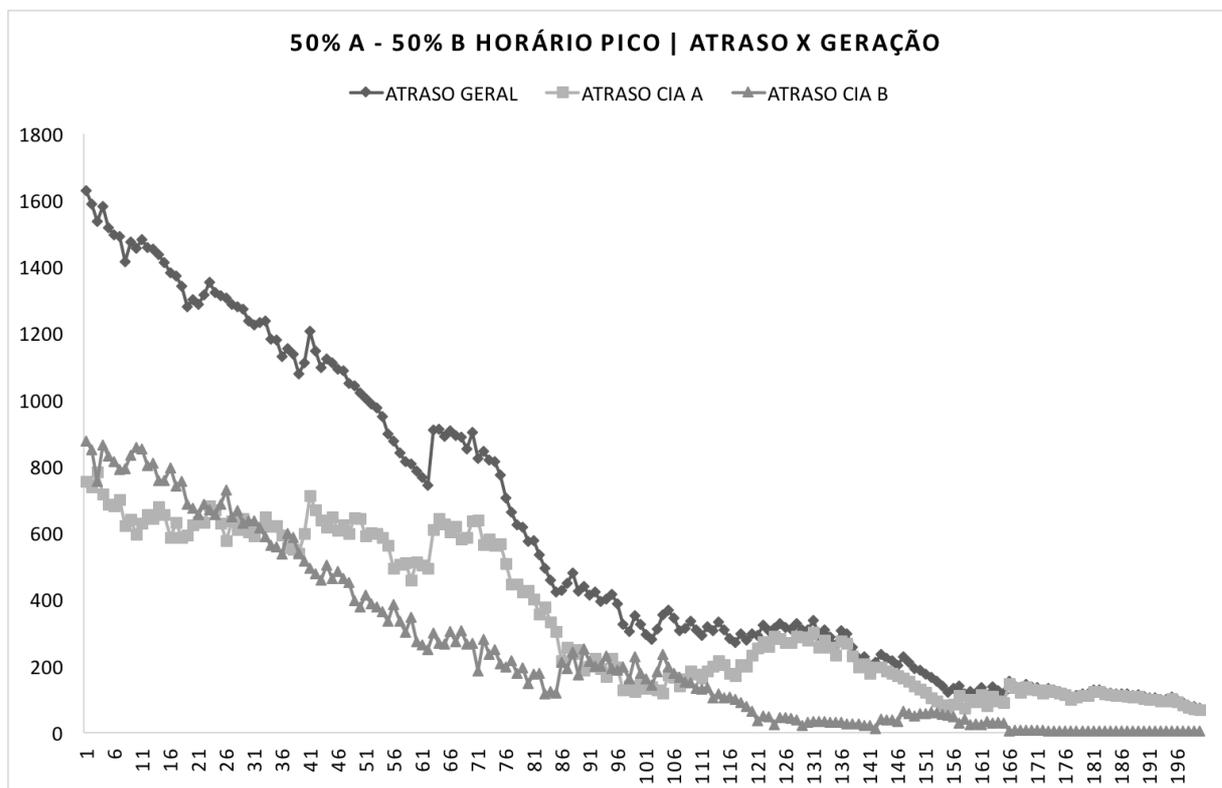


Figura 6: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Horário de Pico.

O menor valor para o atraso geral foi 73 minutos. Para o o atraso da Companhia Aérea A foi 68 minutos e para o atraso da Companhia Aérea B foi 5 minutos. Todos esses valores ocorreram na última geração, a de número 200. A otimização com AG, reduziu o atraso geral em aproximadamente 95%, o atraso da Companhia Aérea A em 90% e da Companhia Aérea B em 99%.

5.2.2. Horário Normal

Na Figura 7 são apresentados o atraso geral e o atraso por companhia aérea. É notória a

diminuição dos atrasos obtidos durante as gerações da execução da otimização com AG comparando com os obtidos na alocação geral do CTOP.

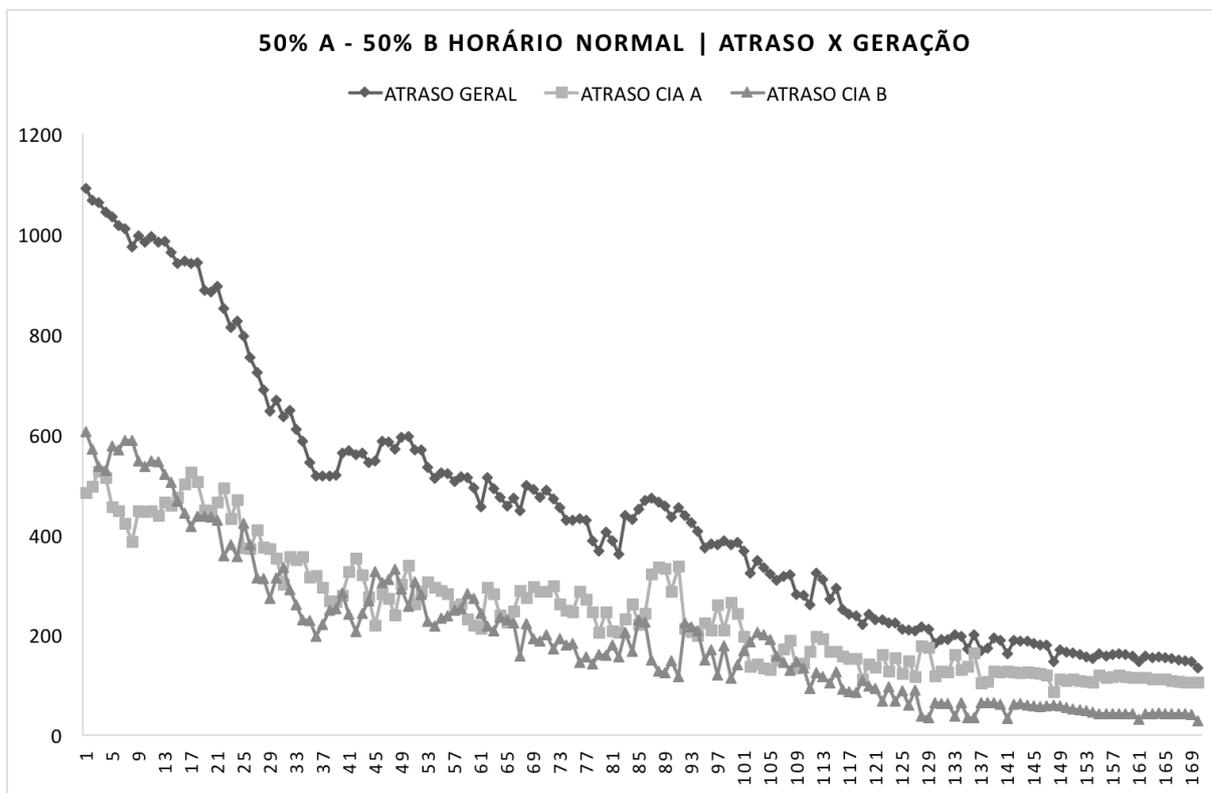


Figura 7: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Horário Normal.

Neste cenário, durante a execução da otimização com AG o menor valor para o atraso geral foi de 135 minutos, obtido na última geração, de número 170. O menor valor para o atraso da Companhia Aérea A foi de 87 minutos, obtido na geração 148. Para a Companhia Aérea B o menor valor foi de 29 minutos, este também ocorrendo na última geração. Com a otimização com AG, para este cenário, foi possível reduzir o atraso geral em 87%, o atraso da Companhia Aérea A em 78% e o da Companhia Aérea B em 95%.

Semelhante ao ocorrido no subcenário anterior, Horário de Pico, há uma geração durante a execução do AG em que os valores de atraso para as duas companhias aéreas são próximos. Isto ocorre na geração 119, com 112 minutos de atraso para a Companhia Aérea A e 109 Companhia Aérea B. Porém o atraso geral não é o mínimo obtido durante a execução da otimização com AG.

6. CONCLUSÕES

A iniciativa CTOP proporcionou resultados notáveis nos EUA, permitindo que as companhias aéreas compartilhassem suas preferências de rotas para a FAA e assim possibilitando uma melhora das metas de negócios em relação a cada voo e seu ambiente.

Ambientada no CTOP simulado no espaço aéreo brasileiro, a execução desta pesquisa proporcionou a apresentação de uma abordagem utilizando Algoritmos Genéticos para otimização da alocação geral do CTOP já existente.

Seguindo os objetivos do CTOP, esta pesquisa permitiu a diminuição dos atrasos dos voos das companhias aéreas envolvidas nos cenários do estudo de caso. O modelo proposto alcançou resultados superiores à alocação geral do CTOP. Mesmo em um cenário de pico com uma maior proporção de voos o modelo gerou resultados satisfatórios para as companhias aéreas envolvidas e para o órgão responsável pela alocação.

A proposta de trabalhos futuros é execução do modelo com um maior número de voos, FCA's e companhias aéreas, utilizando também voos internacionais. A configuração do espaço aéreo brasileiro atualmente é limitada na quantidade de rotas de voos das aeronaves, gerando dificuldade no enquadramento e definição da proposta de implementação do CTOP no Brasil. Porém essa limitação poderá ser suprida em um cenário futuro com o aprimoramento do sistema aéreo brasileiro, permitindo a implementação do CTOP e utilização do modelo inovador proposto por esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cruciol, L.; J. Clarke e L. Weingang. (2015) Trajectory Option Set Planning Optimization Under Uncertainty in CTOP. *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on. IEEE.* p. 2084-2089.
- Federal Aviation Administration. (2012a). *NextGen Implementation Plan*. Washington, DC.
- Federal Aviation Administration. (2012b). *This is CTOP - An introduction to the Collaborative Trajectory Options Program (CTOP), and the benefits to the users who participate*. Washington, DC.
- Federal Aviation Administration. (2012c). *Collaborative Trajectory Options Program (CTOP)*. Washington, DC.
- Grefenstette, J. J. (1986). Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. IEEE.* v. 16, n. 1, p. 122—128.
- Golibersuch, M. (2012). CTOP Assignment Algorithm and Substitution Processing. *FAA PMO Industry Forum 2012* AJM-222.
- Holland, J. H. (1992). Genetic Algorithms. *Scientific american. JSTOR.* v. 267, n. 1, p. 66—73.
- Infraero (2017a). *História da Infraero*. (Online) Disponível: <http://www4.infraero.gov.br/sobre-a-infraero/historia/>. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Brasília, Distrito Federal.
- Infraero (2017b). *Estatísticas de Movimentos Operacionais de Aeronaves nos Aeroportos Brasileiros*. (Online) Disponível: <http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatisticas/estatisticas.html>. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Brasília, Distrito Federal.
- Kim, B. e J. Clarke. (2014). Optimal Airline Actions during Collaborative Trajectory Options Programs. *Proceedings of 54th AGIFORS, Dubai, UAE*.
- Novak, M.; P. Somersall e D. Wolford (2010). *CTOP Industry Day, A Seminar on the Collaborative Trajectory Options Program*. US Department of Transportation Federal Aviation Administration, USA.
- Smith P.; M. Murphy e E. Stellings. (2014). *Operating in a CTOP (Collaborative Trajectory Options Program) Environment*. National Business Aviation Association, USA.
- Srinivas, M. e L. M. Patnaik. (1994). Genetic algorithms: A survey. *Computer. IEEE.* v. 27, n. 6, p.17—26.