

ABORDAGEM FUZZY PARA OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE VÔO

Fabio Luiz Peres Krykhtine

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadores: Carlos Alberto Nunes Cosenza
Felix Claude Antoine Mora
Camino

Rio de Janeiro
Janeiro de 2018

Krykhtine, Fabio Luiz Peres

Abordagem Fuzzy para Otimização de Planos de
Vão/Fabio Luiz Peres Krykhtine. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2018.

XVI, 130 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Felix Claude Antoine Mora Camino

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia de Produção, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 103 – 107.

1. Lógica Fuzzy. 2. Transporte Aéreo. 3.
Sistemas Computacionais Nebulosos. I. Cosenza, Carlos
Alberto Nunes *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção.
III. Título.

*Aos meus pais e mestres,
aos amigos.*

*À minha esposa Juliana e
aos meus filhos*

Eduardo e Catarina.

Agradecimentos

Agradeço ao imenso acolhimento dos meus orientadores Carlos Alberto Nunes Cosenza e Felix Mora Camino, ao Professor Francisco Antonio de Moraes Accioli Doria, mentes brilhantes que me acompanham sempre, pelos trabalhos que desenvolvemos juntos desde o nosso feliz encontro até os dias de hoje.

Aos meus companheiros de LABFUZZY, com os quais passamos grande parte das horas dos nossos dias em constante alegria, harmonia e paz, explorando ao limite nossos potenciais criativos e de realização.

Aos meus colegas que durante os estágios internacionais me receberam e promoveram condições para o desenvolvimento de trabalhos incríveis, em especial à Dra. Elena Capitanul, com quem pude desenvolver, compartilhar e produzir conteúdos incríveis sob supervisão do sempre parceiro e orientador Felix Mora Camino.

A presença sempre querida de Perla Cosenza, Gilzinho, Lindalva e João, Pedrinho e Roberta, e todos aqueles amigos, funcionários e colaboradores a quem devo meus sinceros agradecimentos.

Aos meus pais e sogros por todo carinho e retaguarda durante as ausências inevitáveis.

A minha esposa Juliana Krykhtine por tolerar minhas intolerâncias e ainda assim ter filhos lindos comigo.

A minha prima Lia Krykhtine por suas horas dedicadas em revisão do meu inglês em textos e artigos científicos.

Aos meus queridos cavalheiros: Eduardo Sá Fortes, por todo e incondicional apoio, Paulo Reis por sua mente brilhante e empreendedora, Antônio Morim por sua garra e determinação com estilo gerencial. Luis Odayr, parceiro de artigos e viagens internacionais. Ao Coronel Edson Conde, por nossas empreitadas e todo o apoio aos meus projetos.

Às minhas queridas damas: Aline Lys, por sua disposição de enfrentar qualquer necessidade e sair viva como grande guerreira, Elaine Sigette que trouxe desafios matemáticos e muitas novidades com abordagens maduras e claras para problemas difíceis, à Viktoryia Lipovaya, por sua presença russa absoluta e por acreditar nas minhas ferramentas como potenciais inovações.

Aos amigos da COPPETEC e da COPPE, Dora Porto, Gabriel e demais funcionários que fazem desta fundação uma máquina de projetos.

À Diretoria da COPPE por apoiar nossas ideias e desafios, em especial aos professores Edson Watanabe e Fernando Rochinha.

À Diretoria do Parque Tecnológico e todos os seus funcionários que fazem deste lugar um espaço fantástico de desenvolvimento tecnológico e científico.

Aos professores que sempre me incentivaram para novas conquistas. Nei Pereira, obrigado pelo apoio aos projetos. Professor Jules pela excelente parceria no Sitraer e na SBTA. Mário Vidal pelos mais de 1500 km rodados na poeira do cerrado, em menos de uma semana, com absoluta parceria e bom humor.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro na forma de bolsa e apoio à pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ABORDAGEM FUZZY PARA OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE VÔO

Fabio Luiz Peres Krykhtine

Janeiro/2018

Orientadores: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Felix Claude Antoine Mora Camino

Programa: Engenharia de Produção

Esta tese é o resultado de um conjunto de contribuições do desenvolvimento de algoritmos matemáticos usando lógica difusa visando colaborar com a tomada de decisão para o segmento de transporte aéreo. Entre os problemas abordados, o Índice de Custo aplicado ao Computador de Gerenciamento de Vôo instalado nas aeronaves modernas com o objetivo de otimizar as trajetórias foi escolhido como o eixo central para a discussão de formatos de estratégia com regime de trade-off de objetivos do cumprimento de cronogramas planejados, minimização do uso de combustível e na avaliação da criticidade tendo em vista o compromisso de conectar passageiros. Ao final é apresentado um algoritmo com capacidade de avaliar, ao longo da trajetória, divergências do tempo de chegada e combustível embarcado planejados através de um sistema de regras nebulosas e a aplicação de correções no Índice de Custo, dialogando com os aspectos de incerteza da trajetória, de forma a melhorar o desempenho da missão.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

FUZZY APPROACH FOR OPTIMIZING FLIGHT PLANS

Fabio Luiz Peres Krykhtine

January/2018

Advisors: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Felix Claude Antoine Mora Camino

Department: Production Engineering

This thesis is the result of a set of contributions of the development of mathematical algorithms using fuzzy logic aiming to collaborate with the decision making for the air transport segment. Among the problems addressed, the Cost Index applied to the Flight Management Computer installed in modern aircraft with the purpose of optimizing the trajectories was chosen as the central axis for the discussion of strategic formats with a trade-off regime of compliance objectives of planned schedules, minimization of fuel use and criticality assessment in view of the commitment to connect passengers. At the end, an algorithm with the ability to evaluate, along the trajectory, divergences of the estimated arrival time and estimated fuel on board planned through a system of fuzzy rules and the application of corrections in the Cost Index is suggested, dialoguing with the aspects of uncertainty of the trajectory, in order to improve mission performance.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - Motivação e Justificativa do Trabalho	3
1.2 - Problema e Hipóteses	4
1.3 - Metodologia da Pesquisa.....	5
1.3.1 - Processo de Coleta e Revisão Bibliográfica.....	6
1.4 - Originalidade da Tese.....	7
1.5 - Organização da Tese	7
CAPÍTULO 2 – Referencial Teórico.....	10
2.1 - Tomada de Decisão	10
2.1.1 - Tomada de Decisão Racional e a Modelagem Matemática Fuzzy Dual.....	13
2.1.2 - Tomada de Decisão Racional e o Ambiente de Incerteza	13
2.2 - O Tratamento Da Incerteza Em Ambientes Complexos	15
2.2.1 Abordagens de Termos e Definições Específicas.....	16
2.2.1.1 - Informação	16
2.2.1.2 - Certeza.....	17
2.2.1.3 - Precisão	17
2.2.1.4 - Incerteza	17
2.3 - Comparação entre Ferramentas - Probabilidade e Possibilidade	18
2.3.1 - Quando a Probabilidade não é uma aplicação indicada	19
2.4 - LÓGICA FUZZY	20
2.4.1 - Lógica Fuzzy	20
CAPÍTULO 3 – Números Fuzzy e Cálculo Fuzzy	28
3.1 - Números Fuzzy	28
3.2 - Sistemas Especialistas Nebulosos	32
3.3 - Modelo COPPE COSENZA.....	37
3.4 - Números Fuzzy Duais	39
3.4.1 - Números Duais	39
3.4.2 - Números Fuzzy Duais	39
3.4.2.1 - Operações com Números Fuzzy Duais	42
3.4.2.1.1 - Operações aritméticas com números fuzzy duais:.....	42
3.4.2.1.2 - Vetores Nebulosos Duais	43
3.4.2.1.3 - Matrizes Nebulosas Duais.....	44
3.4.2.1.4 - Ordenação entre Números Nebulosos Duais.....	44
CAPÍTULO 4 – Otimização do Plano de Vôo	47
4.1 – Introdução	47

4.2 - Sistema De Gestão De Vôo (Flight Management System).....	48
4.2.1 - Principais funções do sistema de gerenciamento de vôos.....	51
4.2.1.1 - A Função de Planejamento de Vôo.....	51
4.3 - Composição do Plano de Vôo Vertical.....	54
4.3.1 - Variáveis do Plano Vertical de Vôo.....	54
5.3.1.1 - Equações da Dinâmica de Controle da Aeronave no Plano Vertical:..	57
4.4 - Custos Associados ao Perfil de Vôo.....	60
4.4.1 - Composição dos Custos do Vôo.....	60
4.4.1 - Custos de Vôo Relacionados ao Tempo.....	62
CAPÍTULO 5 – Avaliação Fuzzy do Cost Index.....	64
5.1 - Definição do Cost Index.....	64
5.2 - Utilização Atual do COST INDEX.....	65
5.2.1 – Cost Index Estratégico.....	65
5.2.2 – Cost Index Tático.....	67
5.3 - Abordagem Fuzzy do Cálculo do Cost Index.....	68
5.3.1 - Computação do COST INDEX Tático.....	68
5.3.2 - Módulo Fuzzy Especialista para Avaliação e Atribuição do Cost Index....	71
5.3.2.1 - Ilustração de um Estudo de Caso.....	74
CAPÍTULO 6 – Solução de Algoritmo para Ajuste Dinâmico de Cost Index com Otimização DO Plano de Vôo.....	76
6.1 - Premissas.....	83
6.1.1 - Segmentação da Trajetória.....	84
6.1.1.1 - Definição dos Conjuntos Representativos para as Divergências dos Parâmetros ETA e EFOB.....	87
6.1.1.2 - Sistema Especialista de Regras Nebulosas.....	92
CAPÍTULO 7 – Conclusão Geral.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXO.....	108
A. ELEMENTOS ALGORITMICOS ASSOCIADOS A OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE VÔO.....	108
A.1 Algoritmo Proposto para Otimização de Combustível.....	108
A.2 Ambiente de Avaliação para Simulação.....	111
A.3 Caracterização dos Inputs do Sistema Decisório.....	112
A.4 Estimação do Peso da Carga e dos Passageiros.....	114
A.5 Avaliação de criticidade dos elementos decisórios.....	119
A.6 Avaliação do risco à Operadora.....	122
A.7 Inputs da Estratégia.....	123
A.8 Objetivos de Desempenho.....	124

A.9 Entradas Inferentes ao Longo do Vôo	125
A.10 Avaliação de Destinos	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Níveis do Crescimento do Mercado Aéreo Mundial.....	1
Figura 2: Custos Operacionais 2012.....	2
Figura 3: ICMS sob o QAV praticado nos diversos estados brasileiros	3
Figura 4: Tipologias de Incerteza	16
Figura 5: Conjuntos de Cantor.....	25
Figura 6: Tipos mais Comuns de Números Nebulosos Triangulares e Trapezoidais.....	28
Figura 7: Diferença entre Conjuntos “Crisp”e “Nebulosos”	30
Figura 8: Estrutura Geral de um Sistema Especialista	32
Figura 9: Comparação entre dois Números Fuzzy Duais	45
Figura 10: Diagrama de Bloco de uma Interface Típica	50
Figura 11: Diagrama de Bloco das Principais Funções do Computador de Bordo	52
Figura 12: Perfil Horizontal da Trajetória de um Plano de Vôo	53
Figura 13: Perfil Vertical da Trajetória de um Plano de Vôo.....	53
Figura 14: Perfil Verical da Trajetória de um Plano de Vôo.....	57
Figura 15: Diagrama do Sistema Proposto para Atualização do Cost Index Fonte: Elaboração Própria	93
Figura 16: Detalhamento do Sistema de Inferência por Regras Nebulosas	93
Figura 17: Criticidade das Regiões de Decisão do Sistema de Inferência.	94
Figura 18: Visão Sistêmica das Entradas e Incertezas.	111
Figura 19: Detalhamento das Incertezas ligadas a Lista de Passageiros.	112
Figura 20: Silhueta de dois corpos humanos masculinos de pesos bem diferentes.....	116
Figura 21: Trade-off de Estratégias	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Incerteza e Linguagem: Sentenças Linguísticas e Tipos de Incerteza	24
Quadro 2: Tipos de Algoritmos e Descrição	27
Quadro 3: Incertezas linguística associada ao Cost Index por Estágio do Plano de Vôo	85
Quadro 4: Incertezas associadas ao Cost Index por Estágio do Plano de Vôo.....	86
Quadro 5: Frequência de Revisão do Cost Index por Estágio do Plano de Vôo	89
Quadro 6: Regras Nebulosas com Termos Linguísticos Associados.	95
Fonte: Elaboração Própria	95

Quadro 7: Matrizes com Números Fuzzy e suas Normalizações e Números Fuzzy Duais e suas Normalizações (EFOB).....	96
Quadro 8: Matrizes com Números Fuzzy e suas Normalizações e Números Fuzzy Duais e suas Normalizações (ETA)	97
Quadro 9: Matrizes com Números Fuzzy e suas Normalizações e Números Fuzzy Duais e suas Normalizações (CI).....	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Desempenho de Controladores Fuzzy e Tradicional.....	35
Gráfico 2: Típico Número Fuzzy Dual $a + \varepsilon b$	41
Gráfico 3: Diferentes formatos de Números Fuzzy Duais	41
Gráfico 5: Valores Limites do Cost Index.....	66
Gráfico 6: Impacto do Cost Index ao longo do vôo	69
Gráfico 7: Sistema proposto para Monitoramento do Cost Index	70
Gráfico 8: Números Fuzzy aplicados para apuração de divergências	73
Gráfico 9: Graus de Necessidade de Alteração do Cost Index.....	73
Gráfico 11: Conjuntos Nebulosos representantes dos desvios.	89
Gráfico 12: Variações do Cost Index para Climb.....	91
Gráfico 13: Variações do Cost Index para Decida	92
Gráfico 14: Números Fuzzy para os Termos Linguísticos de EFOB.	96
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.	96
Gráfico 15: Números Fuzzy para os Termos Linguísticos de ETA.	97
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.	97
Gráfico 16: Números Fuzzy para os Termos Linguísticos de CI.	98
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.	98
Gráfico 17: Superfície de Decisão EFOB x ETA X CI Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.	99
Gráfico 18: Exemplo de um mesmo valor de Cost Index em diferentes Níveis de Incerteza Dual.....	100
Gráfico 19: Uso de Números Fuzzy Dual para Estimação de Massa de Passageiros ..	116
Gráfico 20: Diferentes Massas em 4 categorias de passageiros e incertezas associadas para cada uma delas.	117
Gráfico 21: Criticidade de Custos de Passagens de Conexões Perdidas em Números Fuzzy.	120
Gráfico 22: Níveis de Ofertas de Vôos em Números Fuzzy.	121
Gráfico 23: Nível de Risco à Operadora em Números Fuzzy.	122
Gráfico 24: Níveis de criticidade em Destinos em termos de tráfego aéreo em Números Fuzzy.	128

Gráfico 25: Frequência de solicitação de mudança em procedimentos em Números Fuzzy.	128
Gráfico 26: Exemplo de Resultante da Avaliação do Destino para criação de buffer de Tempo de Chegada.	129

LISTA DE NOMENCLATURAS

ACARS	ARINC Communications Addressing and Reporting System
ADC	Air Data Computer
AEO	All Engines Operating
AFDS	Autopilot Flight Director System
AFM	Aircraft Flight Manual
AIP	Aeronautical Information Publication
APU	Auxiliary Power Unit
ARINC	Aeronautical Radio Inc.
ATA	Air Transport Association
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
BOD	Bottom of Descent
BOW	Basic Operating Weight
CAS	Calibrated Airspeed
CI	Cost Index
CMC	Central Maintenance Computer
CoG	Center of Gravity
CPCP	Corrosion Prevention and Control Program
CRCO	Central Route Charges Office
DMC	Direct Maintenance Cost
DOC	Direct Operating Costs
DOI	Dry Operating Index
DRC	Dynamic Route Construction
DTG	Distance To Go
EAS	Equivalent Airspeed
EC	Engine Cycle
ECON	Economic speed
EH	Engine Hour
ERJ	Embraer Regional Jet
ESAD	Equivalent Still Air Distance
EFOB	Estimated Fuel On Board
ETA	Estimated Time to Arrive
ETD	Estimated Time to Departure
FADEC	Full Authority Digital Engine Control
FC	Flight Cycle
FF	Fuel Flow (e.g. kg/h or kg/min/engine)
FH	Flight Hour
FIR	Flight Information Region
FMC	Flight Management Computer
FMS	Flight Management System
GSR	Ground Specific Range
GW	Gross Weight
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument Flight Rules
IMC	Indirect Maintenance Costs

IOC	Indirect Operating Costs
ISA	International Standard Atmosphere
LLP	Life Limited Part
LNAV	Lateral Navigation
LRC	Long Range Cruise
MAC	Mean Aerodynamic Chord
MAX END	Maximum Endurance
MAX SPD	Maximum Speed
MFD	Multi Function Display
MH	Man Hour
MFC	Maximum Fuel Capacity
MMO	Maximum Operating Mach number
MLDW	Maximum Landing Weight
MO	Month(s)
MRC	Maximum Range Cruise
MRW	Maximum Ramp Weight
MSG	Maintenance Steering Group
MSL	Mean Sea Level
MTOW	Maximum Take-off Weight
MZFW	Maximum Zero Fuel Weight
NAVAID	Navigation Aid, typically a radio station providing VOR and/or DME position data
NOTAM	Notices To Airmen
OAT	Outside Air Temperature
OEI	One Engine Inoperative
OEW	Operational Empty Weight
PFD	Primary Flight Display
QFE	Aircraft altitude above a station
QNH	Aircraft altitude above mean sea level based on local station pressure
RoC	Rate of Climb
RoD	Rate of Descent
SAT	Static Air Temperature
SID	Standard Instrument Departure
SAR	Specific Air Range
STAR	Standard Terminal Arrival Route
TAS	True Airspeed
TBI	Time Between Inspection
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
TDAC	Time Dependent Aircraft Costs
TMA	Terminal Maneuvering Area
TOC	Top of Climb, also Total Operating Costs
TOD	Top of Descent
TOI	Take-off Index
TOW	Take-off Weight
USD	US Dollar
VALT VNAV	Altitude Hold
VNAV	Vertical Navigation
VFR	Visual Flight Rules
ZFW	Zero Fuel Weight

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O transporte aéreo cresce mundialmente com a ampliação da capacidade de transporte de passageiros e carga. Em um país com o tamanho do Brasil, a exemplo dos demais países de tamanho similar, o desafio logístico é de integração nacional e internacional com a implantação de uma malha logística multimodal atendendo o fluxo de carga e de passageiros. O Brasil não possui esta infraestrutura e é incapaz de oferecer sinergia à geração de riquezas e acesso às oportunidades oriundas do desenvolvimento econômico por exploração de suas vocações. Isso representa uma limitação que possui impacto em muitas atividades da produção. A solução passa hoje, pelo desenvolvimento harmonioso do transporte aéreo como complemento às modalidades terrestres de transporte. Isso também supõe um alto grau de eficácia na operação do transporte aéreo comercial.

Consumer demand extremely strong

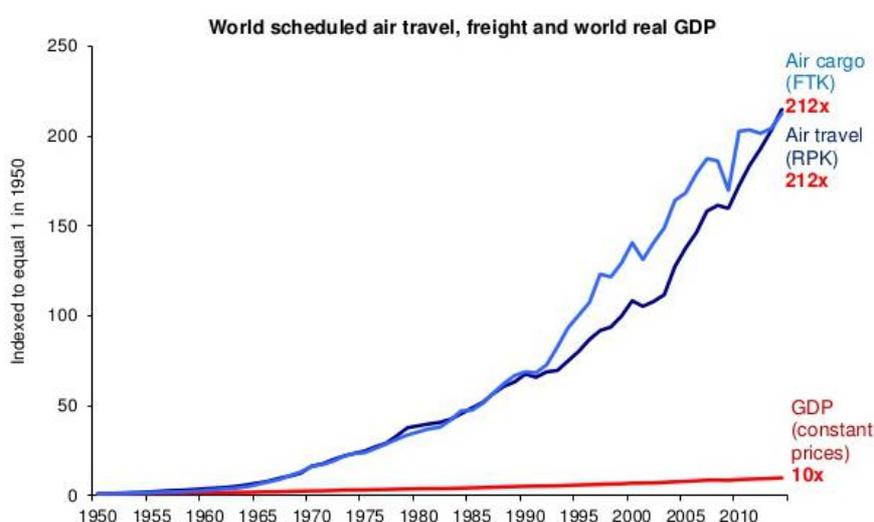


Figura 1: Níveis do Crescimento do Mercado Aéreo Mundial

Fonte: Fatores Chave do Mercado de Transporte Aéreo - Brian Pearce – IATA - June 2014
OECD – Debate em Competição de Empresas Aéreas

O país tem acesso restrito à grande parte do seu território. Isso significa que é observado que as grandes capitais possuem linhas de transporte aéreo ativas baseadas no fluxo de passageiros e, em certas localidades, com exploração econômica de transporte de carga.

O uso de aviões menores e o fomento de linhas regionais, com grande capilaridade é uma visão que fora implementada em toda a Europa, com emprego de aeronaves inclusive fabricadas pelo Brasil, de menor porte, com custo e operação adequados a execução de jornadas de curta e média distâncias.

Independente da escala e localização, o transporte aéreo tem custos elevados, por exigir para o seu funcionamento uma larga infraestrutura e equipamentos de capital intensivo, além dos aspectos ambientais considerados, como: os níveis de ruído, emissões de CO₂, consumo de combustível fóssil, etc.

Estima-se a nível mundial um custo de combustível no transporte aéreo por volta de 33% do valor da operação. De acordo com a IATA (2014), o custo de combustível (33%) é seguido por custos de operações (25%) e por custos de manutenção (10%).

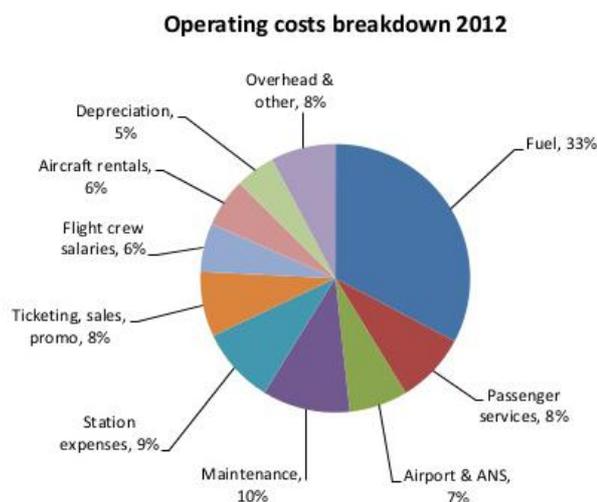


Figura 2: Custos Operacionais 2012

Fonte: Fatores Chave do Mercado de Transporte Aéreo - Brian Pearce – IATA - June 2014

No Brasil, as alíquotas do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), praticado pelos diferentes Estados brasileiros, também são representativos no incremento de custos de combustível na aviação e apresentam muitas disparidades que tornam a estratégia de tanqueamento das aeronaves um elemento fundamental nas políticas de custo, o que influencia diretamente as estratégias adotadas por parte das empresas.

ICMS sobre o QAV nos estados brasileiros

As diferentes alíquotas praticadas nos estados brasileiros acabam moldando a malha aérea

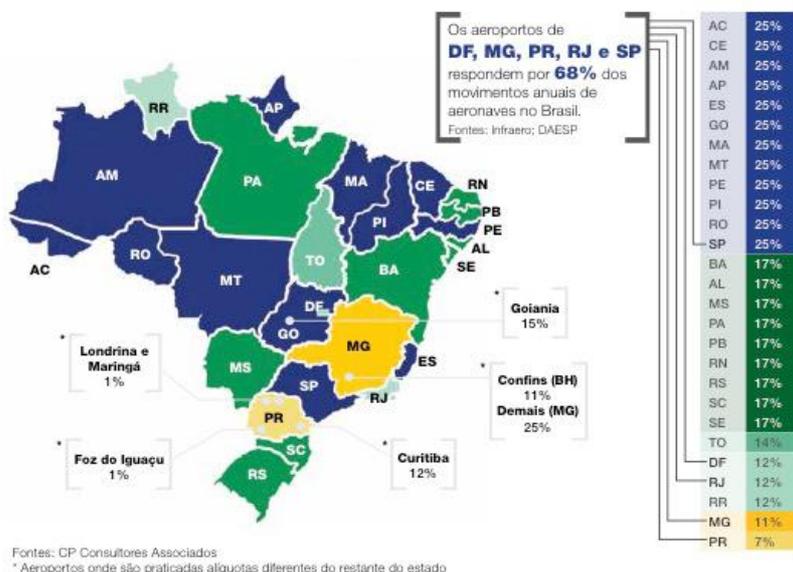


Figura 3: ICMS sob o QAV praticado nos diversos estados brasileiros
Fonte: Aviação Brasileira Agenda 2020 - ABEAR – BAIN & CO - Julho 2014

1.1 - MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A proposta de produção do presente trabalho “Abordagem Fuzzy para Otimização de Planos de Vôo”, foi motivada com base em uma pesquisa sobre a solução otimizada do Índice de Custo (Cost Index) na tomada de decisão. Essa pesquisa investigou a recuperação do tempo de vôo, com alteração do perfil de vôo, com custo incremental de recursos em forma do uso de combustível. A pesquisa inicialmente chamada Fuzzy Dynamic Cost Index (FDCI) resultou em artigos publicados e apresentações de trabalhos.

A interação com a equipe de pesquisadores da ENAC, Escola Nacional de Aviação Civil, parceira do Laboratório de Lógica Fuzzy da COPPE UFRJ, aprofundou a abordagem da solução em uma visão de otimização em formato de rede, nas quais as restrições e variáveis ambientais consideram também o benefício do ajuste a uma frota de aeronaves.

A pesquisa teórica acerca do ferramental fuzzy para suportar operações complexas em ambiente com variáveis nebulosas, com o intuito de amparar a tomada de decisão, incorporou algoritmos baseados em técnicas de programação dinâmica e variáveis utilizando números em formato fuzzy duais. Naturalmente, a fusão do ferramental resultou em abordagens com programação dinâmica e fuzzy dual.

Por fim, aborda-se a otimização de trajetórias através da descrição matemática de variáveis com a aplicação de números fuzzy duais para representar as incertezas operacionais, explorados em sistemas lógicos nebulosos. Neste trabalho são exibidos sistemas especialistas nebulosos que são componentes fundamentais para a criação de um plano de vôo mais preciso e coerente.

Naturalmente, esta tese tem como roteiro, uma introdução ao ambiente de estudo procurando contextualizar o problema e a percepção da hipótese de solução pelo emprego de novas ferramentas.

Em seguida, um panorama teórico que referencia o uso das ferramentas adotadas neste trabalho que constituem a abordagem teórica para a solução proposta.

Dentro do contexto de proposição da solução, a discussão é dividida em grandes blocos nos quais: no primeiro, será abordada a tomada de decisão utilizando Lógica Fuzzy, realizando um percurso de apresentações das ferramentas, suas referências e aplicações, e o segundo, onde são apresentados um conjunto de contribuições à otimização de vôos, através de aplicações que utilizam Lógica Fuzzy e conhecimentos reunidos ao longo da pesquisa em diversos artigos e trabalhos publicados com proposições de otimização de trajetórias com Fuzzy Dual Dynamic Programming. O trabalho apresenta, então, subsistemas funcionais que tratam de aspectos fundamentais para o desenho de uma trajetória ótima levando em conta a incerteza nos parâmetros de entrada e integrando esta no tratamento levando à definição do plano de vôo.

1.2 - PROBLEMA E HIPÓTESES

Parte-se da constatação que, enquanto a priori um Cost Index é calculado pelas estruturas computacionais modernas das empresas aéreas, existem lacunas em

ferramentas embarcadas para fornecimento ao piloto de um Cost Index adequado à condição individual do voo, provocando penalidades econômicas tanto por custo de uso excessivo de combustível, tanto por uso inadequado do tempo em voo.

É possível quantificar divergências de níveis esperados de combustível e tempo através de uma ferramenta por lógica fuzzy e entregar um Cost Index otimizado a situações individuais ao longo do voo?

1.3 - METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa teve caráter investigatório, método pesquisa-ação, com imersão no contexto do setor através de visitas técnicas e participação em eventos e utiliza ferramental qualitativo e quantitativo para a análise dos dados. Neste contexto realizou-se visitas em fabricantes e centros de pesquisa, além da imersão realizada na Escola de Aviação Civil Francesa sob orientação e tutoria do Professor Felix Mora Camino.

Ao longo do processo de investigação foram produzidos artigos e textos científicos com abordagem sobre o tema Cost Index (KRYKHTINE et al., 2014, 2015, 2016) e Programação Dinâmica (KRYKHTINE et al., 2016), trabalhos em conjunto com outros pesquisadores de diversas partes do mundo.

A primeira visita à ENAC foi realizada após apresentação de trabalho na Conferência Mundial da Air Transport Research Society, em Bordeaux (2014), no qual foram apresentados dois artigos, sendo um deles sobre o ajuste de tarifas baseado em oferta x demanda com tratamento por lógica fuzzy (KRYKHTINE et al., 2014 e RAYMUNDO et al., 2014).

Durante o período de dois anos seguintes foram produzidos demais artigos dialogando com o tema COST INDEX (KRYKHTINE et al., 2015) e Programação Dinâmica (KRYKHTINE et al., 2017), com a equipe de pesquisadores da ENAC e do LAB FUZZY.

Em 2016, ocorreu a participação no evento SITRAER – Simpósio de Transporte Aéreo, realizado pela Sociedade Brasileira de Transporte Aéreo em São Luis-MA. O

evento teve como ponto positivo a premiação outorgada pelo ITA pelo melhor trabalho submetido à equipe de pesquisadores da ENAC e do LAB FUZZY (KRYKHTINE et al., 2016). Este fato foi deflagrador da realização do evento de 2017 na COPPE UFRJ, sob a coordenação executiva de Fabio Krykhtine e coordenação geral do Professor Carlos Alberto Nunes Cosenza. O evento foi uma estratégia de reunir o setor e trocar mais informações, tendo representantes das maiores fabricantes de aeronaves do mundo, BOEING e AIRBUS, além de representantes da Força Aérea Brasileira, da INFRAERO e das mais relevantes universidades do Brasil, reunindo participantes de países como Alemanha, Grécia, França, Argentina, Colômbia, China, Espanha e Portugal.

Este trabalho foi forjado sob conhecimento obtido na investigação e na imersão no setor de Transporte Aéreo.

1.3.1 - PROCESSO DE COLETA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta tese foi gerada a partir de uma pesquisa inicial preliminar, que teve início proposta antes da submissão da proposta deste trabalho ao Programa de Engenharia de Produção, a partir de uma visita técnica e um primeiro contato com a equipe da Escola Nacional de Aviação Civil Francesa.

Após a aprovação da proposta, foram realizadas outras duas visitas com período médio de 20 dias, no qual foi possível obter um conjunto de referências bibliográficas específicas do tema de transporte aéreo.

Durante as visitas, além do intercâmbio de informação com pesquisadores de outros países, foram desenhados artigos e textos científicos, produzidos em colaboração com os demais pesquisadores da ENAC e publicados em revistas, anais de conferências e jornais científicos.

As referências desta pesquisa, sob o tema de Setor Aéreo, são divididas em:

- Manuais Técnicos
- Trabalhos Científicos
- Artigos Científicos
- Anotações de Aula

- Material de Aula da ENAC;

A pesquisa foi realizada, ainda, em ampla busca em bases de dados na Internet que permitiram acesso a informações da indústria aeronáutica, trabalhos científicos publicados e participação em eventos do setor promovidos por grupos de trabalhos e sociedades de pesquisa acerca do tema.

O referencial acerca do instrumental matemático foi obtido em bases de informações presentes no LABFUZZY COPPE UFRJ, com acesso às principais bases de dados e artigos sobre o tema, trabalho de publicação de artigos e conferências realizadas na COPPE com a participação do Professor Felix Mora Camino, com abordagem teórica específica em FUZZY DUAL NUMBERS, conhecimento que gerou artigos e um livro sobre o tema MORA CAMINO e COSENZA (2017)

1.4 - ORIGINALIDADE DA TESE

Esta tese tem sua originalidade baseada no instrumental matemático aplicado ao segmento de transporte aéreo com modelagem especialista extremamente restrita e uso de um novo estágio de aplicações de lógica fuzzy, com atenção aos aspectos da lógica fuzzy compreendendo abordagem de números nebulosos duais como solução proposta para o diálogo com sistemas computacionais mais robustos e precisos, atentando para o custo computacional mais leve.

1.5 - ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta Tese está dividida em 7 Capítulos e Anexos. Cabe destacar que os anexos representam ensaios de algoritmos para dialogar com os problemas de incerteza, sendo alguns deles comentados ao longo do texto principal.

O Capítulo 1 é uma introdução do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico deste trabalho abordando uma discussão filosófica sobre aspectos da Tomada de decisão, incerteza, ferramentas para

lidar com a incerteza, informação e sua ambiguidade. Em seguida uma passagem acerca dos antecedentes da lógica fuzzy abordando a teoria de conjuntos nebulosos.

No Capítulo 3, são aprofundados Números Fuzzy e Cálculo Fuzzy, com apresentação das principais definições e operações de cálculo utilizando números nebulosos. Aborda-se a visão de sistema e modelos, e os números fuzzy duais em toda a sua amplitude de aplicações: definição de vetores, matrizes e suas operações. Este capítulo teve origem em estudos realizados em anos anteriores e que geraram recente publicação por MORA CAMINO e COSENZA (2017), do qual tive prazer de participar.

O Capítulo 4 inicia a abordagem da Otimização do Plano de Vôo, realizando ampla exposição dos principais sistemas de processamento embarcado e suas funcionalidades, desenvolve uma aproximação até o sistema de otimização da trajetória vertical presente no Computador de Bordo das aeronaves. Ainda no mesmo capítulo, são apresentados os principais tipos de custos envolvidos na operação de transporte aéreo.

No Capítulo 5, o Cost Index é definido e avaliado. Apresenta-se uma abordagem inicial da solução baseada nos desenvolvimentos apresentados em artigos 2015 e 2016, em co-autoria com MORA CAMINO e COSENZA, inclusive com primeiras concepções dos módulos do sistema proposto.

No capítulo 6 é apresentada a “Solução de Algoritmo para Ajuste Dinâmico de Cost Index com Otimização de Trajetória do Plano de Vôo”. São demonstrados os principais componentes, premissas e sistemas envolvidos na definição de um Cost Index ao longo do vôo.

Finalmente no Capítulo 7 ocorre a conclusão geral do trabalho.

Um anexo contém ensaios livres sobre modelagens complementares ao desenvolvimento de ferramentas associadas as operações que buscam apresentar avaliações para a criação estratégias de mitigação da ocorrência de atrasos. São

contribuições livres de modelagens aderentes e complementares ao problema de otimização principal desta demonstrado nesta tese.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo trata da importância de compreender que na tomada de decisão: a qualificação dos dados, os instrumentos para a avaliação e as tipologias de dados; são elementos influentes e, fundamentalmente, essenciais para o desenvolvimento de sistemas coerentes de decisão. A qualidade do dado e sua carga de imprecisão, vagueza ou ambiguidade, são elementos presentes na natural expressão dos fenômenos e em suas descrições de processamento pelo ser humano. Este capítulo se insere nesta tese como base para compreender os sistemas nebulosos (apresentados a seguir), sua relação com linguagem e como é possível realizar a tomada de decisão a partir de informações com grande parcela de incerteza.

2.1 - TOMADA DE DECISÃO

A Tomada de Decisão é uma das mais importantes habilidades do cérebro humano e representar este processo pode ser bastante complexo e pesado (BANA e COSTA, 1995). A tomada de decisão é baseada em muitas variáveis e ponderações, sentimentos e aflições que podem ser norteadas por traumas ou prêmios que são processadas e balanceados individualmente por cada ser humano segundo as suas percepções de utilidade (VON NEUMANN e MORGENSTERN, 1944).

Tomar decisões é uma das ações naturais do ser humano. A partir do momento em que o homem passa a raciocinar, perceber, sentir, avaliar e reconhecer a realidade em um amplo panorama em que o raciocínio, o sentimento de prêmio, as necessidades biológicas, a satisfação passa a governar e orientar as ações de tomada de decisão (DAMÁSIO, 1994).

A tomada de decisão analisada a partir da ciência é um importante campo de conhecimento desenvolvido pelo homem. Envolve analisar o contexto, as estratégias, as lógicas operantes, e as diversas partes afetadas (LIPOVAYA, 2015). A tomada de decisão no ser humano tem dois extremos: emocional e racional.

A tomada de decisão emocional considera a satisfação pessoal ligada a uma sensação de conforto do ser humano e geralmente ocorre sem um compromisso de

conciliação de muitos objetivos, é ligada a uma percepção, análise e tomada de decisão composta por fatores emocionais que podem estar ligados a sensações de segurança, certeza, preservação, benefício individual entre outras (KAHNEMAN, 2003).

A tomada de decisão racional, por sua vez, está ligada a uma análise criteriosa dos fatores que estão envolvidos, as restrições, regras, benefícios e malefícios às partes envolvidas, a estratégia envolvida na tomada de decisão e a uma quantificação geral de utilidade, mesmo que com certa carga de incerteza (MORA CAMINO e COSENZA, 2011).

Os modelos são descritos, em sua maioria, por grupos de variáveis e seus limites, presentes em grande quantidade e com comportamento diversos: discretos, nebulosos, fixos, previsíveis, esperados, aleatórios, apenas para ilustrar alguns dos diferentes cenários onde a variação e a variabilidade em uma dezena de variáveis com características diversas podem retornar em milhares de possibilidades de respostas.

Se vinculados ao aspecto temporal, percebe-se que a tomada de decisão pode assumir uma característica de sistema dinâmico, e que dada certas condições das variáveis, objetivos e estratégia, podem inferir na escolha de uma opção que seja mais adequada ao momento. Neste caso, a tomada de decisão é atrelada a uma temporalidade.

A tomada de decisão é atrelada, de uma maneira geral, à utilidade (VON NEUMANN e MORGENSTERN, 1944). Utilidade é relativa. Em um ambiente com diferentes atores e diferentes lógicas, a utilidade é relativa a cada indivíduo.

Mas como compor, mensurar e avaliar cada parte deste sistema de decisão de forma a criar um ponto de equilíbrio comum a todas as partes? Este desafio, é maior quando constatamos que a realidade não é composta por variáveis absolutamente discretas, e sim por muitas tipologias de variáveis, algumas com grande carga de incerteza, ou mesmo nebulosas.

Este trabalho utiliza a definição da tomada de decisão racional e a análise o processo do ponto de vista tanto racional, para a otimização do plano de voo com o uso

do ferramental fuzzy, quanto do entendimento das lógicas operantes, para inserção de dados em um sistema especialista.

2.1.1 - TOMADA DE DECISÃO RACIONAL E A MODELAGEM MATEMÁTICA FUZZY DUAL

Os sistemas matemáticos complexos carregam, por sua vez, maior complexidade a medida que o número de variáveis aumenta, representando grande esforço computacional na medida em que o cálculo se torna um pesado fardo ao processamento.

Por outro lado, ao tornar certas variáveis constantes, ou assumir valores estimados, amplia a divergência entre a representação matemática e a realidade, resultando em modelos de baixa aderência aos propósitos de descrever a realidade, e mais ainda, pouco eficientes se aplicados na tomada de decisão.

Esta discussão, tem grande pertinência na defesa, ou tomada de decisão, de adotar um ferramental matemático diferenciado e criado para permitir que se possa estabelecer tratamento adequado, ou ao menos que possa reduzir esta discrepância, no retratar de um cenário mais comprometido com a realidade e que, simultaneamente, permita a tomada de decisão mais precisa, ou ao menos precisa suficiente aos nossos objetivos. Este ferramental é proposto por COSENZA e MORA CAMINO (2011) com o desenho teórico amplamente publicado na aplicação de conjuntos fuzzy duais na solução de problemas de tomada de decisão em ambiente complexo.

2.1.2 - TOMADA DE DECISÃO RACIONAL E O AMBIENTE DE INCERTEZA

O ambiente de incerteza é uma realidade e tomar decisões sobre incerteza um processo que acompanha o ser humano durante toda a sua existência.

Até o fim do século XIX, os cientistas não compartilhavam desta visão e o tratamento científico sem abordagem de incerteza era ideal KLIR (2006). Esta visão muda no século XX quando a complexidade dos sistemas desenvolvidos em estudos científico força aos cientistas a desenvolverem novas abordagens e formas de tratamento da incerteza.

Tomada de decisão em ambiente de incerteza torna-se um campo transversal com vasta aplicação em muitas áreas de conhecimento e tem base matemática,

estatística, economia e gestão, pesquisa operacional, ciência da computação, engenharia, e abarca um espectro amplo de possibilidades de pesquisa em diferentes linhas e campos.

A automatização da capacidade de tomar decisões no mundo moderno teve grande progressão, principalmente, a partir da segunda metade do século XX, com o desenvolvimento de sensores, processadores, e com a possibilidade de se inserir, em uma máquina, um programa.

Na indústria, a partir da aparição de processadores lógicos, foi possível, dada a pequena quantidade de variáveis e a objetiva aplicação em ambiente adequadamente estável, o desenvolvimento de máquinas inteligentes, com a capacidade de avaliar o estado de um sistema e tomar decisões para cumprir dado objetivo.

As máquinas inteligentes têm origem em sistemas de inferência por regras nebulosas, amplamente utilizadas em controle e automação, na era moderna. Estas máquinas tem a capacidade de avaliar a divergência de seus parâmetros para condições esperadas e realizar operações visando estabelecer esta condição. Tem-se como exemplo as aplicações para controle de motores, freios abs, foco de máquinas fotográficas, controle de ar condicionados, lavadoras, estabilização de veículos terrestres tracionados ou aéreos, geradores, apenas para citar algumas destas máquinas presentes em nosso cotidiano.

Em ambientes de incerteza ou em sistemas complexos em que a incerteza cresce e se propaga da variável de entrada até o resultado, transferindo grande incerteza, a tomada de decisão torna-se mais difícil, menos clara, não óbvia. Tomar decisão nestes ambientes só é possível a partir do tratamento da incerteza de maneira adequada para permitir que o tomador de decisão tenha fundamentos para optar por decisões que correspondam aos seus objetivos e a sua estratégia. A complexidade é externa ao operador e reside no contexto (PERROW, 1984).

Sabe-se que quanto maior o número de variáveis, mais complexo se torna o processo de tomada de decisão. Os sistemas complexos muitas das vezes são incomputáveis sem auxílio ferramental apropriado, e mesmo os mais robustos

computadores podem ser limitados em oferecer resultados sob tal complexidade, representando grandioso esforço computacional (DORIA, 2011), hora traduzido em tempo e custo. A conversão de variáveis em constantes, aplicada em muitos dos casos é uma opção que afasta o resultado da realidade.

2.2 - O TRATAMENTO DA INCERTEZA EM AMBIENTES COMPLEXOS

A incerteza está presente em toda a parte, logo, onde existe mundo real, existe incerteza. A precisão entendida como um conceito relativo, sempre carregará uma parte de incerteza (ZADEH *apud* ROSS 2010). As discussões sobre precisão e incerteza são recorrentes na ciência, BERTRAND RUSSEL (1923) e MAX BLACK (1937) já apresentavam suas ideias e pontos de vista manifestando a necessidade de abordagem mais atenta, e as ferramentas que permitem a compreensão, administração e tomada de decisão em ambientes carregados de incerteza, uma constante busca. Uma avaliação sempre interessante é definir um grau de incerteza aceitável e se o esforço pela precisão é uma energia necessária.

A incerteza, e a sua conseqüente compreensão, sempre representou um desafio para cientistas de diferentes campos pesquisa. A incerteza pode ter causa por questões ambíguas, por lacunas de informação, ou mesmo, pela generalização da definição de um termo (ROSS, 2010).

A incerteza está intimamente ligada a precisão e tratar incerteza é tratar precisão em certos aspectos. A precisão é um objetivo que envolve muitos custos e esforço, por isso compreender qual o nível de precisão é suficiente para a composição de nosso julgamento na tomada de decisão é uma abordagem bastante comum. ZADEH (1973) defende esta ideia na afirmação de que “*precisamos explorar a nossa tolerância para a imprecisão*”.

É imperioso que se defina os custos aceitáveis de esforço computacional frente à precisão e ao nível de incerteza aceitável para a tomada de decisão, estabelecendo elementos para seleção de um ferramental adequado.

Para tratar a incerteza precisa-se antes, identificar que tipo de incerteza está sendo abordada dentro do contexto do problema. A incerteza é dividida de maneira geral em duas grandes classes: nebulosidade e ambiguidade.

As diferentes tipologias de incerteza são objeto de estudo de muitos cientistas.

A nebulosidade é associada a informação indistinta e a ambiguidade a informação associada a multiplicidade. Então pode-se ainda explorar os diferentes tipos de nebulosidade e ambiguidade.

WIERMAN (2010) apresenta um quadro de diferentes tipos de incerteza no qual divide os dois principais grupos em nebulosidade e ambiguidade.

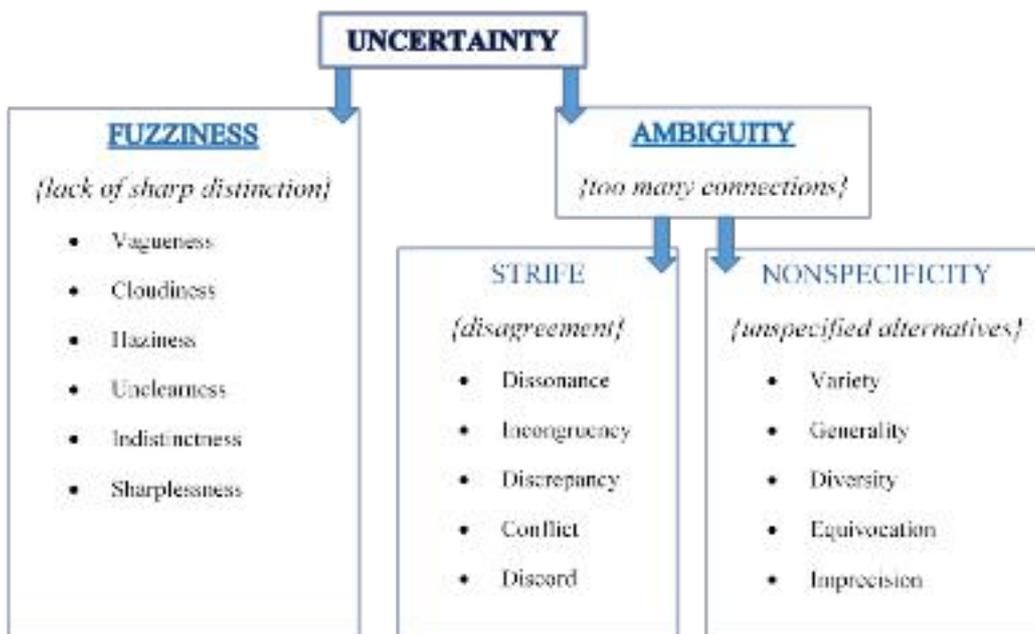


Figura 4: Tipologias de Incerteza
Fonte: Wierman, 2010

2.2.1 ABORDAGENS DE TERMOS E DEFINIÇÕES ESPECÍFICAS

2.2.1.1 - INFORMAÇÃO

De acordo com DUBOIS *apud* CAPITANUL (2015) a definição de informação é: “referente a uma coleção de símbolos ou sinais produzidos tanto por observação de

um fenômeno, por meio natural ou artificial, ou por uma atividade cognitiva humana com a visão de auxiliar a entender o mundo, ou uma situação corrente, tomar decisões ou comunicar a outros humanos ou agentes artificiais.”

A informação e a incerteza estão, de alguma maneira, inversamente relacionadas. Da mesma forma, níveis de confiança e níveis de incerteza estão inversamente relacionados (ROSS 2014).

Informação pode ser captada por sensores interconectados ou por declaração e registro de observadores. A informação é confundida correntemente com dados. Dados são fragmentos componentes de informação. Um dado isolado pode não trazer nenhuma informação. A informação é o dado tratado e orientado para uma finalidade.

2.2.1.2 - CERTEZA

Certeza, de acordo com ROSS (2010) é operacionalmente definida como “*um estado, tal qual que a evidência do contrário está abaixo do nível de disputa*”.

2.2.1.3 - PRECISÃO

Precisão é a capacidade de reproduzir com acurácia o comportamento de um sistema em condições do mundo real.

2.2.1.4 - INCERTEZA

A Incerteza não possui uma definição única e específica. É um termo que retrata a falta de certeza, mas não é um termo que abarca todas as diferentes definições de incerteza.

ZIMMERMANN *apud* CAPITANUL (2015) propõe a seguinte definição para incerteza:

“A incerteza implica que em uma dada situação o indivíduo não dispõe de informação, tanto quantitativa, quanto

qualitativa, apropriada para descrever, prescrever ou prever deterministicamente ou numericamente um sistema, seu comportamento e suas demais características.”

A quantificação da incerteza é um processo de avaliação baseado em diferentes métodos e modelos que podem produzir tanto um estado numérico, quanto um estado linguístico, que será interpretado futuramente por um tomador de decisões. A teoria da probabilidade é das ferramentas mais utilizadas para tratar desta matéria.

A Incerteza Total representa a agregação de todas as incertezas relevantes relativas a um problema em um contexto específico. No contexto de predição, a Incerteza Total deve concentrar todas as formas de incerteza: a aleatoriedade, a nebulosidade, a vagueza, não especificidade, entre outras.

A máxima incerteza é um caso de pura ignorância, a não confiabilidade. A incerteza zero, ou certeza, contém o máximo de informação e o máximo de confiança. A incerteza zero pode ser considerada realidade em sistemas simples de informação, mas a medida em que a complexidade cresce, a incerteza zero torna-se conceitualmente improvável de ser atingida.

2.3 - COMPARAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS - PROBABILIDADE E POSSIBILIDADE

Quando temos diferentes tipos de incerteza, tais como: lacunas de conhecimento (desconhecimento), ambiguidade, vagueza, não especificidade, conflitos (inconsistência), linguística (que pode expressar diferentes níveis de acordo com fatores culturais, sociais e diferentes contextos) e inferência (que, tecnicamente, realiza um julgamento e operações), a maior parte dos problemas relacionados a estes tipos de incerteza não podem ser conduzidos pela teoria da probabilidade ou por interpretação.

Para o tratamento destas incertezas, surgem diversas ferramentas, além do cálculo probabilístico, a Lógica Nebulosa (ZADEH, 1965), a Teoria da Possibilidade (DUBOIS e PRADE, 1988), a Probabilidade Imprecisa (WALLEY, 1990), entre outras.

A Teoria da Probabilidade tem uma longa história de uso e aplicação. Para ROSS (2014) “Se a única disponível ferramenta for um martelo! Então, todos os tipos de incerteza parecem pregos”. O professor ROSS destaca que a diferença entre as tipologias de incerteza e manifesta a sua visão de que cada tipo deve ser tratado de uma maneira mais apropriada.

ROSS apresenta alguns dos “pregos”:

- Incerteza na saída de um evento (Aleatoriedade);
- Incerteza da dispersão (Variância);
- Incerteza Sistemática (Inclinação);
- Risco = Probabilidade * Consequência;
- Confiabilidade = P (sistema tem desempenho dentro de especificações em um período específico);
- Denominador Comum para comparar e combinar diferentes quantidades ou complexidades;
- Tomada de Decisão;
- Inferência geral (coletiva, populacional) a partir de uma amostra;
- Métodos Estatísticos, métricos, funcionais etc.

2.3.1 - QUANDO A PROBABILIDADE NÃO É UMA APLICAÇÃO INDICADA

Em um ambiente pobre em dados, a dependência pesada recai sobre o conhecimento e a experiência. O que nos cabe dizer que os seres humanos passam a ser um importante elemento nesta avaliação. E as pessoas, seres humanos, não são pensadores probabilísticos naturais e frequentemente violam convexidade e probabilidades condicionais.

A probabilidade não é indicada para capturar conhecimento especialista. A probabilidade é desenvolvida com um instrumental baseado na matemática dos conjuntos “crisp”. Por tal motivo, segundo Zadeh, não é boa ferramenta para quantificar a nebulosidade presente em informações similares às informações linguísticas.

2.4 - LÓGICA FUZZY

2.4.1 - LÓGICA FUZZY

A teoria dos conjuntos fuzzy, embora concretizada através da formulação matemática publicada por Zadeh, não foi a primeira tentativa da matemática em dialogar com um tipo de abordagem mais aderente à realidade. Neste contexto, JAN LUKASIEWICKZ (1878-1956) desenvolveu algum instrumental considerando que o tratamento lógico binário era limitado para descrever estados transitórios.

LUKASIEWICKS propôs um modelo lógico tri valorado, e assim, em uma escala com os limites “zero” e “um”, encontra-se a proposição de um valor intermediário em que a presença de um elemento e a sua negação assumem o mesmo valor.

O filósofo e matemático do Azerbaijão, professor Max Black (1909-1988), reconhecido na primeira metade do século XX por seu desenvolvimento no campo da filosofia analítica, apresentou, anteriormente a formulação dos conjuntos nebulosos de Zadeh, um dos primeiros trabalhos a visualizar um protótipo teórico e filosófico para tratamento lógico da incerteza, publicando em 1937 o artigo: “*Vagueness: An exercise in Logical Analysis.*”

O estudo de BLACK (1937) declarou que, de fato, a continuidade implicava em gradações que poderiam ser descritas por um conjunto de pontos, que com intervalos tão pequenos, não seriam assim percebidos.

O quão mais distante os pontos entre si fossem, iriam acumulando incrementos, através de infinitos pontos intermediários, de tal modo que a mudança entre estados só poderia ser percebida a uma dada distância considerada grande o suficiente para diferenciá-las.

Assim, surge a proposição de que se uma continuidade é discreta, pode-se atrelar um número a cada elemento e este número indica uma gradação. A coleção destes pontos resulta em um termo ou objeto.

As proposições de BLACK (1937) enfrentaram uma questão crucial: gradações de quê? A forte influência da teoria da probabilidade desviou o pensamento do filósofo para outro caminho de raciocínio.

Se tivesse assumido, em 1937, que eram gradações de: pertinência, de verdade, de presença, Max Black possivelmente teria atingido as futuras proposições formuladas por Zadeh.

Esta possibilidade teria reservado à ciência computacional e a matemática abordagens diferenciadas, modificando bastante o rumo das máquinas modernas e de seus processadores, considerando que Max Black era ligado a Universidade de Cambridge e que os computadores estavam sendo inventados nas abordagens das primeiras teorias computacionais, a destacar: a máquina de Alan Turing e teoremas de Kurt Goedel.

O conceito de pertinência, introduzido por Zadeh, foi realmente o grande diferencial da teoria dos conjuntos nebulosos, que embora não se restrinja apenas a este conceito, teve papel fundamental na descrição de toda a matemática nebulosa.

Quando em 1965, Lotfi Zadeh publicou pela primeira vez sua proposta de teoria de conjuntos com uso de pertinências, abriu frente para uma grande quantidade de proposições, redesenhando por completo o pensamento moderno matemático, lógico e computacional.

A teoria dos conjuntos nebulosos, formalizada por Lotfi Zadeh, representou um marco decisivo para a modelagem de muitos problemas que não podiam ser representados em uma abordagem matemática clássica.

Uma das características mais impressionantes se deu no tratamento da incerteza com instrumental matemático apropriado. A Lógica Fuzzy explorou o princípio filosófico da matemática com considerações diversas para descrição de aspectos da incerteza: imprecisão, vagueza, não especificidade, ambiguidade, lacunas em dados e de muitas outras formas de considerações sobre o tratamento de dados em informações.

A abordagem por Lógica Fuzzy para tratamento de dados, também chamada de Lógica Nebulosa, proporcionou grande avanço na solução de problemas, apresentando modelagens com maior aderência a realidade. E o que é a realidade?

A realidade é um tema antigo, discutido desde Platão em o mito da caverna. A realidade é razão de um delineamento com precisão suficiente para uma descrição comum de fato ou coisa. A realidade é construída a partir da lógica do observador, que a constrói em meio a muitos atributos e referenciais oriundos de uma cultura própria e exclusiva em meio a sua capacidade de perceber e descrever as coisas.

Na informação descrita pela lógica do observador podemos coletar um conjunto de características que são oriundas de sua experiência, formação, cultura, dogmas, traumas, pré-julgamentos e todas as suas vivências pessoais.

A realidade e a imprecisão são intimamente ligadas, na medida em que, a diferença entre a descrição de realidades por dois ou mais observadores, gera uma divergência que em parte dos casos pode ser apresentada por uma zona nebulosa de contorno de dados, que expressam uma realidade adicionada de sua imprecisão ou incerteza.

Em uma visão tradicional de ciência, a incerteza representa um estado indesejado. Um estado incerto que deve ser evitado a todo custo. Dar tratamento adequado a incerteza, aceitar a incerteza em um modelo teórico são tarefas necessárias e já enfatizadas em inscitos de RUSSEL (1923): *“toda lógica tradicional habitualmente assume que símbolos precisos estão sendo empregados”*. Zadeh, por sua vez reitera que: *“devemos explorar a nossa tolerância por imprecisão.”*

ROSS (2010) questiona quantos dos problemas humanos necessitam de uma abordagem com precisão. Que nível de precisão de resposta é suficiente para resolver uma questão problema? Em engenharia, precisão é relacionada com grandes custos de pesquisa e desenvolvimento. Grande parte das decisões e de tarefas cotidianas não requer precisão elevada para atingir soluções a contento.

A imprecisão e a incerteza então passam a desempenhar um papel relevante na seleção de métodos e ferramentas adequadas para realização de cálculos complexos com

resultados que possam colaborar de forma prática e objetiva com necessidades reais. Esta atenção desdobra-se em redução de custos relacionados aos esforços computacionais para obtenção de resultados que pouco agregam ao seu fim. A definição de qual o nível de precisão nos é suficiente para resultados satisfatórios é um dos pontos fortes na escolha da Lógica Nebulosa como ferramental.

ROSS (2014) defende que os sistemas em Lógica Nebulosa são extremamente aplicáveis, especialmente, em duas situações:

(1) em situações envolvendo alta complexidade nos quais o comportamento não é bem compreendido;

(2) em situações em que um resultado aproximado, fornecido de maneira rápida, é requerido.

A seleção de ferramentas apropriadas para o tratamento de cada tipo de incerteza e imprecisão são importantes, pois nem todas os termos que caracterizam a informação poderão ser tratados por conduções clássicas da teoria da probabilidade ou interpretação.

A Lógica Fuzzy, ou Lógica Nebulosa, passou a tratar a possibilidade e não a probabilidade. Esta diferença é explorada profundamente na construção de teorias e abordagens modernas com a incorporação de níveis de precisão, incerteza, pertiência e relações diversas.

A busca por um ferramental coerente para o tratamento da incerteza e do uso de pertinências em uma visão relacional para conjuntos fez com que teorias e modelos novos apareçam como soluções para problemas modernos, na descrição de fenômenos físicos e da natureza em várias escalas, na utilização de meios inteligentes de controle, em sistemas inteligentes, na classificação de dados e suas consequentes análises relacionais e de natureza computacional.

A oportunidade de tratamento matemático nebuloso permitiu o enfrentamento de problemas reais em vasto campo de conhecimento, não sendo restritas ao campo das

engenharias, mas a todas as ciências, ao passo que se correlaciona com maior aderência aos preceitos do pensamento humano no tratamento de informações.

O exemplo abaixo, extraído da palestra de Timothy Ross, realizada no LABFUZZY COPPE UFRJ em 2014, e adaptadas às expressões em idioma português, apresenta diferentes incertezas nas sentenças linguísticas

SENTENÇAS LINGUISTICAS	TIPO DE INCERTEZA
Eu retornarei às 18:00 h.	Probabilística
Eu retornarei logo.	Vagueza
Eu retornarei em alguns minutos.	Nebulosidade
Eu retornarei cedo ou tarde.	Ambiguidade
Eu retornarei entre 5 e 15 minutos.	Não especificidade
Eu posso não retornar.	Desconhecimento

Quadro 1: Incerteza e Linguagem: Sentenças Linguísticas e Tipos de Incerteza
 Fonte: ROSS (2014) – Elaboração Própria

Naturalmente, no mundo atual, a teoria da probabilidade e a lógica booleana são amplamente aplicadas, por serem fortemente difundidas, de forma inapropriada para o tratamento de diferentes tipos de incerteza. Reconhecer seus limites para o tratamento de diferentes tipos de incerteza é um passo de convencimento difícil para muitos cientistas e pesquisadores, remetendo a grande discussão nos campos da filosofia.

A teoria da probabilidade é construída sob o princípio de uma teoria de conjuntos discretos com pertinência booleana (“crisp”) descrita por CANTOR (1874), ou seja, um elemento é representado por um número e, quanto a sua pertinência, por um tratamento binário: pertence ou não pertence, “zero” ou “um”, “contido” “não contido”, etc.

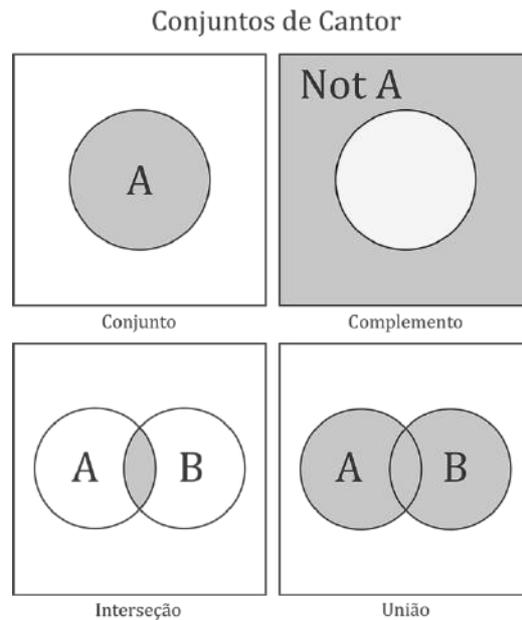


Figura 5: Conjuntos de Cantor
Fonte: MCNEILL, 1994

A teoria dos conjuntos fuzzy extrapola esta visão, através da incorporação dos conjuntos “crisp”, para um tipo de lógica capaz de tratar e representar valores linguísticos, relativos e com diferentes níveis de pertinência entre si relacionados.

Assim, o processamento de dados linguísticos por sentenças mais adequadas e parecidas com a estrutura de pensamento humano pode ser conectado, através do processamento lógico matemático nebuloso, com capacidade de responder aos diferentes tipos e arquiteturas de problemas.

Embora seja um ferramental muito recente, com cerca de 50 anos, a Lógica Nebulosa possui uma construção intuitiva e extremamente coerente com o pensamento humano, sendo rapidamente compreendida, se abandonados os dogmas e preconceitos. Compreender a Lógica Nebulosa é olhar atento para o mundo, entender o relacionamento entre as coisas e buscar o entendimento do sentido lógico da aplicação, antes da aplicação da matemática. No desenvolvimento de sistemas, pesquisadores costumam agregar-se a uma tipologia ferramental ou limitar-se por conta deles, desejando assim a construção de uma abordagem sem sentido próximo com a definição do problema. Frase correntemente é dita em salas de aula de modelagem de sistemas nebulosos, e que poderia ser estendida para demais contextos de modelagem de algoritmos, é: *“Quem procura o que não perdeu, quando encontra não reconhece”*.

A frase atenta para a ansiedade de resolver um problema a partir de um ferramental matemático milagroso, antes de delinear o próprio problema, em suas variáveis, restrições e limites.

Dentre as dificuldades e barreiras para a aplicação de teorias de conjuntos nebulosos, pode-se destacar: o programa de formação educacional de ensino médio e fundamental, em todo mundo, que apresenta a teoria de conjuntos em uma abordagem clássica. A inserção na educação básica da noção de nebulosidade e relativização entre conjuntos poderia ser uma grande contribuição na percepção de mundo e realidade. Certamente, seria uma quebra de paradigmas e conduziria alunos para um raciocínio mais criativo, expansivo e adequado com a realidade do mundo contemporâneo, digital e virtualizado.

A quebra de paradigmas e a reestruturação do raciocínio, da lógica clássica à lógica nebulosa, para abordagem de problemas é ainda uma grande dificuldade para pesquisadores que passaram grande parte de sua vida acadêmica trabalhando em um instrumental matemático bastante difundido. Aceitar a Lógica Fuzzy e suas potencialidades é redesenhar a maneira de interpretar a modelagem de problemas, e certamente, é um dos grandes desafios para sua mais ampla aplicação.

A visão e a percepção de possibilidades em aplicação de lógica nebulosa em problemas modernos é um dos grandes avanços da humanidade e foi, rapidamente, adotada por indústrias de eletrônicos, principalmente nos países orientais, sendo uma das primeiras a aplicar processamento lógico nebuloso em novos produtos, sobre tudo, aos produtos considerados inteligentes. O resultado pode ser verificado pelo grande número de artigos e patentes registradas ao longo dos últimos 40 anos.

Produtos inteligentes são capazes de tomar decisões de auto ajuste por regras e realizar tarefas sistematizadas com base na situação momentânea do arranjo de variáveis. Desta forma, utilizando sensores, muitos equipamentos passaram a incorporar processamento nebuloso para melhor performance de suas finalidades e objetivos.

Zadeh *apud* MCNEIL (1994) classificou os algoritmos compostos por lógica fuzzy em quatro tipologias básicas:

TIPO DE ALGORITMO	DESCRIÇÃO
Definicional	Que categoriza uma entrada nebulosa
Generacional	Que cria uma saída nebulosa
Relacional	Que descrevem sistemas em fluxos
Decisional	Que se ajustam a partir de uma leitura dinâmica

Quadro 2: Tipos de Algoritmos e Descrição
 Fonte: ZADEH, 1973

ZADEH (1965) defende a noção de conjuntos nebulosos tal como uma generalização de conjuntos ordinários sobre um determinado domínio, diferindo, porém, dos conjuntos ordinários por não apresentarem uma fronteira claramente definida. Esta diferença é percebida quando se representa o universo de discurso dos conjuntos, onde percebe-se graficamente uma fronteira contínua e bem definida nos conjuntos ordinários e uma zona de transição nebulosa nos conjuntos nebulosos.

Os conjuntos nebulosos possuem uma zona de transição nebulosa, representada por intervalos superpostos de conjuntos e adequada à caracterizações de estados limites.

CAPÍTULO 3 – NÚMEROS FUZZY E CÁLCULO FUZZY

Este capítulo percorre de maneira teórica os principais elementos componentes do conhecimento sobre a lógica fuzzy, estabelecendo um aprofundamento moderado sobre as ferramentas e potencialidades de aplicações. Nele, são descritas as características dos números fuzzy e suas relações de cálculo em sistemas de inferência, formação de índices, relativização e comparação com objetivos atrelados à tomada de decisão. A parte final do capítulo descreve aspectos recentes da evolução do ferramental matemático fuzzy com a inserção de um matemática própria em fuzzy dual, que oferece benefícios sobre tudo na redução de esforços computacionais devido a sua arquitetura.

3.1 - NÚMEROS FUZZY

Os números fuzzy ou nebulosos são definidos como intervalos aritméticos em que a função de pertinência varia entre “zero” e “um” descrevendo o grau de semelhança de um elemento a um dado conjunto. Assim, um número nebuloso é um conjunto, descrito em um intervalo aritmético, de valores com pertinências variadas, e não um número transcrito de maneira discreta.

Esta variação de pertinência ocorre de acordo com a função que descreve segmentos de intervalos componentes dos números nebulosos, podendo assumir diferentes formas.

Das formas mais comuns, destacamos as triangulares e trapezoidais. Abaixo exemplos de números nebulosos.

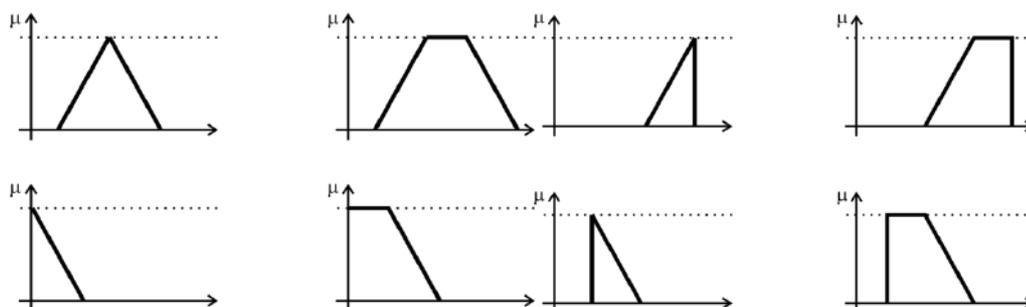


Figura 6: Tipos mais Comuns de Números Nebulosos Triangulares e Trapezoidais

Fonte: KRYKHTINE (2012) – Elaboração Própria

Embora os números triangulares e trapezoidais sejam mais utilizados, alguns fenômenos são melhores descritos por números nebulosos compostos por outras funções: gaussianas, exponenciais etc, capazes de descrever com mais exatidão mudanças de um termo ou estado.

A manipulação de números nebulosos triangulares e trapezoidais são bastante comuns e possuem cálculo bastante experimentado. Outras formas de números nebulosos podem ser processadas com apoio de programas de computador capazes de gerar sistemas com grande complexidade. Estes programas permitem inclusive que as modelagens dos números nebulosos possam ser feitas, diretamente, através de uma interface gráfica, reservando a retaguarda matemática ao processamento computacional administrado pelo programa.

Quanto às principais diferenças, entre conjuntos “crisp” e “fuzzy”, a primeira abordagem a ser feita é quanto ao universo de discurso e as respectivas fronteiras que delimitam estes conjuntos.

Os conjuntos nebulosos foram definidos por Zadeh como uma classe de conjuntos com uma função contínua característica chamada de pertinência. A pertinência é representada pela letra grega " μ ".

De tal forma, se considerado U um conjunto universo contendo subconjuntos, um conjunto nebuloso X em U é caracterizado por uma função contínua μ_X relacionada a cada elemento de X com um elemento compreendido entre o intervalo real $[0, 1]$. Este número representa o grau de pertinência do elemento x para X . O elemento x de U pertencerá ao conjunto X se, e somente se, $\mu(x) > 0$. Por isso, nesta constituição teórica, os conjuntos “crisp” são considerados um subconjunto dos conjuntos nebulosos onde todos os elementos pertencentes ao conjunto “crisp” possuem função de pertinência $\mu(x) = 1$. O gráfico abaixo apresenta as diferenças entre os conjuntos:

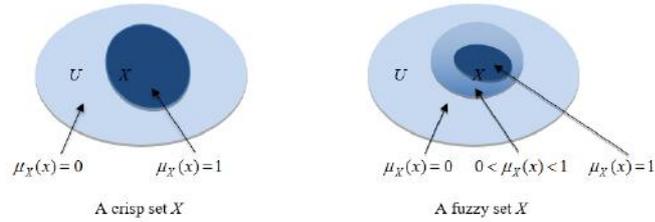


Figura 7: Diferença entre Conjuntos “Crisp” e “Nebulosos”
 Fonte: MORA CAMINO (2017)

Esta abordagem nos permite mapear:

$$\mu_X : U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

Para melhor representar um número nebuloso, o uso de intervalos e segmentos auxiliam na geração de formatos mais adequados às descrições de pertinências aos termos ou estados.

Serão apresentados, então, de maneira a ilustrar algumas das operações que serão expostas à frente, alguns operadores de conjuntos nebulosos.

União:

$$C = A \cup B \leftrightarrow \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (2)$$

Interseção:

$$C = A \cap B \leftrightarrow \mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (3)$$

Complemento:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4)$$

Os operadores de união e interseção satisfazem a dualidade de MORGAN, de forma que:

$$\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B} \quad (5)$$

$$\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B} \quad (6)$$

Assim, de acordo com as proposições, pode-se dizer que a pertinência da união é atingida com o valor máximo das funções de pertinência A e B. Isto é consistente, tal como a noção de possibilidade de ocorrência: da realização de A ou B é equivalente a realização daquele que tem máxima possibilidade de ocorrência.

Estas duas noções são fundamentais para a manipulação dos conjuntos nebulosos, pois na manipulação de dados vagos em um plano de incertezas, faz-se recorrente a comparação entre os conjuntos máximos e mínimos.

A aplicação apresentada por CHEN (1985) no artigo “*Ranking Fuzzy Numbers with Maximizing and Minimizing Set*” em que o autor exhibe um estudo sobre a hierarquização, através de um processo claro de distinção de alternativas, é um belo exemplo de como a manipulação de conjuntos nebulosos, considerando relacionamento entre os conjuntos máximos e mínimos, pode ser aplicada.

3.2 - SISTEMAS ESPECIALISTAS NEBULOSOS

Os sistemas especialistas são sistemas que agregam conhecimento descrito por regras e sentenças de correlação e relacionamento, dos quais, a partir da avaliação das variáveis de entrada, são capazes de processar como saída um resultado.

Os algoritmos são estruturados em seguintes passos :

- 1 – Definição de variáveis linguísticas ;
- 2 – Definição de funções de pertinência ;
- 3 – Desenvolvimento de base de regras nebulosas
- 4 – Fuzzyficação – conversão de dados “crisp” em valores nebulosos utilizando funções de pertinência
- 5 – Inferência – avaliação a partir da base de regras nebulosas
- 6 – Defuzzyficação – conversão de dados nebulosos da saída em dados não nebulosos.

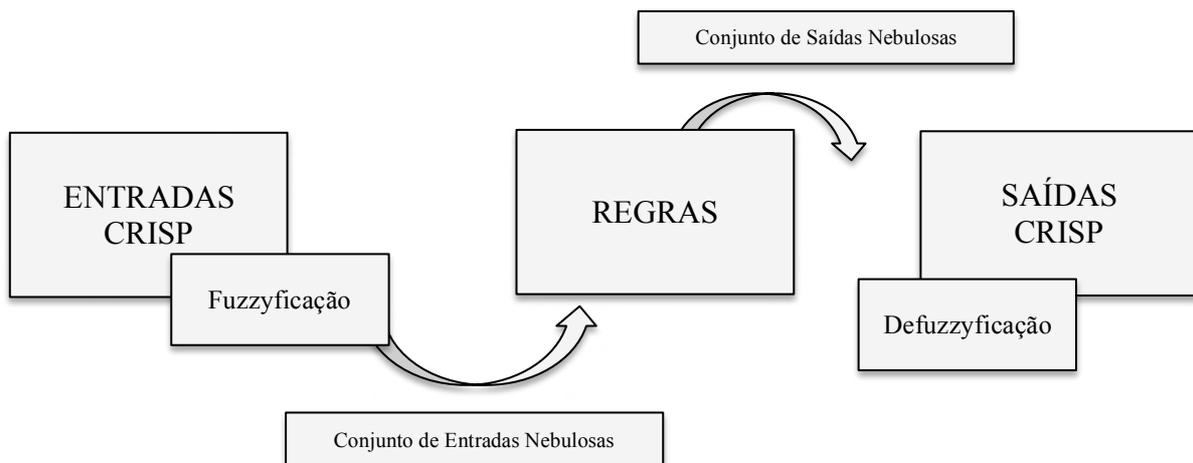


Figura 8: Estrutura Geral de um Sistema Especialista
Fonte: Adaptado de Notas de Aula - Elaboração Própria

Os sistemas especialistas são capazes de simular a tomada de decisão de profissionais experientes que são embarcados em seu sistema de regras nebulosas. As regras "Se-Então" são os meios pelos quais o sistema realiza a operação, aplicando ainda operadores lógicos "não", "e" e "ou".

Estas regras podem ser calibradas por especialistas, informantes, ou refinadas por algoritmos genéticos que simulam a evolução através da realização de grande quantidade de interações e aprendizado em redes neurais.

Modernamente, o computador e sistemas inteligentes são capazes de tomar decisões complexas tais como: realizar julgamentos, avaliações e diagnósticos sobre muitos campos da ciência. Os sistemas são capazes de monitorar ambientes, equipamentos e disparar alarmes calcados na predição de consequências da propagação de eventos inesperados. Estes sistemas são capazes de avaliar e gerenciar conflitos e trazer sistemas em disruptura, ou em descontrole, a uma condição de estabilidade.

O ferramental contido na lógica nebulosa permitiu o desenvolvimento de máquinas com funcionamento inteligente e adequadas ao raciocínio humano que parecem dialogar com o usuário ou atuarem de maneira artificialmente natural.

Hoje, dificilmente, somos capazes de viver nas grandes cidades sem estarmos rodeados por equipamentos de processamento lógico nebuloso.

Dentro da construção do raciocínio que comportam sistemas lógicos estão as regras de condição que relacionam as expressões “se” e “então”, os operadores lógicos “e” e “ou” e outras operações que relacionam condições, conclusões ou consequências relacionadas como saídas do processamento de dados nebulosos e definidos por MAMDANI (1975) *apud* MCNEILL (1994), com aplicação atrelada a sistemas de controle.

O professor da London University, Emrahim MAMDANI, em 1973, orientava o aluno de Ph.D. Sedrak Assilian, que estava construindo uma pequena máquina com caldeira e pistão. Assilian desejava um equipamento que pudesse manter a pressão da caldeira e a velocidade do pistão automaticamente constantes, com um sistema de controle que direcionasse as decisões a partir das próprias leituras e regulasse a pressão e velocidade aos níveis adequados.

A máquina passou, então, a partir de um comando eletrônico a aprender uma infinidade de comportamentos, inclusive erros e acertos.

Quando MAMDANI visualizou a máquina a vapor e o problema apresentado por seu aluno, lembrou-se de um artigo de ZADEH sobre regras IF-THEN e resolveu por aplicá-las.

ZADEH *apud* MCNEILL (1994), caracterizou o experimento como um ponto de mudança para a lógica nebulosa, demonstrando de forma aplicada e prática que os conceitos de sua teoria teriam grande aplicabilidade para controles e tomada de decisão. De fato, a pequena máquina à vapor era a primeira de uma série de lavadoras, câmeras, refrigeradores e até veículos de grande porte que, futuramente, seriam controlados por lógica fuzzy.

MAMDANI considerava a pequena máquina à vapor um brinquedo que proporcionou aos pesquisadores resultados experimentais impressionantes, na medida em que possibilitou a formulação de muitos outros sistemas de regras.

A partir da mensuração de três variáveis, o sistema de controle da máquina realizava uma operação e retornava ao ciclo de leitura, promovendo ajustes ao longo de seu funcionamento envolvendo: erro da pressão, alteração do erro da pressão e mudança de temperatura.

MAMDANI e ASSILIAN consideraram as regras a alma do controle de processos e não só descreveram o funcionamento da máquina, mas também capturaram todas as impressões de operadores experientes. As regras permitiram que a máquina respondesse aos comandos por termos linguísticos com mais eficiência do que instruções numéricas.

Desempenho dos Controladores

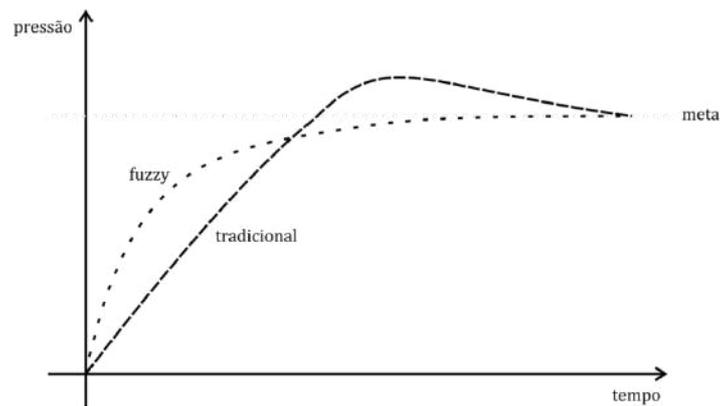


Gráfico 1: Desempenho de Controladores Fuzzy e Tradicional
Fonte: Adaptado de McNeill (1994)

No segmento de modelagem de inteligência artificial, MICHIO SUGENO, pesquisador japonês, fora um dos primeiros cientistas a resgatar os controles nebulosos dos limbos acadêmicos das revistas e periódicos científicos.

Na primeira leitura do artigo de ZADEH, SUGENO estava convencido de que a lógica nebulosa era inferente na concepção de inteligência artificial. Interessado em física teórica, SUGENO chegou a trabalhar por três anos na Mitsubishi Atomic Power em 1972, e passou a integrar o grupo de trabalho de sistemas nebulosos como secretário de TERANO.

O grupo de trabalho estava na ocasião descrevendo a visão dos integrantes sobre os sistemas nebulosos num futuro próximo. SUGENO *apud* MCNEILL (1994), descreveu um computador Fuzzy, uma máquina capaz de tomar decisões como seres humanos a partir de lógica nebulosa.

No ano de 1978, SUGENO inicia o trabalho de criação de sua primeira aplicação fuzzy no Japão: o controle de uma estação de purificação de água para a Fuji Eletric. O sistema era muito complexo e envolvia muitas variáveis com efeitos diferentes no tratamento, resultando na adição de produtos químicos, processos de filtrações etc.

SUGENO inicia o trabalho observando operadores humanos e, posteriormente dividiu em aproximadamente 10 regras nebulosas IF-THEN para simular a ação dos

operadores e reproduziu-as em um sistema similar ao de MAMDANI. Os resultados foram muito satisfatórios e este período de pesquisa levou três anos, de 1980 até 1983.

O próximo desafio de SUGENO (1985) era um projeto desafiador de um robô fuzzy que pudesse estacionar automaticamente um carro a partir de comandos de voz. O trabalho consumiu mais três anos de pesquisa.

Na década de 80 surgem os primeiros fuzzy chips capazes de processar regras com mais poder e velocidade. O trabalho de TOGAI e WATANABE *apud* MCNEILL (1994), tornou possível a programação de um grande número de regras de maneira simples e objetiva. Este passo foi decisivo para a incorporação definitiva da lógica fuzzy em muitos sistemas de controle.

3.3 - MODELO COPPE COSENZA

O modelo COPPE COSENZA é uma das notáveis aplicações de localização, baseado em distâncias relativas e relacionadas obtidas por lógica fuzzy.

O modelo COPPE COSENZA é um típico apropriador de experiência de especialistas aplicados à tomada de decisão. Isso ocorre porque, para aplicação do modelo, a caracterização dos fatores, variáveis, níveis de importância e, principalmente, a abordagem para ponderação dos níveis de experiência dos informantes, são considerados como parte fundamental à computação de resultados.

Considera-se, então, que o modelo compõe um “agente interpretador” que concentra grande experiência e maturidade de diversos especialistas para a tomada de decisão, caracterização e hierarquização de alternativas de atendimento da oferta à demanda.

O modelo aborda a conciliação entre a oferta e a demanda através da análise de fatores individuais (por exemplo, em uma aplicação de localização de zonas de cultivo agropecuário: elementos do clima, características do solo, etc) solicitados pela demanda e caracterizados por níveis de importância (crucial, condicionante, pouco condicionante, irrelevante) ao tipo de cultivo.

Os níveis de importância dos fatores são relativos das ofertas às demandas (por exemplo: altitude para cultivo de mandioca é “indiferente” e para cultivo de uvas “crítico”).

O modelo surgiu em um desafio matemático de hierarquização complexa tratada por lógica fuzzy. O modelo aplica cálculo fuzzy matricial e relacional para entregar matrizes resultantes.

A oferta é então caracterizada como resposta a demanda e os diferentes níveis de oferta passam a interagir em uma matriz de cotejo com os fatores da demanda entregando um nível de atendimento.

Outra surpreendente característica se dá pelo tratamento no cálculo matricial para a ausência na oferta, ausência na demanda, o zero e o conjunto vazio. Em cálculos matemáticos sob a ótica do ferramental clássico, estes valores seriam computados de maneira semelhante ao zero, provocando uma matriz resultante que diverge da realidade. O tratamento lógico com a estrutura do pensamento humano então questiona a limitação do ferramental e propõe um tratamento adequado a esta inconsistência, trazendo sentido a interpretação, ao tratamento da informação e na entrega do resultado final.

A caracterização da ausência sem a utilização do algarismo zero, realiza a quebra de uma das barreiras paradoxais matemáticas, das que reduzem todas as divisões pelo número zero, a resultados iguais a zero, penalizando regiões de resultados válidos.

O devido tratamento aos tipos de ausências resulta em uma interpretação mais fidedigna da realidade, em uma hierarquia obtida por ponderação de fatores, gerais e específicos, relacionados com a caracterização da demanda em todas as suas necessidades.

Além do tratamento relativo ao número zero, o fator gerador de pertinência superior ao índice “um” na oferta, que dentro do contexto de avaliação, demonstra que o instrumental matemático revela valores excedentes às regiões que ofertam mais que as necessidades demandadas, demonstrando que estas regiões apresentam oferta superior.

Na aplicação de localização de zonas econômicas, o modelo COPPE COSENZA reduz o esforço computacional permitindo o tratamento de grande massa de dados a um menor custo de processamento.

A aplicação do modelo COPPE COSENZA abrange diversos campos que vão da robótica, a avaliação de edificações, de produtos, de níveis de segurança ambiental, medicina entre outros.

Neste trabalho, não está se falando do ambiente estável de tomada de decisão. Aquele que existe em condição laboratorial e de comportamento considerado esperado. Está se destacando a outra face da tomada de decisão, a que tem esforço computacional

bruto e que parece estar preparada para qualquer coisa no caminho objetivo de melhorar o desempenho de uma dada atividade frente a incerteza, imprecisão e variabilidade de cenários.

Evidentemente, todo o modelo de tratamento de incerteza e tomada de decisão tem limites e aceitá-los, talvez, seja o caminho correto para a construção de sistemas mais robustos e precavidos.

3.4 - NÚMEROS FUZZY DUAIS

3.4.1 - NÚMEROS DUAIS

Os números duais foram introduzidos por CLIFFORD (1873). O conceito de um número dual pode ser compreendido por um número que possui uma parte primal e uma parte dual que usa notação ε .

As operações da álgebra geométrica têm o efeito de espelhar, girar, traduzir e mapear os objetos geométricos que estão sendo modelados para novas posições. As álgebras de Clifford, em geral, e a álgebra geométrica, em particular, têm sido cada vez mais importantes para a física, a matemática, a geometria e a computação.

Clifford foi o primeiro a sugerir que a gravitação poderia ser uma manifestação de uma geometria subjacente. Em seus escritos filosóficos, ele cunhou a expressão "coisas-da-mente".

O número dual, proposto por Clifford, foi aplicado como parte da Teoria dos Motores, para representação do movimento de hélices em sistemas mecânicos.

3.4.2 - NÚMEROS FUZZY DUAIS

O desenvolvimento teórico de ferramental matemático com aplicação de números nebulosos duais foi publicado por COSENZA e MORA CAMINO (2011).

Os pesquisadores desenvolveram uma complexa abordagem e operadores algébricos adequados para o processamento de informação com variáveis descritas por

números nebulosos duais. O material foi estudado, traduzido e adaptado de estudos, notas, artigos e do mais recente livro publicado pela Elsevier por MORA CAMINO e COSENZA (2017).

De maneira análoga a teoria apresentada por CLIFFORD, MORA CAMINO e COSENZA desenharam uma extensão teórica apropriada para a aplicação de números nebulosos duais, permitindo vasta aplicação em abordagens de avaliação, comparação, hierarquização e etc.

De fato, o novo ferramental, baseado em números nebulosos duais, representa um desdobramento das possibilidades de aplicação de números nebulosos. Os ganhos na descrição de fenômenos reais que foram introduzidos com a utilização de números nebulosos, são ainda maiores, com a utilização de números nebulosos duais.

Um número nebuloso dual, é composto por uma parte primal e uma parte dual, identificada pela notação ε que representa a unidade do número dual puro.

Assim, um conjunto nebuloso dual é definido pelo conjunto Δ de um número de forma $a + \varepsilon b$, onde a é a parte primal e b é a parte dual do número nebuloso dual $\forall a \in R, \forall b \in R^+$.

Um número nebuloso dual perde tanto sua característica dual, quanto seu atributo associado a parte dual, se “b” é igual a zero.

Os limites (L) superiores e inferiores de $(a + \varepsilon b)$ são dados por:

$$\text{Lim}^{\text{inf}}(a + \varepsilon b) = a - b \quad \text{e} \quad \text{Lim}^{\text{sup}}(a + \varepsilon b) = a + b. \quad (7)$$

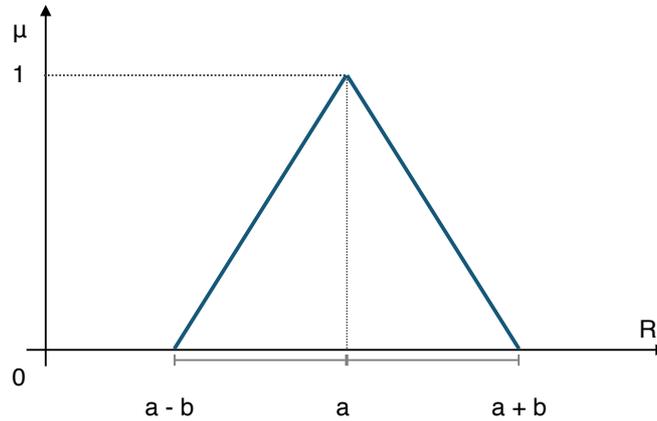


Gráfico 2: Típico Número Fuzzy Dual $a + \varepsilon b$
 Fonte: MORA CAMINO e COSENZA (2017)

Para o número nebuloso dual, um *pseudo norm* é definido por

$$||a + \varepsilon b|| = |a| + \rho b \in R^+ \quad (8)$$

onde $\rho > 0$ é o parâmetro que define a forma do número nebuloso dual.

O parâmetro que define a forma é dado por

$$\rho = (1/b) \int_{-b}^b \mu(u) du \quad (9)$$

onde μ é a função de pertinência.

Abaixo apresentamos representação gráfica de diversos números nebulosos duais com diferentes parâmetros de forma.

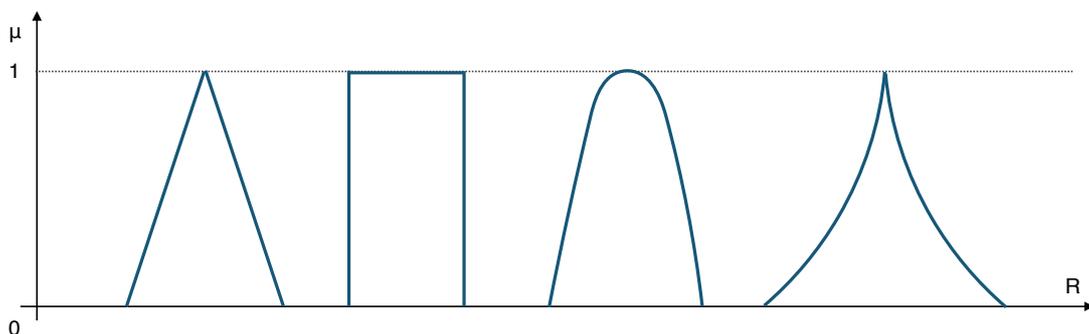


Gráfico 3: Diferentes formatos de Números Fuzzy Duais
 Fonte: MORA CAMINO e COSENZA (2017)

Como descrito por MORA CAMINO (2011), as seguintes propriedades do *pseudo norm* são mantidos, não importa que valor o parâmetro de forma assuma:

$$\forall a + \varepsilon b \in \Delta: ||a + \varepsilon b|| > 0 \quad (10)$$

$$\forall a \in R, \forall b \in R^+ \quad ||a + \varepsilon b|| = 0 \Rightarrow a = b = 0 \quad (11)$$

$$||(a + \varepsilon b) + (\alpha + \varepsilon \beta)|| \leq ||a + \varepsilon b|| + ||\alpha + \varepsilon \beta|| \quad \forall a, \alpha \in R, \forall b, \beta \in R^+ \quad (12)$$

$$||\lambda(a + \varepsilon b)|| = \lambda ||(a + \varepsilon b)|| \quad \forall a \in R, \forall b, \lambda \in R^+ \quad (13)$$

3.4.2.1 - OPERAÇÕES COM NÚMEROS FUZZY DUAIS

3.4.2.1.1 - OPERAÇÕES ARITMÉTICAS COM NÚMEROS FUZZY DUAIS:

O elemento neutro nebuloso dual é dado por:

$$\tilde{0} = (0 + \varepsilon 0) \quad (14)$$

A multiplicação do elemento neutro nebuloso dual é dada por:

$$\tilde{1} = (1 + \varepsilon 0) \text{ e apenas os números não zero críps possuem um inverso.}$$

A adição nebulosa dual de dois números nebulosos, determinada pelo operador $\tilde{+}$, idêntica a adição de números duais, é dada por:

$$(a_1 + \varepsilon b_1) \tilde{+} (a_2 + \varepsilon b_2) = (a_1 + a_2) + \varepsilon(b_1 + b_2) \quad (15)$$

O produto nebuloso dual de dois números nebulosos duais, determinada pelo operador $\tilde{\cdot}$, é dada por:

$$(a_1 + \varepsilon b_1) \tilde{\cdot} (a_2 + \varepsilon b_2) = (a_1 \cdot a_2 + \varepsilon(|a_1| \cdot b_2 + |a_2| \cdot b_1)) \quad (16)$$

O produto nebuloso dual é construído de uma maneira em que a interpretação nebulosa da parte dual é preservada, mas é diferente dos cálculos duais clássicos.

Ambas as operações, adições e multiplicações nebulosas duais são comutativas e associativas, enquanto que, a multiplicação nebulosa dual é, ainda, distributiva com respeito as operações nebulosas duais de adição.

A propriedade nilpotente do cálculo nebuloso dual para o operador ε é mantida:

$$\varepsilon \tilde{\cdot} \varepsilon = \varepsilon^2 = \tilde{0} \quad (17)$$

3.4.2.1.2 - VETORES NEBULOSOS DUAIS

Considerando E como espaço Euclidiano de dimensão p em R , constrói-se um conjunto \tilde{E} composto por um par de vetores, nos quais chamamos vetores nebulosos duais, extraídos do produto cartesiano $E \times E^+$, onde E^+ é o meio espaço de E em bases canônicas. As seguintes operações são definidas em \tilde{E} :

Adição:

$$(a,b) + (c,d) = (a+c, b+d) \quad \forall a,b \in E \quad \forall c,d \in E^+ \quad (18)$$

Multipliação por um nebuloso dual $\lambda + \varepsilon \mu$:

$$(\lambda + \varepsilon \mu)(a,b) = (\lambda a, |\lambda| b + \mu |a|) \quad \forall \lambda + \varepsilon \mu \in \tilde{\Delta}, \forall (a,b) \in \tilde{E} \quad (19)$$

$$\text{Então } (a,b) = a + \varepsilon b \quad \forall (a,b) \in \tilde{E}$$

, onde a parte dual do vetor nebuloso dual $a + \varepsilon b$ é dado por:

$$r(a + \varepsilon b) = a \quad \text{e} \quad d(a + \varepsilon b) = b, \text{ respectivamente.} \quad (20)$$

O pseudo dual produto escalar é definido como:

$$u * v = R(u).R(v) + \varepsilon (|R(u)|.D(v) + D(u).|R(v)|) \quad \forall u, v \in \tilde{E} \quad (21)$$

, onde “*” representa o produto interno em \tilde{E} e “.” representa o produto E .

Dois vetores nebulosos duais u e v são ditos ortogonais se $u * v = \tilde{0}$ onde $\tilde{0}$ é o elemento neutro.

Para o vetor dual u em \tilde{E} com $R(u) \neq 0$, a norma Euclideana $\| \cdot \|$ associada a E é dada por:

$$\|u\|_D = \|R(u)\| + \rho |R(u)| \cdot D(u) / \|R(u)\| \quad (22)$$

Se $u = \tilde{0}$, $\|u\|_D = \tilde{0}$ implica na existência de uma norma pseudo nebulosa dual

enquanto as bases ortogonais podem ser consideradas em \tilde{E} .

3.4.2.1.3 - MATRIZES NEBULOSAS DUAIS

O conjunto \tilde{M}_n de matrizes nebulosas de ordem $n \times n$ é construído sob a mesma lógica que os números nebulosos duais e os vetores nebulosos duais. Assim, a matriz nebulosa dual será definida por:

$$A = [a_{ij}] = [r(a_{ij}) + \varepsilon d(a_{ij})] = r(A) + \varepsilon d(A) \quad (23)$$

, onde $r(A)$ é uma matriz $R^{n \times n}$ e $d(A)$ é uma matriz positiva $R^{n \times n}$.

As operações básicas para matrizes nebulosas duais quadradas serão definidas da seguinte maneira:

$$A + B = R(A) + R(B) + \varepsilon (D(A) + D(B)) \quad \forall A, B \in \tilde{M} \quad (24)$$

$$A \cdot B = R(A) R(B) + \varepsilon (|R(A)| \cdot D(B) + D(A) |R(B)|) \quad \forall A, B \in \tilde{M} \quad (25)$$

$$\lambda A = R(\lambda) R(A) + \varepsilon (|R(\lambda)| D(A) + D(\lambda) |R(A)|) \quad \forall \lambda \in \tilde{\Delta}, \forall A \in \tilde{M}_3 \quad (26)$$

O produto de matrizes nebulosas quadradas por um vetor nebuloso dual u é considerado neste contexto como sendo um vetor nebuloso dual expresso por:

$$A \times u = R(A)R(u) + \varepsilon (|R(A)| D(u) + D(A) |R(u)|) \quad (27)$$

3.4.2.1.4 - ORDENAÇÃO ENTRE NÚMEROS NEBULOSOS DUAIS

Quando comparados dois números nebulosos duais entre si, apenas quatro diferentes situações são possíveis. Estas situações são apresentadas na figura abaixo e posteriormente declaradas matematicamente.

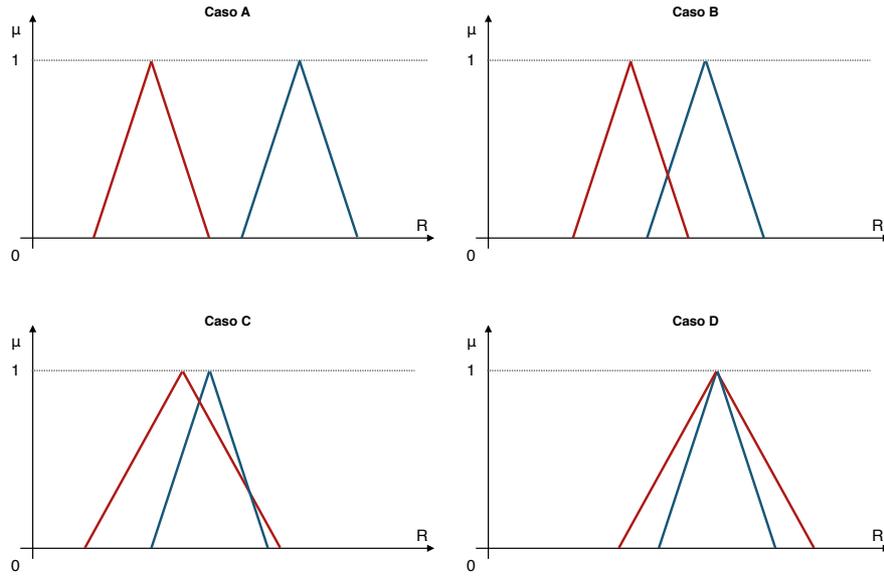


Figura 9: Comparação entre dois Números Fuzzy Duais
 Fonte: Adaptado de MORA CAMINO e COSENZA (2017)

O Caso A, representa uma situação relativa de parte forte, escrita por \succsim , que é definido sobre $\tilde{\Delta}$ por:

$$\forall a_1 + \varepsilon b_1, a_2 + \varepsilon b_2 \in \tilde{\Delta} : a_1 + \varepsilon b_1 \succsim a_2 + \varepsilon b_2 \Leftrightarrow a_1 - \rho b_1 \succ a_2 + \rho b_2 \quad (28)$$

O Caso B, a representação relativa da parte média, escrita por \succ que é definida sobre $\tilde{\Delta}$ por:

$$\begin{aligned} \forall a_1 + \varepsilon b_1, a_2 + \varepsilon b_2 \in \tilde{\Delta} : a_1 + \varepsilon b_1 \succ a_2 + \varepsilon b_2 \\ \Leftrightarrow a_1 + \rho b_1 \succ a_2 + \rho b_2 \succ a_1 - \rho b_1 \end{aligned} \quad (29)$$

O Caso C, a representação relativa da parte fraca, escrita por \succleftarrow que é definida sobre $\tilde{\Delta}$ por:

$$a_1 > a_2, a_1 - \rho b_1 \succ a_2 - \rho b_2, a_1 + \rho b_1 \precleftarrow a_2 - \rho b_2 \quad (30)$$

O Caso D, de representação de igualdade entre dois números nebulosos duais, escrita por \cong que é definida sobre $\tilde{\Delta}$ por:.

$$a_1 = a_2 \quad \text{and} \quad b_1 = b_2$$

Desta forma, existe sempre a possibilidade de estabelecer um ranking entre dois números nebulosos duais e realizar uma avaliação qualitativa para a comparação (forte, média, fraca ou equivalente). Quando as condições são satisfeitas, podemos afirmar que uma alternativa representada por um número nebuloso dual $a_1 + \varepsilon b_1$ é melhor do que $a_2 + \varepsilon b_2$ e vamos escrever da seguinte maneira:

$$a_1 + \varepsilon b_1 > a_2 + \varepsilon b_2 \quad (31)$$

O Grau de Certeza c pode ser endereçado a esta comparação. A obtenção deste grau de certeza é obtida pela seguinte equação:

$$c = 1 - \frac{1}{2} \min\left\{\frac{\alpha}{b_1}, \frac{\alpha}{b_2}\right\}$$

$$\text{se } a_1 \geq a_2 \quad \text{e} \quad c = \frac{1}{2} \min\left\{\frac{\alpha}{b_1}, \frac{\alpha}{b_2}\right\} \quad \text{se } a_1 < a_2, \quad (32)$$

onde α é a área de interseção entre os números nebulosos duais:

$$(a_1 + \varepsilon b_1) \text{ e } (a_2 + \varepsilon b_2) \quad (33)$$

Nos casos acima apresentados, temos os graus de incerteza calculados abaixo:

Caso A: $c = 1,0$

Caso B: $c = 0,9$

Caso C: $c = 0,7$

Caso D: $c = 0,5$

De acordo com a complexidade associada às operações básicas de cálculo com números fuzzy duais, estes representam um compromisso entre o grau de detalhamento da incerteza de um parâmetro nebuloso e o volume de cálculo necessário para seu tratamento num processo decisório.

CAPÍTULO 4 – OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE VÔO

4.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo, as principais funções desenvolvidas pelos modernos sistemas de gestão de vôo são apresentados, brevemente, então as estruturas gerais de custos de vôo de aeronaves comerciais são expostas e, em seguida, os índices estratégicos e táticos de custos são apresentados.

Então, é construído um modelo baseado em lógica fuzzy para geração de um Tatic Cost Index, aplicando conhecimentos de sistemas especialistas em uma estrutura de dois estágios, e finalmente, apresenta-se um estudo de caso.

Em meados dos anos 80, um novo sistema aviônico, o Flight Management System (FMS), foi introduzido em aeronaves de transporte modernas com o objetivo de melhorar a eficiência econômica de cada vôo, propondo diferentes ferramentas para gerenciar de forma mais eficiente os vôos.

O núcleo deste sistema é um módulo de otimização da trajetória que minimiza o custo total do vôo, considerando que ele é composto de um lado dos custos de combustível (*fuel costs*) e do outro lado dos custos relacionados ao tempo (*time related costs*). Surge neste momento, uma a escala entre esses dois tipos de custos, representada pelo parâmetro de Cost Index, que desempenha um papel importante para moldar o plano de vôo resultante. É a companhia aérea ou o piloto, que é responsável por definir o valor desse parâmetro. Enquanto um Cost Index pode ser computado, a priori, para um determinado vôo usando meios informáticos, há uma necessidade clara e real, de oferecer ao piloto uma ferramenta *on-board* para produzir um valor eficiente de Cost Index, considerando o atual status de um vôo.

Neste texto, os termos Strategic Cost Index e Tatic Cost Index são usados para se referir as duas situações diferentes. Embora existam, no caso do Strategic Cost Index, que é previamente definido, muitos estudos realizados e publicados na literatura, no caso real de aplicação do Tatic Cost Index, as companhias aéreas adotaram abordagens

práticas baseadas no julgamento do piloto, para adaptar o valor do Cost Index durante o voo.

Uma vez que a variação de muitos componentes dos custos de voo relacionados ao tempo não podem ser avaliadas com alta precisão e, uma vez que muitos fatores contribuem de forma complexa para o desempenho geral do voo, estas condições fazem da Lógica Fuzzy um ideal candidato para atender a esta necessidade e evitar a atribuição ao piloto de realização de cálculos complexos.

Neste capítulo, as principais funções desenvolvidas pelos modernos sistemas de gestão de voo são apresentados, seguidos da estrutura geral de custos de voo de aeronaves comerciais e, finalmente, os índices estratégicos e táticos de custos são apresentados.

Então é construído um modelo baseado em lógica fuzzy para geração de Tatic Cost Index, aplicando conhecimentos de sistemas especialistas em uma estrutura de dois estágios e apresenta-se um breve estudo de caso, com intuito de exemplificar a abordagem do sistema através de uma descrição bastante realista.

4.2 - SISTEMA DE GESTÃO DE VÔO (FLIGHT MANAGEMENT SYSTEM)

O desenvolvimento, em meados dos anos 80, do Flight Management System (FMS) para operar jatos comerciais representa uma grande evolução no sentido de assegurar a eficiência econômica dos vôos pela indústria de transporte aéreo, que tem como desafio econômico enfrentar crescentes preços dos combustíveis.

De fato, dados apresentados pelas empresas aéreas em todo mundo comprovam que o combustível de aviação envolve 30% a 40% do custo de uma operação, reduzindo margens e representando uma real necessidade de gestão acurada na busca de melhores desempenhos econômicos pelas empresas aéreas. Nesta direção, estudos econômicos apontam para diferentes estratégias que envolvem contratos futuros, tanqueamento programado em regiões com incentivos fiscais, otimização do uso com desenho de melhores trajetórias etc.

O que é proposto aqui é a introdução de um processo de atualização tática do Cost Index que permite a otimização individual de um voo, e que contribui para uma gestão de uma rede (Network Cost Index) que atrelada a outras estratégias econômicas e tendem a minimizar os impactos dos elevados custos com combustíveis nas operações de transporte aéreo.

A introdução do FMS conduziu a indústria para uma completa reorganização das interfaces entre os pilotos e os sistemas aviônicos, com redesenho de novas e adequadas operações de cabine.

Duas unidades básicas compõem o FMS: uma unidade computacional (CDU ou MCDU) e uma unidade de exibição (Display Unit). A capacidade computacional do CDU permite lidar com uma variedade de funções integradas de orientação e gerenciamento de vôos. A unidade de exibição de controle (CDU ou MCDU) é a principal Interface HMI (Human Machine Interface) para entrada de dados e exibição de informações. O Flight Management System (FMS) dá suporte a funções inter-relacionadas, como: navegação, planejamento de vôo, previsão de trajetória, cálculos de desempenho e orientação.

Com o objetivo de alcançar estas funções, a interface do Flight Management System (FMS) realiza interações com outros sistemas aviônicos, representado pelas seguintes categorias genéricas:

- Navigation sensors and radios
 - Inertial/attitude reference systems
 - Navigation radios
 - Air data systems
- Displays
 - Primary flight and navigation
 - Multifunction

- Engine
- Flight control system
- Engine and fuel system
- Data link system
- Surveillance systems

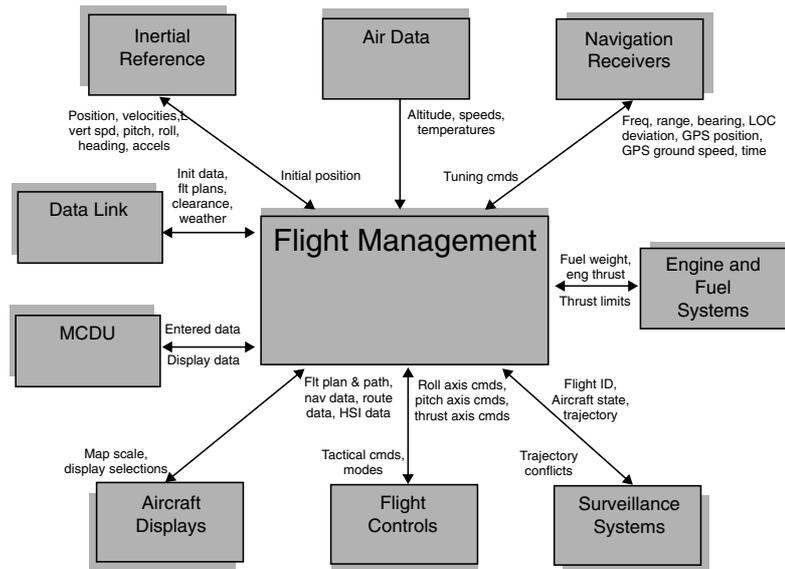


Figura 10: Diagrama de Bloco de uma Interface Típica
 Fonte: Randy Walter – Smiths Industries

O FMS está disponível em diferentes níveis de capacidades de oferta de funções, de acordo com a diversidade do mercado da aviação, para atender e operar em diferentes modelos de aeronaves. É possível encontrar FMS com funções que possuem desde simples navegadores laterais ponto-a-ponto, até os melhores sistemas FMS (estado da arte) que promovem sistemas de planejamento / trajetórias de vôo otimizados em quatro dimensões (4D ou também chamado 3D + T).

4.2.1 - PRINCIPAIS FUNÇÕES DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE VÔOS

As principais funções desenvolvidas pelo Sistema de Gerenciamento de Vôo de aeronaves de transporte modernas são:

- A função de navegação: que é responsável por calcular a melhor estimativa da posição atual e da velocidade da aeronave;
- A função de planejamento de vôo: que permite que a equipe estabeleça um roteamento eficiente para a aeronave;
- A função de predição da trajetória: que calcula as previsões de tempo de vôo em tempo, as previsões de tempo de chegada e o combustível restante ao longo da rota planejada;
- A função de desempenho: que gera informações de desempenho para os pilotos, como velocidade de descolagem, capacidade de altitude e avisos de otimização de perfil;
- A função de orientação: que produz valores de referência para o sistema de guia automático para que a aeronave siga perfis laterais e verticais efetivamente calculados.

A base principal para essas funções são diferentes bancos de dados:

- O banco de dados de navegação: que contém informações atualizadas sobre auxílios de navegação e procedimentos nominais nos aeroportos;
- O banco de dados de desempenho da aeronave: que contém dados aerodinâmicos e dados de desempenho do motor;
- O banco de dados de rotas da empresa: que contém rotas predefinidas entre pares de aeroportos.

4.2.1.1 - A FUNÇÃO DE PLANEJAMENTO DE VÔO

Esta função é de particular interesse para o presente estudo. O sistema de gerenciamento de vôo (FMS), a bordo de aeronaves de transporte modernas, permite

que os pilotos gerenciem vôos comerciais do aeroporto de partida para o aeroporto de destino.

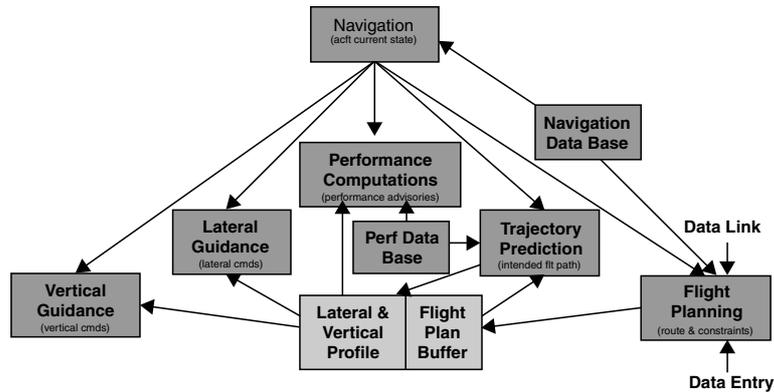


Figura 11: Diagrama de Bloco das Principais Funções do Computador de Bordo

Fonte: Randy Walter – Smiths Industries

A função de planejamento de vôo do FMS gera um plano de vôo composto por uma faixa indexada no tempo e um perfil vertical. A trajetória de vôo (Figura 12) define o caminho de vôo horizontal pretendido. É composto por pontos de referência (way points) presentes no banco de dados de navegação do FMS, correspondente em geral, para pontos de navegação terrestre, e de pontos de referência virtuais (virtual waypoints) inseridos manualmente. O perfil vertical (Figura 13) fornece a velocidade e altitude pretendidas ao longo da trajetória.

Os planos de vôo geralmente são construídos a partir de dados já armazenados nos bancos de dados do FMS. Esses dados são compostos principalmente por:

- Segmentos de vôos candidatos, como Partidas Padrão por Instrumentos (SIDs – *Standart Instrument Departures*) e Rotas Padrão de Chegada ao Terminal (*STAR - Standart Terminal Arrival Routes*), que são publicados pelas autoridades da aviação civil e, portanto, não podem ser modificados pelo piloto;
- Rotas da empresa, que podem ser alteradas pelo piloto a qualquer momento da operação.

Se nenhuma rota aceitável estiver disponível no banco de dados de Rotas de Vôo da empresa, o piloto deve construir, manualmente, todo o Plano de Vôo por meio da inserção de dado referentes aos identificadores de cada um dos waypoint que compõem

a trajetória de voo desejada, através da interface da Unidade de Exibição de Controle Multiuso (MCDU).

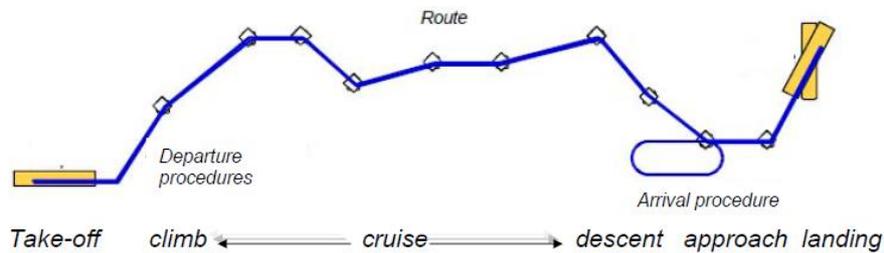


Figura 12: Perfil Horizontal da Trajetória de um Plano de Voo
Fonte: MORA CAMINO et al. (2015)

O perfil vertical (Figura 13) é composto da decolagem, escalada, cruzeiro, descida, aproximação e pouso.

Todo o perfil vertical pode ser otimizado usando técnicas clássicas de programação matemática, ou mais avançadas, que permitem processar de forma mais eficiente os dados de desempenho da aeronave.

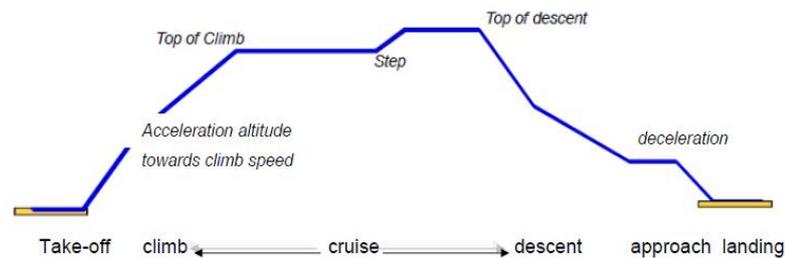


Figura 13: Perfil Vertical da Trajetória de um Plano de Voo
Fonte: MORA CAMINO et al. (2015)

- Para a fase de decolagem, o FMS calcula parâmetros como o empuxo necessário para a decolagem, velocidades diferentes, como a velocidade de decisão de decolagem (a qual o piloto ainda pode abortar a decolagem), a velocidade em que a aeronave se torna mais leve que o ar (a qual os aspectos aerodinâmicos atingem equilíbrio) e a velocidade de decolagem (o qual a aeronave pode angular para obtenção de altitude).

- Para a fase de subida, o FMS calcula o empuxo e a velocidade de subida na altitude de redução de empuxo, a aceleração da velocidade de subida econômica e a altitude de mudança de aceleração.

- Para a fase de cruzeiro, o FMS calcula os diferentes níveis de cruzeiro e velocidades ou números de Mach, bem como os pontos de mudança de nível entre o ponto de superior (Step Climb) e o ponto superior de descida (Top of Descent).

- Para a fase de descida, o FMS define a posição da parte superior da descida (Top of Descent), considerando todas as restrições de descida e as velocidades sucessivas a serem adotadas.

- Para a fase de aproximação, o FMS define a velocidade de aproximação e a configuração de aterrisagem.

Finalmente, o tempo estimado de chegada (*ETA – Estimated Time to Arrival*), bem como o combustível estimado a bordo (*EFOB – Estimated Fuel on Board*) à chegada são produzidos.

4.3 - COMPOSIÇÃO DO PLANO DE VÔO VERTICAL

A otimização de perfil de vôo é baseada na utilização de um cálculo de programação dinâmica, proposto por BELLMAN (1957), dividida pelos diferentes estágios do vôo, para realizar otimização de trajetórias.

A aplicação utiliza o modelo de tomada de decisão multi estágio para otimizar a trajetória em situações de recuperação de tempo ou de uso de mínimo combustível.

4.3.1 - VARIÁVEIS DO PLANO VERTICAL DE VÔO

O plano vertical de vôo dá ao FMGS (Flight Management and Guidance System) todos os dados necessários para a predição do desempenho. Os dados são inseridos pela tripulação da aeronave ou calculado pelo FMS (Flight Management System).

Os dados são divididos em três categorias principais:

- 1) Dados Estratégicos que são aplicados para todos os perfis de vôo:
 - a. COST INDEX (CI)
 - b. CRUISE FLIGHT LEVEL (CRZ FL)
 - c. Zero-Fuel Weight (ZFW)
 - d. Zero-Fuel Weight Center of Gravity (ZFWCG)
 - e. Block Fuel
- 2) Dados Climáticos
 - a. Winds
 - b. Sea Level Atmospheric Pressure (QNH) at destination
 - c. Surface Temperature (TEMP) at destination
 - d. Temperature in cruise phase
 - e. The Tropopause altitude
- 3) Dados Táticos
 - a. Condições para a Mudança de Fase no Perfil de Vôo
 - i. Setting of the thrust levels to takeoff-go-around (TOGA) or FLEX positions
 - ii. Reaching acceleration altitude (ACCEL ALT)
 - iii. Entering cruise (Top of Climb, T/C)
 - iv. Initiating Descent (Top of Descent, T/D)
 - v. Passing a deceleration pseudo waypoint (DECEL PSEUDO WPT)
 - vi. Touchdown
 - b. Perfil de Velocidade
 - i. V2
 - ii. Economy Climb Speed or Mach (ECON CLB SPD/MACH)
 - iii. Preselected Speed or Mach (SPD/MACH PRESELECTION)
 - iv. Economy Cruise Mach (ECON CRZ MACH)
 - v. Economy Descent Mach (ECON DES MACH/SPD)
 - vi. Approach Speed (VAAP)

- c. Limitações Verticais
 - i. Speed Limit (SPD LIMIT)
 - ii. Speed and Altitude Constrains (SPD AND ALT CSTR), Time Constrain (se instalado).

O piloto usa a revisão do perfil vertical através da modificação de:

- Speed Limit in the Climb and Descent Phases
- Restrições de altitude e velocidade
- Step Climb ou Step Descent
- Novos dados sobre a condição dos Ventos
- Inserção de uma restrição de Tempo

Cabe comentar, ainda, sobre as restrições do perfil vertical, que existem instruções que o piloto insere ao longo do voo, tanto para velocidade e altitudes, o atendimento de necessidades de Controle de Tráfego Aéreo.

Speed Limit: associada à altitude, como restrição da velocidade máxima para uma específica altitude.

Restrição de Altitude: pode ser associada a específicos waypoints nas fases de climb, descent, ou fase de approach. Para cumprir uma restrição de altitude, a aeronave precisa navegar sobre o waypoint com a altitude de restrição igual, inferior ou superior especificado pela tripulação ou base de dados de navegação. Uma restrição de altitude é considerada perdida se o sistema identifica mais de 250 pés de diferença entre o valor da altitude da restrição e a altitude da aeronave. As restrições de altitude são observadas nas fases de CLB ou DEC ou em modo de APP NAV-FINAL.

Restrições de Velocidade: pode ser associada a qualquer waypoint, exceto para o waypoint de origem.

Inicia-se, então, pelo entendimento das fases de um voo e, conseguinte, a organização das principais equações que serão utilizadas no modelo.

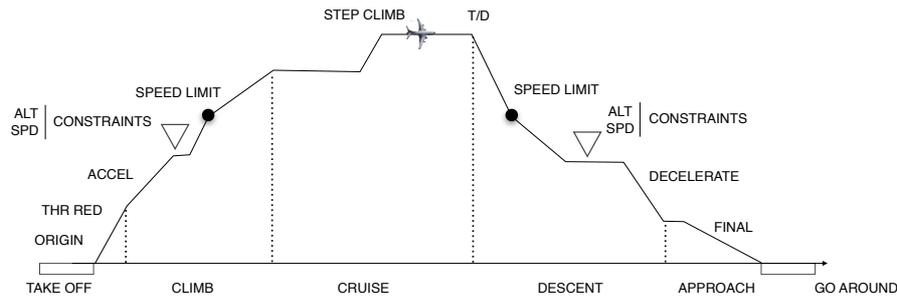


Figura 14: Perfil Vertical da Trajetória de um Plano de Vôo
 Fonte: MORA CAMINO et al. (2015)

Os diferentes estágios serão considerados ao longo das fases: TAKE OFF, CLIMB, CRUISE, DESCENT, APROACH, GO AROUND;

Para a definição das variáveis de estado para este sistema, temos:

Velocidade da Aeronave	V_a
Altitude	Z
Distância Percorrida	x
Massa da Aeronave	m

5.3.1.1 - EQUAÇÕES DA DINÂMICA DE CONTROLE DA AERONAVE NO PLANO VERTICAL:

Considera-se o vetor de estado seguinte, descrito em WALTER (2001), para formalizar via equações de estado a dinâmica vertical da aeronave:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} V_a \\ Z \\ x \\ m \end{bmatrix} \quad (34)$$

com as seguintes equações diferenciais para representação de seu estado:

$$\dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{Z} \\ \dot{x} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T-D}{m} - g \cdot \sin \gamma \\ V_a \cdot \sin \gamma \\ V_a \cos \gamma + V_w \\ -Q\rho_f \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde T é a força de empuxo das turbinas; D a força de arrasto aerodinâmico; g é a aceleração padrão de um corpo em queda livre (gravidade); V_w é a velocidade do vento; γ é angulação da aeronave, e ρ_f a massa volumétrica do combustível (kg/l).

As equações têm boa representação para o estado do vôo porque $T = T(Q, Z, V_a)$ e $D = D(Z, V_a)$.

Temos as variáveis de controle Q e γ , onde Q é relacionado a posição do acelerador e γ é relacionada a posição do manche.

Assume-se então:

$$\dot{\underline{X}} = f(t, \underline{X}, \underline{U}) \quad (36)$$

onde:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} V_a \\ Z \\ x \\ m \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (37)$$

Adiciona-se, a este sistema, as restrições de estado para a prevenção de ocorrências indesejadas, tais como: Stall e Overspeed, Altitude e, porque não, de Tempo que pode ser atrelada a qualquer posição do vôo, exceto a posição de origem.

Para Stall e Overspeed:

$$V_{max}(Z) \geq V(x) \geq V_{min}(Z) \quad (38)$$

$$x \in [x_0, x_f] \quad , \quad Z \in [Z_0, Z_f]$$

Para Restrições de Altitude como situação de ponto intermediário do vôo:

$$\alpha_{min} \geq \alpha(x) \geq \alpha_{max} \quad Z(x) \geq h_G(x) \quad , \quad x \in [x_0, x_f] \quad (39)$$

Define-se o estado inicial do sistema onde temos condições iniciais completamente definidas:

$$V(0), Z(0), x(0), m(0) \quad (40)$$

As condições finais não são completamente definidas uma vez que a massa final m_f é desconhecida.

$$V(t_f) = V_f, \quad Z(t_f) = Z_f, \quad x(t_f) = x_f, \quad m(t_f) = \text{desconhecida}$$

Destaca-se neste estudo então, algumas considerações sobre a incerteza em variáveis de definição do perfil vertical da trajetória, enquanto fatores limitantes de um processo de otimização mais aderente a realidade.

Das variáveis que implicam no estado \underline{X} que podem assumir incertezas associadas, e que influenciam diretamente no resultado da otimização, pode-se destacar:

- a velocidade dos ventos V_w , que pode ser considerada fuzzy dual na forma:

$$V_w + \varepsilon W_w \quad (41)$$

- a massa inicial da aeronave m_i , que pode ser considerada fuzzy dual e assumir a forma:

$$m_i + \varepsilon \zeta_i \quad (42)$$

- a quantidade volumétrica de combustível, ρ_f , que pode ser considerada fuzzy dual e assumir a forma:

$$\rho_f + \varepsilon \xi_f \quad (43)$$

Como citado na conclusão do capítulo anterior, em que são exibidos os passos de otimização da trajetória, em especial de seu perfil vertical, uma pequena exploração das incertezas implícitas, comprovam que as considerações das variáveis componentes do sistema podem carregar incertezas que influenciam diretamente no cálculo final da otimização.

Acima destacam-se três diferentes níveis de incerteza: a incerteza quanto aos eventos climáticos que são influentes principalmente em vôos longos (grau de incerteza alto), a massa da aeronave que possui uma incerteza a partir da consideração de pesos médios aos passageiros (grau de incerteza médio), e a quantidade volumétrica do combustível embarcado (grau de incerteza pequeno).

Embora não tratado neste trabalho, diretamente, ao longo da pesquisa desta tese, percebeu-se que o algoritmo atual que nos fornece dados finais de tempo de chegada ao destino (ETA) e combustível embarcado ao final da operação (EFOB), poderá apresentar resultados de otimização com desvios pequenos da realidade por influência de variáveis incertas inseridas no computador de bordo.

Como exemplo, no momento mais crítico de consumo de consumo de combustível, fase de decolagem e subida ao estágio de cruzeiro, a incerteza da massa da aeronave (superestimada ou subestimada) poderá fornecer como saída uma angulação de subida e velocidades inadequadas ao estado ótimo real.

4.4 - CUSTOS ASSOCIADOS AO PERFIL DE VÔO

4.4.1 - COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DO VÔO

Os custos operacionais de um vôo podem ser divididos em custos operacionais diretos e custos operacionais indiretos (EUROCONTROL, 2004).

Os custos indiretos estão relacionados a atividades de suporte da retaguarda do vôo, tais como treinamento de pessoal, serviços de passageiros, administração, equipamentos de manutenção de aeronaves, etc.

Os custos operacionais diretos estão ligados e relacionados à operação do vôo. Eles são compostos principalmente de custos de combustível (cerca de 35%), salários da equipe, custos de seguro, taxas de navegação e taxas de aterrissagem, custos de manutenção, juros de depreciação sobre o capital e taxas de movimentação em terra no aeroporto.

O custo total de um vôo específico C_{TRIP} pode ser expresso como a soma dos custos variáveis que dependem das decisões tomadas para uma realização específica do vôo e de custos fixos que não são específicos de uma determinada realização de vôo.

Este Custo Total pode ser escrito em um primeiro momento (AIRBUS, 1998) como:

$$C_{TRIP} = C_c + C_{Nav} + C_F \cdot F + C_T \cdot T \quad (44)$$

onde: C_{TRIP} é custo total do vôo específico (€), C_c representa os custos fixos (€), C_F é o custo unitário do combustível (€ / kg), C_T é o custo unitário do tempo (€ / min) e C_{Nav} são as taxas de navegação específicas da rota (€), T é a duração total do vôo (min) e F é a queima de combustível (kg) durante esse vôo.

Os custos fixos são comuns a diferentes realizações do mesmo vôo e, eles apenas variam com a utilização da aeronave, são geralmente computados anualmente. Estes custos são compostos por: custos de arrendamento mercantil, custos financeiros, custos de seguro, salários trabalhistas de manutenção, salários base da equipe, salários trabalhistas administrativos e operacionais, depreciação e custos de manutenção planejados, de acordo com a utilização da aeronave.

As tarifas de navegação dependem das rotas (origens e destinos) e, portanto, não podem ser incluídas nos custos fixos, pois de acordo com as condições meteorológicas e de trânsito, os segmentos de vôo podem mudar de uma operação para a próxima para o mesmo vôo comercial.

As tarifas de navegação são estabelecidas de acordo com os sistemas regionais de tarifas de rotas para recuperar as despesas de serviço das instalações de Controle de Tráfego Aéreo (ATC) nessas regiões. Em geral, eles dependem do Peso Máximo de Decolagem (*MTOW*) da aeronave que executa o vôo e da distância entre os pontos de entrada e saída na região de controle de tráfego.

A estimativa do custo do combustível embarcado para um determinado vôo pode ser uma questão complexa, uma vez que o preço de aquisição do combustível varia de um lugar para outro, dependendo das quantidades relativas fornecidas e dos preços do mercado local. As práticas das companhias aéreas, como o transporte de combustível e o hedging de combustível, podem tornar esta estimativa ainda mais complicada.

Os custos que são considerados como relacionados ao tempo estão de alguma forma relacionados com o tempo gasto em operação no ar ou taxiando para lugares de estacionamento nos aeroportos.

4.4.1 - CUSTOS DE VÔO RELACIONADOS AO TEMPO

Estes custos são compostos por custos de manutenção por hora, tripulação de vôo e tripulação de cabine por hora de vôo, depreciação marginal ou custos de arrendamento mercantil, dependendo da propriedade da aeronave e da duração do tempo de vôo.

Quando uma aeronave chega no destino antes do cronograma, isso pode causar alguns problemas com procedimentos de aterrissagem, posições de estacionamento e manuseio em solo, resultando finalmente em uma perda de tempo e dinheiro para a companhia aérea (EUROCONTROL, 2004).

Quando um vôo específico chega com algum atraso no aeroporto de destino, o custo adicional relacionado à duração do atraso é suportado pela companhia aérea. É difícil estimar o custo adicional suportado pela companhia aérea, uma vez que pode gerar custos relacionados com passageiros para a companhia aérea, pois nesse caso os passageiros podem ter que ser atendidos e suportados no solo (JOVANIC, 2008). Um atraso pode ter consequências em vôos de conexão e vôos sucessivos, no emparelhamento atribuído à aeronave que realiza o vôo em atraso com demais elementos da rede de transporte. O atraso pode impedir, considerando a situação do trânsito perto do aeroporto de chegada, uma abordagem direta para o desembarque que resulta em atrasos expressivos adicionais e queima de combustível.

O custo do atraso pode ser dividido em custos de atraso estratégico e tático. Custos de atraso estratégico são aqueles contabilizados antecipadamente e estão relacionados com os tempos de *buffer* (uma lacuna de tempo inclusa no cronograma operacional dando alguma flexibilidade na gestão do tempo) introduzidos no cronograma da frota de companhias aéreas. Custos de atraso tático são incorridos ao longo do dia de operação e estão relacionados com os custos de passageiros, que em geral sofrem incrementos em função do nível de atraso do vôo.

Além disso, um atraso original em um vôo pode gerar atrasos (COOK, 2009), conhecidos como atrasos de reação, na rede da companhia a jusante, desemparelhando um conjunto de vôos planejados em rede em tempos seguintes. As estatísticas mostram

que um atraso primário de um minuto pode criar um atraso de reação de aproximadamente um minuto na rede.

Os custos relacionados ao passageiro, resultantes de atrasos nos vôos, podem ser classificados em duas categorias: custos duros (*Hard Costs*) e custos suaves (*Soft Costs*).

Os custos duros são os resultantes das obrigações das companhias aéreas em atender passageiros em atraso (JOVANIC, 2008). Regulamentos detalhados permitem a estimativa precisa deste tipo de custos.

Os custos suaves são difíceis de estimar, uma vez que são, principalmente, o resultado da insatisfação dos passageiros sobre a deterioração da imagem comercial da companhia aérea, desviando a demanda potencial de seus vôos. Alguns estudos expressaram esse nível de insatisfação como função do atraso médio do tempo de vôo.

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO FUZZY DO COST INDEX

5.1 - DEFINIÇÃO DO COST INDEX

Diferentes considerações levaram à introdução do conceito de Cost Index (CI). Em primeiro lugar, a partir da análise de custos relacionada com o tempo exibido anteriormente, parece bastante difícil ter uma estimativa, a priori, do custo unitário do tempo C_T .

Além disso, considerando que, enquanto os custos relacionados ao tempo são reduzidos por vôos mais rápidos, os aumentos de custos de combustível, comparados em uma base comum, devem ser estabelecidos para esses custos, cujas estimativas são de precisão desigual.

Portanto, para resolver esse dilema, o FMS combina os custos relacionados ao tempo e ao combustível, ao introduzir um parâmetro Cost Index no processo de otimização do plano de vôo vertical.

Em seguida, considerando o custo médio do vôo por milha náutica voada C , obtemos para a fase de cruzeiro:

$$C = \frac{\text{Custo} / Nm}{Nm + \text{Custo de combustível} / Nm} = \frac{\text{Custos relacionados com o tempo} / Nm}{Nm + \text{Custo de combustível} / Nm} \quad (45)$$

onde:

$$\begin{aligned} \text{Custos relacionados com o tempo} / Nm &= \text{Cruzeiro Duração} \times \text{Custo do Tempo} / \text{hora} / Nm \\ &= \text{Custo do tempo} / \text{hora} / (Nm / \text{duração do cruzeiro}) \\ &= \text{Custo do tempo} / \text{hora} / \text{velocidade média do solo} \\ &= C_T / Vg \end{aligned} \quad (46)$$

e

$$\begin{aligned} \text{Custo de combustível} / Nm &= \text{Tempo de cruzeiro} \times \text{Consumo a hora} \times \text{Preço do} \\ &\quad \text{combustível} / Nm \\ &= \text{Consumo horário} \times \text{preço do combustível} / \text{velocidade média do solo} \\ &= CH \times C_F / Vg \end{aligned} \quad (47)$$

Aqui CH é o consumo horário de combustível e Vg é a velocidade do solo.

Então:

$$C = \text{Custo} / Nm = C_F (CH + C_T / C_F) / Vg = C_F (CH + CI) / Vg \quad (48)$$

com:

$$\text{Índice de custo } CI = C_T / C_F = (\text{Custo do tempo / hora}) / \text{Preço do combustível}$$

Um Cost Index pode ser definido pela companhia aérea para cada fase do voo ou para todo o voo e pode ser computado antes do voo, para fins de planejamento, e durante o voo, para fins de monitoramento.

5.2 - UTILIZAÇÃO ATUAL DO COST INDEX

Um dos únicos parâmetros que regem o processo de otimização do plano de voo vertical que está sob controle direto dos pilotos da linha aérea é o COST INDEX, um processo completo de otimização executado pelo FMS, sendo completamente transparente e revelado para ele. Nesta hora, é útil distinguir as diferenças entre os COST INDEX estratégicos e táticos para explicar a maneira como os pilotos lidam com as condições nominais, bem como as frequentes não-nominais.

5.2.1 – COST INDEX ESTRATÉGICO

Um *COST INDEX Estratégico* será adotado, a priori, para uma rota e será um parâmetro do problema de otimização de perfil vertical que, além dos parâmetros do perfil vertical ideal, produzirá estimativas do combustível necessário a bordo, bem como o tempo de chegada para o voo considerado.

O valor atribuído ao COST INDEX não refletirá, em geral, o valor real da relação C_T / C_F , mas sim a importância relativa associada aos custos relacionados da linha aérea com relação aos custos de combustível.

Muitas companhias aéreas adotam uma escala que varia entre “zero” e um valor máximo. O COST INDEX é expresso em kg/min, que varia de 0 a um máximo de valor de CI_{Max} (igual a 100 para o A320, igual a 200 para o A330 e igual a 9999 para o Boeing B777).

As companhias aéreas atribuem, a cada voo, um *COST INDEX Estratégico*. Um valor para o *COST INDEX Estratégico* definido como “zero” significa que o objetivo é minimizar os custos de combustível, seja qual for o nível dos custos relacionados ao tempo.

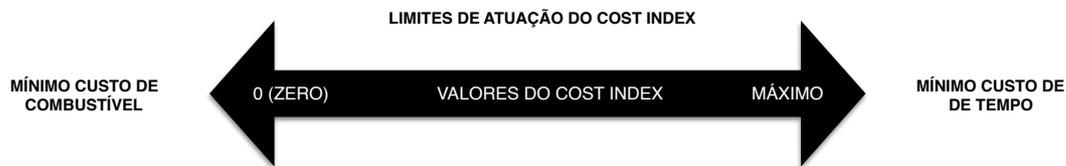


Gráfico 5: Valores Limites do Cost Index
Fonte: Elaboração Própria

Resolver o problema de otimização do perfil vertical conduzirá, nesse caso, a um plano de voo com queima mínima de combustível e aumento das durações dos tempos de voo. A adoção de grandes valores para o *COST INDEX Estratégico* produzirá planos de voo com menor duração do voo (e velocidades mais altas), mas com maior queima de combustível.

A escolha do valor do *COST INDEX Estratégico* também pode considerar outras condições tais como: competição com voos de outras companhias aéreas e conexões de voo no aeroporto de chegada.

O valor do *COST INDEX Estratégico* pode ser derivado da otimização de trajetórias, onde o horário de partida previsto (*PTD* - *Planned Time for Departure*) e o horário previsto para a chegada (*PTA* - *Planned Time for Arrival*) são impostos e esperados pela companhia aérea.

Nesse caso, considera-se o C_{flight} ser o custo total do voo associado à solução ideal deste problema, então o valor do *COST INDEX* Oculto (*Hidden Cost Index*) pode ser calculado a partir de:

$$HCI = C_{flight} / (C_F \cdot (PTA - PTD)) - (m(PTD) - m(PTA)) \quad (49)$$

O valor máximo do *COST INDEX* Oculto, HCI_{max} , pode ser calculado a partir da relação acima usando os resultados do problema de otimização onde o critério de otimização é a duração do voo, enquanto o valor mínimo do *COST INDEX* Oculto, HCI_{min} , será correspondente à solução do problema de otimização de trajetória, mas com uma hora de chegada livre. Em seguida, o índice de *COST INDEX* Estratégico pode ser dado por:

$$CI = ci_{max} \cdot f(HCI) \quad (50)$$

onde f é uma função crescente contínua não linear, como:

$$f(HCI_{min}) = 0 \quad \text{e} \quad f(HCI_{max}) = 1 \quad (51)$$

5.2.2 – COST INDEX TÁTICO

O *COST INDEX* Estratégico original atribuído ao voo deve ser revisado quando os desvios aparecem entre o plano de voo nominal e o que está sendo alcançado *on-line* pela aeronave.

Os desvios são o resultado de partidas atrasadas nos aeroportos, erros na previsão de ventos em rota e erros na previsão das condições climáticas. Um tempo estimado de chegada (ETA – Estimated Time for Arrival) e um combustível estimado a bordo (EFOB – Estimated Fuel on Board) à chegada são produzidos para o piloto pela função de predição do FMS. Quando esses valores são bastante diferentes dos nominais, é necessária uma atualização do plano de voo.

Em seguida, o piloto deve escolher um valor do *COST INDEX Tático* que é submetido ao módulo de otimização do plano de voo a bordo no FMS para gerar *online* um plano de voo atualizado que deverá ser aplicado para compensar, de alguma forma, os desvios do plano de voo nominal.

A bordo da aeronave, o piloto não tem meios para calcular os custos adicionais relacionados ao tempo decorrentes desses desvios do plano de voo nominal.

Em geral, o piloto gerenciará esses desvios escolhendo arbitrariamente um novo valor para o *COST INDEX*, sabendo que escolher um valor maior para o *COST INDEX*

deve levar a um vôo mais rápido com o aumento do consumo de combustível e escolher um valor menor para o COST INDEX, o fornecerá como resposta um vôo mais lento com um consumo de combustível reduzido.

Esta prática está distante de ser uma ação suficiente para definição de um valor ótimo do COST INDEX e obriga ao FMS a executar múltiplos processos de otimização a bordo visando entregar resultados.

Então, enquanto o *COST INDEX Estratégico* adotado para um determinado vôo pode ser computado usando uma estrutura robusta de TI disponível nas retaguardas das companhias aéreas, existe uma necessidade clara de fornecer ao piloto uma ferramenta a bordo para produzir um valor eficiente do *COST INDEX Tático* considerando o status atual do vôo.

Uma vez que muitas conseqüências dos desvios de vôo não podem ser avaliadas com alta precisão e, como muitos fatores contribuem de forma complexa para a variação da nominal do desempenho geral do vôo, a Lógica Fuzzy apresenta-se como boa solução no atendimento desta necessidade.

5.3 - ABORDAGEM FUZZY DO CÁLCULO DO COST INDEX

5.3.1 - COMPUTAÇÃO DO COST INDEX TÁTICO

A computação tática do COST INDEX, é dividida aqui em duas etapas, ambas usando Lógica Fuzzy KRYKHTINE et al. (2017):

- primeiro, é avaliada a necessidade de modificar o valor tático atual do Índice de Custo, através da divergência de valores do plano nominal para a situação real desejada, envolvendo uma perda de objetivos;
- então, o novo valor do *COST INDEX Tático* é produzido.

Na Gráfico 6, abaixo, é apresentada a evolução qualitativa dos efeitos resultantes (atraso reduzido e redução de combustível) da variação do índice de custos em relação à

distância para ir ao destino final, para um determinado cenário de massa e ventos iniciais da aeronave.

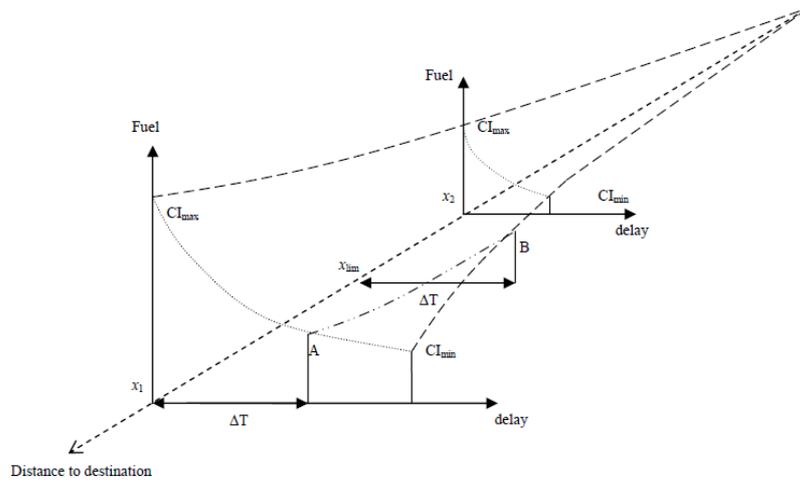


Gráfico 6: Impacto do Cost Index ao longo do voo

Fonte: MORA CAMINO et al. (2015)

Para cada distância, as soluções não inferiores resultantes de um COST INDEX escolhido entre o máximo (CI_{max}) e os valores mínimos (CI_{min}) são representadas por uma linha pontilhada. Por exemplo, para obter uma redução de atraso de ΔT , à distância x_1 , um valor intermediário (ponto A) do COST INDEX será conveniente, enquanto abaixo da distância limite x_{lim} , essa redução de atraso será inviável.

Ambos os passos computacionais usam dados já disponíveis no FMS sem necessidade de nova entrada de dados por parte do piloto ou qualquer nova computação de trajetória ideal pelo FMS. No entanto, as informações adicionais devem ser computadas para este voo pela companhia aérea e carregadas no banco de dados de desempenho do FMS:

- duração máxima do voo ($ETA_{max} - EDT$);
- $EFOB$ máximo ($EFOB_{max}$) correspondente ao valor mínimo do COST INDEX Estratégico (CI_{min});
- duração mínima do voo ($ETA_{min} - EDT$);
- $EFOB$ mínimo ($EFOB_{min}$) para o valor máximo do COST INDEX Estratégico (CI_{max}), onde EDT é a hora de partida efetiva.

Então, de um lado a carga de trabalho do piloto não é aumentada por interações adicionais do piloto com o FMS e os novos módulos computacionais podem ser facilmente conectados a jusante com os módulos funcionais FMS padrão.

Isto é possível pelo uso de sistemas nebulosos especialistas baseados na ativação de conjuntos de regras difusas que integram com os dados de desempenho da aeronave para este voo.

Aqui, considera-se que, enquanto a necessidade de atualizar o valor do COST INDEX Táctico é realizada *on-line* e é exibida continuamente para o piloto, é o piloto que ativa o cálculo efetivo desse novo valor em um determinado ponto do voo, e que introduz esse novo valor na função de planejamento de voo do FMS, que por sua vez, produz novos *ETA* e *EFOB*. Este processo é representado no gráfico 7, onde a MCDU é a interface clássica entre o piloto e a função gerenciamento de voo.

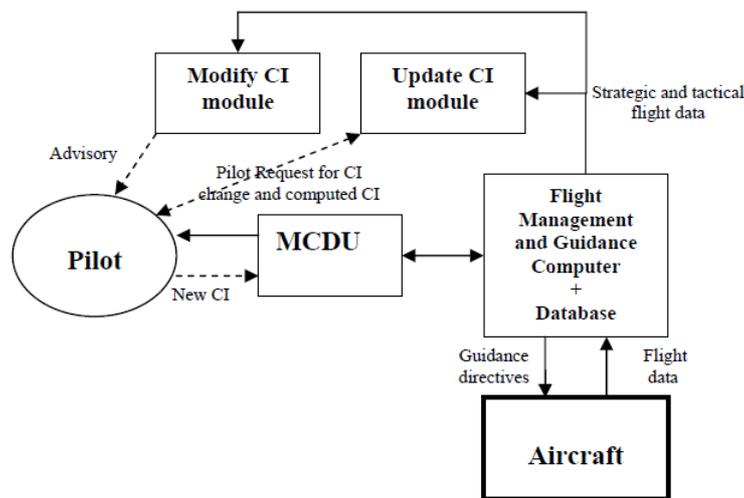


Gráfico 7: Sistema proposto para Monitoramento do Cost Index
 Fonte: MORA CAMINO et al. (2015)

O valor do COST INDEX Estratégico escolhido pela companhia aérea para a atual realização do voo fornece informações sobre sua estratégia em relação ao tempo de voo e ao consumo de combustível, buscando um tempo mínimo de voo para um consumo mínimo de combustível. Ou seja, o cálculo estabelece um balanço entre os custos relacionados ao tempo e ao uso de combustível e adota, através do processo de otimização um valor que traduz o ponto mínimo destes dois tipos de custo.

5.3.2 - MÓDULO FUZZY ESPECIALISTA PARA AVALIAÇÃO E ATRIBUIÇÃO DO COST INDEX

O COST INDEX atual deve ser modificado uma vez que se estima que seu valor atual não permite cumprir algumas restrições rígidas associadas a um determinado voo, tais como: a hora máxima de chegada ou um mínimo de combustível a bordo.

Do Gráfico 6, também podemos observar que, o quanto antes o COST INDEX for ajustado, melhor para o cumprimento dos objetivos deste voo.

O módulo "Modificar *CI*" (*Modify CI Module*), que é responsável por aconselhar o piloto pelo interesse (ou necessidade) de modificar o valor atual do COST INDEX, usa como entradas avaliações qualitativas da diferença entre a *ETA* planejado e a informação atual, o tempo e a distância restantes para a diferença entre o combustível estimado a bordo (*EFOB*) e o atual, a diferença entre o valor do COST INDEX Estratégico desse voo e o valor atual do COST INDEX Tático.

O resultado qualitativo deste módulo é escolhido em um conjunto como: {nenhuma necessidade, baixa necessidade, moderada necessidade, forte necessidade, necessidade crítica, fora do escopo} onde o fator de orientação (tempo de voo excessivo ou consumo excessivo de combustível) é informado.

O piloto deve modificar o valor do COST INDEX quando os níveis de necessidade fortes ou críticas são alcançados, caso contrário, uma revisão completa do plano de voo, incluindo o destino, deve ser realizada quando o parecer do sistema “fora do escopo” é exibido. Este parecer do sistema especialista indica que não será possível cumprir os compromissos de tempo ou por combustível. Este tipo de advertência poderia ter evitado acidentes recentes, como foi o caso do voo do time de futebol Chapecoense, em 2016, que enfrentou uma pane de turbinas por falta de combustível associada a tentativa de cumprimento de uma distância excessiva. Embora a mesma aeronave tenha realizado o mesmo percurso anteriormente, com a mesma quantidade de combustível, na ocasião do acidente, possivelmente, enfrentou condições de clima (incidência de ventos) ou realizou uma trajetória ineficiente que ocasionou um maior consumo de combustível.

Os primeiros níveis de necessidade de mudança são encontrados em muitas situações operacionais que envolvem um determinado voo, enquanto os níveis extremos dificilmente são encontrados.

Em seguida, os dados para construir *off-line* as regras nebulosas de acordo com métodos como os descritos acima, temos duas origens: dados de desempenho de voos anteriores e análise de viabilidade de soluções ótimas do problema de cálculo de trajetórias onde *PTD* é substituído pelo tempo atual, bem como as condições iniciais são definidas para as condições atuais.

Diferentes cenários de vento, característica da rota escolhida, também devem ser considerados. Um processo de atualização para melhorar a ação das regras nebulosas adotadas, deve integrar-se aos novos dados da aeronave que opera o voo.

O "Módulo de Atualização do Cost Index" (*Update CI module*) que é responsável por propor ao piloto um valor atualizado do COST INDEX Tático, usa como entradas as avaliações qualitativas das mesmas quantidades do que o módulo "Modificar *CI*", bem como informações adicionais como a diferença entre o peso máximo de descolagem (*MTOW*) e o peso efetivo de *decolagem*, e adicionalmente, as restrições de tempo de conexão com os passageiros transferidos correspondentes.

Cada diferença é avaliada de acordo com uma escala específica, não-escalonada avaliada usando funções de associação trapezoidais (valores extremos) e triangulares (valores intermediários) para a definição de um conjunto de termos associados aos números fuzzy: Large Negative-LN, Medium Negative-MN, Small Negative-SN, Very Small Negative-VSN, Zero-Z, Positive-VSP muito pequeno, Small Positive-SP, Medium Positive-MP e Large Positive-LP.

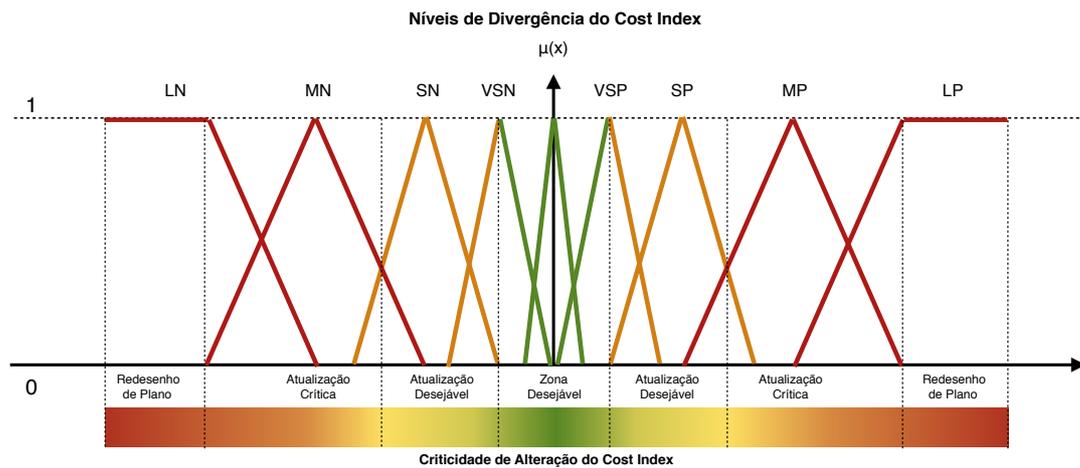


Gráfico 8: Números Fuzzy aplicados para apuração de divergências
 Fonte: Adaptado de MORA CAMINO et al. (2015)

A saída dos intervalos do módulo “Modify CI” ao longo dos seguintes conjuntos nebulosos: No Need-NNC, Very Small Need-VSNC, Small Need-SNC, Medium Need-MNC e Large Need-LNC.

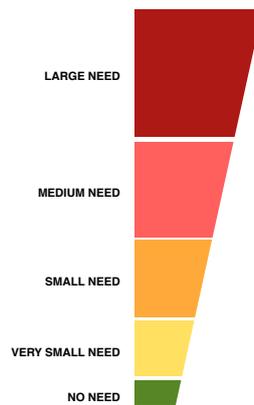


Gráfico 9: Graus de Necessidade de Alteração do Cost Index
 Fonte: Elaboração Própria

Um exemplo de regra nebulosa para o módulo "Modificar CI" é similar a apresentada abaixo:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } \left\{ \begin{array}{l} \text{(planned ETA - current ETA is VSP)} \\ \text{and (planned EFOB - current EFOB is VSN)} \\ \text{and (Remaining Time to Fly is MP)} \end{array} \right\} \\
 & \text{then (Need to Change is SNC)}
 \end{aligned} \tag{52}$$

Uma vez ativado pelo piloto, o módulo "Modificar *CI*" faz uso de uma escala de COST INDEX qualitativa calculada a partir dos valores extremos de *ETA* e *EFOB* correspondentes aos valores extremos do COST INDEX, ao valor estratégico do COST INDEX e o atual valor do índice de custo tático, para gerar o valor defuzzificado do índice de custo tático atualizado e proposto, onde a defuzzificação pela média dos máximos é adotada. Um exemplo de regra nebulosa é esse caso :

$$\text{if } \left\{ \begin{array}{l}
 (\text{planned } ETA - \text{current } ETA \text{ is } MN) \\
 \text{and } ((CI_{\max} - CCI \text{ is } SP) \\
 \text{or } (CCI - CI_{\min} \text{ is } LP)) \\
 \text{and } (NSC \text{ is } MP))
 \end{array} \right\} \\
 \text{then } (\text{Variation of } CCI \text{ is } MP) \tag{53}$$

onde *CCI* é o valor atual do índice de custo tático e *NSC* é a porcentagem de passageiros conectados cujos vôos de conexão são garantidos. Observe que esse valor é indicado no início do vôo com o valor estratégico do índice de custos.

5.3.2.1 - ILUSTRAÇÃO DE UM ESTUDO DE CASO

Um exemplo de estudo de caso considerado em KRYKHTINE (2017) é relativo a um vôo entre Madrid e Moscou usando um avião A320 para um vôo de cerca de 2300 Nm.

A aeronave tem um *MTOW* de 75000 kg e uma faixa de performance de 3300 Nm. Assumiu-se que o peso de decolagem do vôo considerado era de 70000 kg com 13000 kg de combustível a bordo (*FOB*), com 145 passageiros em uma configuração de duas classes com conexão de vôo às 07h10 no próximo dia para 30 passageiros.

Ao adotar um índice de custo estratégico de 20, o *ETD* programado era 23h10 (hora local) e o *ETA* era 6h30 (hora local) com uma duração esperada de vôo de 380 min e *EFOB* à chegada de 3400 kg.

O cenário considerado pressupõe que a saída efetiva atrasada em 25 minutos e que, durante a primeira parte do cruzeiro, houve um vento efetivo de 10kt maior do que o esperado.

Na decolagem, aconselhando o piloto, o "*Módulo Modificar CI*" produziu um índice de custo "LARGE POSITIVE" e o "*Módulo Atualização CI*" produziu um novo índice de custos táticos de "60", que leva a aeronave a um nível de cruzeiro mais elevado e um *ETA* de 6h35 para um *EFOB* à chegada de 3050 kg.

No nível de cruzeiro, considerando o vento frontal (*head wind*), o "*Módulo Modificar CI*" começou a produzir um índice crescente de custo modificando o aconselhamento até que o nível "LARGE POSITIVE" fosse atingido após 40 min de cruzeiro e aceito pelo piloto. Um novo índice de custo tático de 70 foi produzido pelo "*Módulo Atualização CI*" e aplicado pelo piloto ao FMS, resultando em um novo *ETA* de 6h40 com um *EFOB* à chegada de 2850 kg.

Então, quando o vento frontal (*head wind*) retornou ao seu valor nominal, após 20 minutos, o sistema começou novamente a aconselhar ao piloto pela adoção de um novo índice de custo tático de "55", resultando em uma *ETA* final de 6h35 com um *EFOB* à chegada de 2950kg.

O sistema de avaliação que permite a flutuação dos valor de índice de custo tático, composto pelos dois módulos propostos, baseia-se na divergência de tempo e combustível, com base em dados reais para atualizar o piloto de informações relevantes para um melhor desempenho individual do vôo e cumprimento da missão.

No exemplo, a aplicação sugere uma economia aderente à realidade, considerando o plano inicial de chegar ao destino com 3400kg como uma meta perdida, diante do atraso de 25 minutos antes da decolagem. Dentro do cenário de atraso, a flutuação do índice de custo em um primeiro momento sugere a recuperação do tempo de chegada com um custo inicial de 550kg sob as condições de vento na fase inicial do vôo. Com o fim da interferência dos ventos após os 20 minutos, a alteração do índice de custo permitiu economia adicional de mais 100kg de combustível.

CAPÍTULO 6 – SOLUÇÃO DE ALGORITMO PARA AJUSTE DINÂMICO DE COST INDEX COM OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE VÔO

Neste capítulo, a proposta de sinalização atribuída a divergência do Cost Index desenvolvida no capítulo anterior é explorada a partir da divergência das variáveis componentes de entrada do índice, a saber: custo de tempo e combustível. O sistema descrito utiliza sistema de regras nebulosas para avaliar, em uma composição de variáveis e suas divergências ao objetivo planejado inicialmente, a definição de um novo índice de custo tático. Para tal, serão consideradas algumas condições, restrições e limitações ao processo de cálculo, conforme descrito e debatido ao longo deste capítulo, com a demonstração dos principais elementos aplicados ao cálculo.

Ao ser inserido no FMS, o Cost Index, frente a uma série de informações inseridas previamente, estabelece relações da aplicação de maiores velocidades, e consequentemente de combustível, frente ao tempo de viagem, alterando o perfil da trajetória da aeronave.

Durante as fases de subida (climb) e de decida (descent), o valor é responsável pelo design de um perfil com maior ou menor ângulo, favorecendo uma operação de climb mais acentuada ou suave.

Nos vôos em rota de longo cruzeiro, a recuperação de atrasos, ou ajustes de consumo e tempo, estão muito ligadas a uma aceleração ou redução da velocidade da aeronave, através de uma alteração da altitude (FLIGHT LEVEL). A maior altitude, oferece um ambiente com ar mais rarefeito e, conseqüente, menor atrito com favorecimento, para a estabilidade da aeronave em dado teto, de maiores velocidades. Nestes vôos longos, o custo da subida, uma das fases de maior consumo de combustível por conta da elevação da massa a um determinado teto, é menor em relação às demais etapas do plano de vôo e a estratégia de recuperação do tempo ao longo da viagem pode ser viabilizada em certos limites.

Em vôos em rota de cruzeiros curtos, as operações de subida e decida são bem mais críticas e custosas, sendo a subida responsável pela maior parte do combustível

consumido na operação. Estes vôos são característicos em pontes aéreas como a Rio-São Paulo por exemplo, em que a aeronave passa a maior parte do tempo de viagem angulada positivamente e negativamente.

A velocidade da aeronave em altitude inadequada também é um aspecto relevante no consumo de combustível. Existe um patamar ótimo para cada aeronave com determinada massa, em determinada velocidade, em condições de temperatura e pressão.

A trajetória ótima é complexa e envolve muitas variáveis e elementos que felizmente são computados, antes dos vôos por equipes especializadas e o negócio da aviação é inteiramente atrelado a estas projeções. Estas projeções são, também, pontos de vulnerabilidade no desempenho econômico e competitivo de uma empresa.

Das projeções saem muitas informações importantes que abrangem desde o bloqueio de um slot, da oferta de um vôo em uma rota com horários pré estabelecidos, uma programação vasta de tarefas de solo que apoiam o vôo e seus passageiros, o abastecimento, isso apenas para citar as principais.

Diante disso, o tempo da operação torna-se um dos mais importantes compromissos na competitividade e bom desempenho na aviação. Cumprir horários permite melhor desenvolvimento de serviços de transporte em toda a amplitude dos atores envolvidos, do controle de tráfego, da infraestrutura aeroportuária, das empresas aéreas e beneficia, sobre tudo o mercado e seus clientes.

A operação com missão frustrada por atraso é custos para as empresas, e isso já foi bastante explorado em estudos que exibem o custo de um minuto, o impacto de um minuto na rede e todo o desgaste de empresas aéreas frente aos seus clientes, com fortes custos à imagem destas companhias (COOK, 2009).

Tempo é um recurso crítico, finito e irrecuperável. Dialogar com a questão “tempo” envolve mitigação de riscos, redução de incertezas e abordagens preditivas com estratégias e táticas bem estudadas e planejadas.

Neste panorama, em que são apresentadas (e foram apresentados nos capítulos anteriores) muitas equações de energia, parâmetros de controle e variáveis de estado para a determinação da trajetória ótima pelo FMS, duas informações do cálculo são relevantes:

ETA – Estimated Time to Arrive , que é o calculo pelo FMS do horário previsto para a chegada da aeronave no destino;

e EFOB, que é o cálculo realizado com base nas taxas de consumo de comburente (Fluel Flow) volume de combustível (Q) em tanque para a aeronave no destino.

Estes valores, são dois parâmetros de tomada de decisão, saídas do FMS que mediante a atribuição do Cost Index, são alterados positivamente ou negativamente sob efeito de sua flutuação.

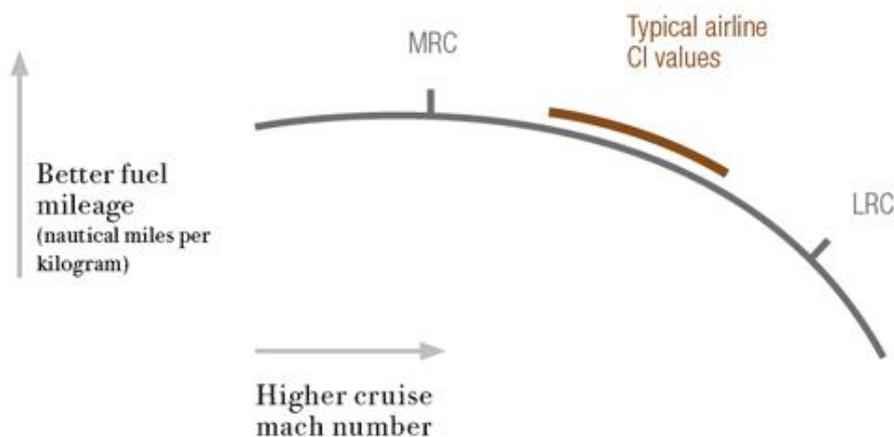


Gráfico10: Margens de Operação do Cost Index
Fonte: Boeing, 2007

Sob o Cost Index e através de sua variação são cumpridas as estratégias da empresa e tomadas as principais decisões que orientam operações de uma empresa aérea.

Destaca-se que este parâmetro é predefinido anteriormente ao vôo e pode ser alterado a qualquer momento pelo piloto ao longo dele. É um parâmetro absolutamente relevante, que traduz e materializa importantes realizações de uma possível estratégia e

que pode ter uso em ações táticas com processos bem planejados mediante a compromissos da empresa com determinados parâmetros de desempenho e, sobre tudo, com seus clientes.

A proposta de oferecer um aparato de apoio ao piloto que apresente-se como elemento concreto para a tomada de decisão, contribuinte à estratégia é, sobretudo, um compromisso da empresa com si própria, reduzindo a incerteza no comprometimento da estratégia.

Até determinado ponto, esta pesquisa almejou a construção de um simulador de trajetórias para melhor e mais apurada análise dos planos de vôos realizando a entrega de índices, quantidades e medidas diversas, em operações simuladas. Estes objetivo fora abandonado por questões ligadas ao prazo de encerramento deste trabalho, mas não apenas por isso.

Ao longo deste processo, estudou-se tanto a incerteza e a realidade que a construção de um simulador, com esforços de programação e parametrização nos entregaria muito pouco do que realmente persegue-se aqui.

Considerando que o FMS já realiza o cálculo, pretende-se realizar desdobramentos da atual proposta de algoritmos desta tese com o envolvimento de fabricantes e com uma discussão envolvendo muitos especialistas e em profundidade maior.

Por outro lado, a discussão quanto a incerteza envolvendo a massa da aeronave e a incidência de ventos ao longo do vôo abriam discussões bastante interessantes que merecem aprofundamento.

São motivadores de novos estudos e do desenho de trajetória envolvendo a programação dinâmica fuzzy dual, instrumento magnífico que será aplicado de maneira mais totalitária em novas abordagens.

Isso porque, realmente, as aplicações fuzzy duais são oportunidades de exploração de novos campos com grandes possibilidades de processamento de

informações e, sobretudo, para a tomada de decisão com a realização da comparação de dois resultados aparentemente iguais, mas que possuem diferentes graus de incerteza.

Nesta solução para a otimização do plano de vôo é aplicado o conceito dual para a associação do grau de incerteza ao longo diversos estágios do plano de vôo. Observe que o grau de incerteza de um Cost Index atribuído, que definirá os parâmetros ETA e EFOB, após o cumprimento de alguns dos estágios do vôo pode variar bastante.

A incerteza atribuída ao Cost Index que é entregue ao piloto pela empresa aérea antes do vôo é enorme, principalmente se for um vôo longo, com incidência de muitos eventos climáticos e oriundos da própria infraestrutura aeroportuária. Uma espera solicitada pelo controle de tráfego na cabeceira da pista, que impacte em 5 minutos em um vôo de curta duração pode ser apenas a primeira das dores de cabeça deste vôo, que pode enfrentar, ainda, atrasos ao longo de todos os demais segmentos, com ventos contra, destinos contendo tráfegos complicados e etc.

Assim, já na decolagem, este vôo que aguardou por 5 minutos na cabeceira de pista, já tem seu Cost Index atribuído pela empresa expirado, necessitando de uma revisão imediata.

Diante desta análise, lógica, com base apenas em fatos típicos, pode-se afirmar que um dos fatores que afetam o grau de incerteza atribuído a um Cost Index é o tempo de vôo que ainda se tem pela frente, e porque não considerar, o número de estágios definidos pelo plano de vôo a serem completados.

Para a determinação de ações mitigadoras, criou-se, adicionalmente, uma avaliação de risco atrelada ao destino (descrito nos anexos), que pretende criar uma zona de buffer de tempo moderado, antecipando um pouco o tempo de chegada em destinos avaliados como complicados, prevendo possíveis ocorrências geradoras de atrasos nos estágios finais da trajetória, na finalização do plano de vôo.

A ação preditiva de buffer foi uma proposta, embora a antecipação do horário de chegada não seja economicamente garantido benefício, dependendo da infraestrutura

disponível e de serviços de terceiros envolvidos em apoio ao voo, que nem sempre possuem capacidade de atendimento ou de reprogramação para apoiar esta antecipação.

Além do mais, um voo que chega antecipado, excluindo raras situações em que a ação dos ventos colaborou expressivamente para que um plano de voo seja cumprido antecipado com custos mínimos de combustível, estas ações de antecipação, na maioria das vezes estão conectadas com um gasto excessivo de combustível, que além do comprometimento financeiro, afeta sensivelmente o meio ambiente com emissões desnecessárias.

A ação de planejamento é um esforço conjunto, que envolve muitos recursos, inclusive externos das empresas aéreas, que se estende até o passageiro que considera os horários exibidos em seu bilhete, e inclusive no momento de sua aquisição, para planejamento de suas ações. No âmbito da empresa aérea e de seus parceiros operacionais, da infraestrutura aeroportuária e do controle de tráfego aéreo, cumprir o planejado é colaborar com toda a rede.

É com este olhar, de rede colaborativa, que os novos sistemas de gestão e a integração das atividades de transporte aéreo evoluem e se desenvolvem, sendo o SWIM – System Wide Information Management um dos grandes desafios para a melhoria do desempenho em muitos objetivos, econômicos, de controle, de planejamento, de segurança etc. Estes estudos são realizados com a participação de grupos de pesquisa multidisciplinares e multi institucionais, sendo de interesse coletivo e reconhecidamente um novo paradigma de organização envolvendo tomada de decisão colaborativa.

Em conclusão, quanto ao planejado, o compromisso com o tempo é fundamental e justo com todos os envolvidos, sendo um dos mais importantes compromissos. O outro, é o uso eficiente de combustível, relacionado aos fatores econômicos, ambientais e, inclusive, o mais importante, a segurança do voo.

Diferentemente dos automóveis, em que pode-se encostar na estrada e aguardar suporte por pane seca, uma aeronave sem combustível é absolutamente incapaz de manter sua integridade operacional, passando a dialogar com questões emergenciais e

de elevado risco, geralmente levando a perda do equipamento e muitas vidas. O combustível é uma questão crítica na aeronave e o cálculo do combustível, geralmente, considera um buffer de tanqueamento que capacite a aeronave a voar, minimamente, por aproximadamente 30 minutos além do planejado no plano de vôo. Esta medida é considerada suficiente para uma reorganização de operações e procedimentos, além do fato que, o controle de tráfego, que tem como lógica operante a garantia da segurança, prioriza aeronaves com restrição de combustível em procedimentos de aterrissagem.

Com base nestas premissas e convicções, mediante informantes e através da constituição de todo um conjunto de observações, que o ETA e EFOB foram considerados suficientes medidas para a elaboração de uma solução que dialogasse com o ajuste do Cost Index para aplicabilidade estratégica e tática.

A solução do ajuste do Cost Index com a aplicação de Lógica Fuzzy surgiu ao longo da pesquisa com os artigos publicados em 2015 e 2017 KRYKHTINE et al. (2017) pelo grupo de pesquisadores da ENAC e do LABFUZZY com sugestão da aplicações de regras nebulosas em sistema especialista.

Adicionalmente, em KRYKHTINE et al. (2017), foi publicado trabalho na ATRS 2014 (Air Transport Research Society Annual World Conference) em que realizou-se tratamento do problema de oferta e demanda com um algoritmo que emulava uma perseguição do preço de oferta à demanda. Este algoritmo analisava divergências e realizava correções do valor de tarifas, tendo como elementos chaves para a tomada de decisão, o tempo remanescente para o vôo, a taxa de ocupação do vôo e o risco que a empresa desejava assumir em sua estratégia. Este trabalho foi gerador de diversas discussões que abordavam a geração de receita, o porte das aeronaves, entre outros fatores.

No caso específico, a solução do Cost Index seguirá as seguintes premissas, visando oferecer “MODIFY CI MODULE”:

6.1 - PREMISSAS

1. Considera-se que exista um plano de vôo p que determina um Cost Index inicial, atribuído dentro da faixa LRC – MRC, de forma que os níveis de combustível e tempos para a execução da rota são viáveis;
2. A operação inicia-se, mesmo que em atraso, dentro de níveis de atraso aceitáveis, o que representa dizer que exclui-se o caso em que, mesmo se atribuíssemos o CI máximo do início do vôo até o seu fim, ainda assim, o vôo chegaria atrasado. Está se tratando de um caso em que o tempo de atraso pode ser recuperado ao custo de combustível;

O Algoritmo é estruturado sob as seguintes características:

1. Divisão da Trajetória em Estágios clássicos;
2. Atribuição de Incertezas para CI aos diferentes Estágios. Esta incerteza representa que a possibilidade de que este CI venha a sofrer alterações ao longo da trajetória é maior ou menor. Neste contexto, insere-se a avaliação de risco e incerteza no destino, classificando como maior ou menor a possibilidade de se perder um processo de otimização nos estágios finais da trajetória. Esta incerteza é atribuída em Fuzzy Dual e adicionada a incerteza dos estágios anteriores até a fase de decolagem.
3. Atribuição de uma taxa de frequência para o processamento de revisão de trajetória pelo “MODIFY CI MODULE” para cada estágio do plano de vôo. Esta taxa de revisão é relevante quando o estágio de cruzeiro é longo, sendo oportunidade de realização da reduções de atrasos e bastante sujeita a incidências climáticas, sobretudo da incidência dos ventos.
4. Definição de conjunto de Regras Nebulosas no Sistema especialista que opera na definição do CI ótimo para aquele momento, que entrega o ETA e o EFOB esperados na operação.

- a. Comentário sobre a influência da estratégia no ajuste das regras nebulosas do sistema especialista visando atendimento prioritário de um objetivo em relação a outro.
5. Módulo adicional sobre o impacto dos atrasos para os passageiros em conexão e a sugestão de um de incertezas atrelado ao atraso. Importante perceber que ao mesmo tempo em que vôos chegam atrasados, vôos também partem atrasados e conexões dadas como perdidas podem ocorrer em razão dos atrasos nas partidas dos vôos em conexão. Estes atrasos podem se dar por muitos motivos e é possível atribuir, à medida de tempo dos passageiros críticos embarcados em conexão, um grau de incerteza que estabelece a esperança de sucesso de uma conexão crítica. Esta incerteza pode ser deflagradora de um esforço adicional por parte da empresa aérea na oferta de pequenas facilidades que possibilitem ao passageiro o sucesso de seu reembarque em outra aeronave.

6.1.1 - SEGMENTAÇÃO DA TRAJETÓRIA

A divisão do Plano de Vôo segue a modelagem clássica preconizada nos planos da aviação comercial considerando a saída da aeronave do terminal de origem ao terminal de destino.

Destaca-se o fato de que grande parte dos atrasos em solo ocorrem durante os procedimentos de embarque, serviços de solo comuns (embarque de bagagens, abastecimento, etc), ocorrências de manutenção não programadas e tempos de espera em fila de decolagem na cabeceira da pista.

Associa-se, então, para cada estágio do plano, um índice de frequência de revisão do Cost Index para cada estágio e um grau de incerteza. Este grau de incerteza é estimado e associado à validade deste Cost Index, sendo representativo da possibilidade de que ele não se modifique até o fim do plano de vôo.

AERONAVE EM	ESTÁGIO DO PLANO	FREQUÊNCIA DE REVISÃO DO COST INDEX	INCERTEZA DO COST INDEX	GRAU DE INCERTEZA
			ESTÁGIO	DESTINO
EM SOLO	TAXING TO RUNWAY	BAIXA	MUITO ALTA	AVALIAÇÃO
SUBIDA	TAKE OFF	BAIXA	MUITO ALTA	AVALIAÇÃO
	CLIMB 1	BAIXA	ALTA	AVALIAÇÃO
	CLIMB 2	BAIXA	ALTA	AVALIAÇÃO
	TOC	BAIXA	ALTA	AVALIAÇÃO
CRUZEIRO	CRUISE	ALTA	DEPENDENTE DA DURAÇÃO	AVALIAÇÃO
DECIDA	TOD	BAIXA	MODERADA	AVALIAÇÃO
	DESCENT	BAIXA	MODERADA	AVALIAÇÃO
	FINAL APROACH	BAIXA	BAIXA	AVALIAÇÃO
EM SOLO	TAXING TO TERMINAL	BAIXA	BAIXA	AVALIAÇÃO

Quadro 3: Incertezas linguística associada ao Cost Index por Estágio do Plano de Voo

Fonte: Elaboração Própria

Por consequência o Grau de Incerteza do CI também representa um Grau de Incerteza no ETA e no EFOB do plano inicial em relação aos resultados reais.

AERONAVE EM	ESTÁGIO DO PLANO	INCERTEZA (ϵ) DO COST INDEX	GRAU DE INCERTEZA
		ESTÁGIO	DESTINO
EM SOLO	TAXING TO RUNWAY	0,5	AVALIAÇÃO
SUBIDA	TAKE OFF	0,5	AVALIAÇÃO
	CLIMB 1	0,4	AVALIAÇÃO
	CLIMB 2	0,4	AVALIAÇÃO
	TOC	0,3	AVALIAÇÃO
CRUZEIRO	CRUISE	$0,5 * \delta$	AVALIAÇÃO
DECIDA	TOD	0,3	AVALIAÇÃO
	DESCENT	0,3	AVALIAÇÃO
	FINAL APROACH	0,1	AVALIAÇÃO
EM SOLO	TAXING TO TERMINAL	0,01	AVALIAÇÃO

Quadro 4: Incertezas associadas ao Cost Index por Estágio do Plano de Vôo

Fonte: Elaboração Própria

Considerou-se que as incertezas permaneceram elevadas até o estabelecimento do perfil de decida, uma vez que no estágio de aproximação, aterrissagem e condução da aeronave até o terminal destino, a alteração do Cost Index não é relevante, já tendo sido cumprida a maior parte da operação.

Neste caso o atraso em terminal é tratado como um Buffer de tempo estimado, como apresentar-se-á neste trabalho e realizará um ajuste direto no ETA para adequação ou mitigação do impacto oriundos do risco destes atrasos.

Por outro lado, os atrasos nas fases iniciais representam oportunidade de iniciar a operação redesenhando todo o perfil da trajetória buscando atingir os objetivos da operação compromissada com o ETA. Em caso de atrasos extremos, já se considera que a aeronave realizará a operação com elevada queima de comburente quando avaliado impacto do atraso com fortes prejuízos pelo efeito dos custos de tempo.

Os efeitos de ligados as fortes alterações climáticas nas áreas de decolagem e aterrissagem são bastante conhecidos e mapeados por conta da alta densidade de aeronaves nestas regiões que permitem atualização constante dos dados de vento,

temperatura e pressão. As regiões de cruzeiro, em especial quando o cruzeiro é longo, em vôos intercontinentais por exemplo, os efeitos podem ser mais nebulosos e carregar uma grande quantidade de incerteza.

6.1.1.1 - DEFINIÇÃO DOS CONJUNTOS REPRESENTATIVOS PARA AS DIVERGÊNCIAS DOS PARÂMETROS ETA E EFOB

Utilizou-se os termos linguísticos associados aos valores de pertinência máximas características de cada perfil de desvio para os parâmetros de tempo e combustível.

As diferenças são avaliadas de acordo com uma escala específica usando funções de pertinência em associações trapezoidais (valores extremos) e triangulares (valores intermediários) para a definição de um conjunto de termos representantes dos números fuzzy: Large Negative-LN, Medium Negative-MN, Small Negative-SN, Very Small Negative-VSN, Zero-Z, Positive-VSP, Small Positive-SP, Medium Positive-MP e Large Positive-LP.

Analisando os casos extremos pode-se realizar um panorama geral das penalidades quando os desvios atingem patamares extremamente elevados ou extremamente baixos.

ETA

A escala divergência de tempo sugere que se o ETA calculado pelo FMS é “Large Negative-LN” em relação ao ETA necessário para honrar compromissos, significa que a aeronave chega antecipadamente ao destino, representando na maioria das vezes que ocorreu uso excessivo de combustível, além de custos de solo.

Se o ETA calculado pelo FMS é “Large Positive-LP” em relação ao ETA necessário para honrar compromissos, quer dizer que o vôo chega muito atrasado para honrar compromissos, representando quase sempre em penalidades por perdas de conexão de passageiros e custos de solo.

EFOB

A escala de divergência de combustível sugere que se o EFOB calculado pelo FMS é “Large Negative-LN” em relação ao EFOB necessário para completar um voo, ocorre um ALARME e a sugestão de redução extrema do CI para valor mínimo buscando oferecer ao piloto o maior tempo de voo possível para condição de reavaliar procedimentos com escolha de nova rota. Significa que a aeronave não possui combustível suficiente para alcançar o destino programado e que os efeitos de ignorar este ALARME sugerem a perda das turbinas em voo.

Se o EFOB calculado pelo FMS é “Large Positive-LP” em relação ao EFOB necessário para honrar compromissos, quer dizer que o voo opera com grande economia de combustível, tendo realizado a operação melhor que o programado em termos de combustível, resultando somente pela ótica do consumo de combustível, em um voo super econômico.

A ocasião em que um voo realiza uma operação com divergências negativas a zero no ETA e “Large Positive-LP” em relação ao EFOB são situações em que a empresa aérea maximiza seus objetivos financeiros sendo correta quanto aos compromissos de pontualidade e com economia máxima de combustível.

Estas situações não são verdadeiras quando:

1. A aeronave está realizando operação com combustível excessivo propositalmente, por conta de diferentes custos de ICMS e operando estratégias de tankering;
2. Os planos de voo gerados pela empresa aérea contemplam buffers excessivos que mascaram a otimização gerando resultados positivos.

Limitações relativas

Evidentemente este modelo é uma análise em certas condições e premissas. O que se discute aqui é um procedimento que auxilia na operação e melhor mensuração de resultados pontuais que possam contribuir para um resultado global de operações da empresa. Cada caso e estratégia deverá ser analisado pontualmente para maximização dos objetivos esperados.

Conjuntos Nebulosos representantes dos desvios

Apresenta-se então:

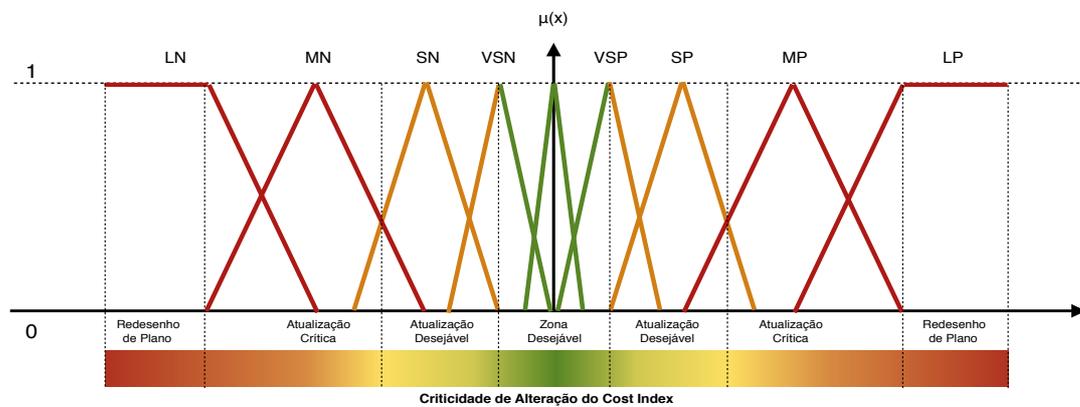


Gráfico 11: Conjuntos Nebulosos representantes dos desvios.

AERONAVE EM	ESTÁGIO DO PLANO	FREQUENCIA DE REVISÃO DO COST INDEX
EM SOLO	TAXING TO RUNWAY	BAIXA
SUBIDA	TAKE OFF	BAIXA
	CLIMB 1	BAIXA
	CLIMB 2	BAIXA
	TOC	BAIXA
CRUZEIRO	CRUISE	ALTA
DECIDA	TOD	BAIXA
	DESCENT	BAIXA

Quadro 5: Frequência de Revisão do Cost Index por Estágio do Plano de Vôo

Fonte: Elaboração Própria

A revisão do Cost Index em solo é um procedimento que deve ocorrer quando a aeronave chega a cabeceira da pista para decolar. Neste momento o atraso causado em operações do terminal a cabeceira da pista são computados e representam a realidade daquele estado na programação. A revisão do CI neste instante é importante e a taxa de revisão é baixa porque é um momento em que a tripulação está focada em muitos procedimentos relevantes ao voo.

A fase de “Take Off” é muito curta e a revisão no estágio anterior a decolagem torna desnecessária qualquer revisão. Caso tenha ocorrido atraso e nenhum reajuste anterior, após a decolagem, pode ocorrer a inserção de um novo Cost Index no FMS.

A fase de “Climb” é uma das mais importantes porque envolve a etapa em que a aeronave realiza maior consumo proporcionalmente comparada as demais fases. Merece especial atenção por conta da energia envolvida para elevar a massa da aeronave a altitude de cruzeiro. Nesta fase, como comentado anteriormente, existem evidências que um cálculo apurado da massa inicial sugere um melhor ajuste do índice de custo.

O Cost Index vai estabelecer uma taxa de subida maior ou menor de acordo com seu valor. Um valor baixo resultará em uma subida mais acentuada e um deslocamento menor em relação ao solo, enquanto valores elevados uma taxa de subida mais suave e um deslocamento em relação ao solo maior. As condições climáticas no “Climb” são bem conhecidas por conta da proximidade do aeroporto e o planejamento inicial é bastante aderente à realidade.

THE EFFECT OF COST INDEX WHEN CLIMBING TO CRUISE ALTITUDE

Figure 5

A cost index of zero minimizes fuel to climb and cruise to a common point in space.



Gráfico 12: Variações do Cost Index para Climb
Fonte: Boeing 2007

A fase de “Cruise” é relevante porque reserva oportunidade de recuperação de atrasos, especialmente se o cruzeiro é longo em relação ao tempo das demais fases, possibilitando à aeronave em sua trajetória assumir maiores ou menores altitudes. Além disso, é uma etapa com muitas incertezas já que a medida em que o período de voo é longo, pode ser sujeito a diferentes condições climáticas com ventos que podem colaborar ou prejudicar os objetivos da operação. É uma etapa em que a frequência de revisões do plano de voo deve ser mais elevada para antecipar decisões que possam criar situações extremas de uso de combustível ou atraso.

A fase de Decida inicia com o TOD (topo da decida) que é a fase de transição do cruzeiro para a decida efetiva rumo ao solo. É uma fase em que pode-se executar com baixo uso de energia, quando a aeronave desce planando utilizando a energia potencial da gravidade. Esta operação deve respeitar restrições de velocidade uma vez que a aeronave passa de altitudes em que o ar é mais rarefeito para zonas em que o atrito com a fuselagem em altas velocidades pode resultar em danos estruturais à aeronave. Estas restrições estão computadas. A descida pode assumir um perfil com uso de combustível com o Cost Index assumindo valores crescentes, representando numa taxa de decida mais acentuada. É a última oportunidade de decisão de ganho de alguns minutos ou de

poupar algum combustível. De fato, se as fases anteriores foram suficientemente revisadas, as divergências em relação aos parâmetros devem ser pequenas ou muito pequenas, influenciando pouco nas divergências do plano.

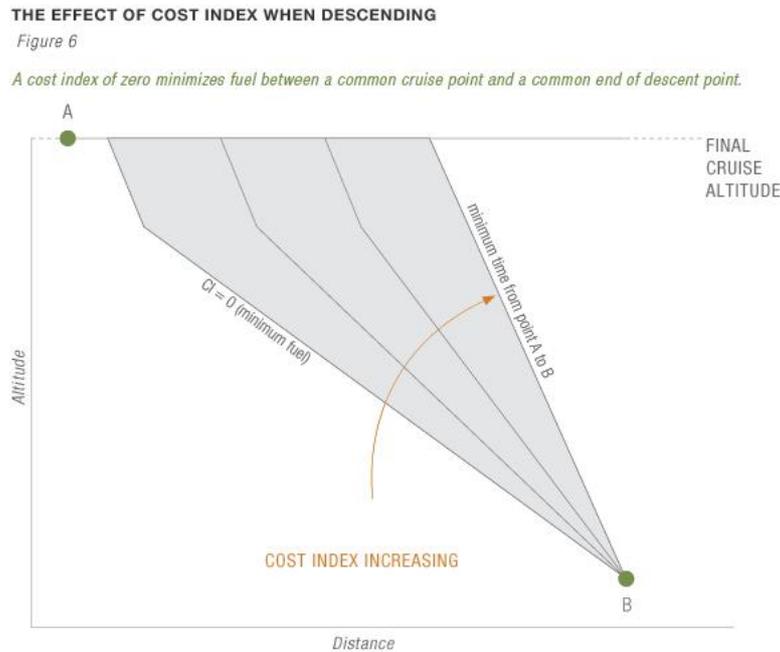


Gráfico 13: Variações do Cost Index para Decida
Fonte: Boeing 2007

A fase de aproximação final segue orientações do Controle de Tráfego Aéreo (ATC) em operações padrão com pouca flexibilidade para adoção de procedimentos. Além disso, é um período muito curto de tempo para representar algum ganho significativo.

6.1.1.2 - SISTEMA ESPECIALISTA DE REGRAS NEBULOSAS

O sistema proposto é bastante simples e relembra os primeiros sistemas de controle por regras apresentado por Mamdani para controle de pressão e temperatura em uma máquina à vapor (MAMDANI, 1975 *apud* MCNEILL, 1994).

Os controladores fuzzy são extremamente eficientes realizando cálculos aproximados convergentes ao ponto de equilíbrio esperado. Assim após poucas rodadas do sistema de regras nebulosas, os valores resultantes são ajustados. Estabelece-se,

então um cruzamento dos parâmetros em trade-off e sugere-se a alteração do Cost Index positivamente ou negativamente em um dado nível.

A partir de um vetor de Estado Inicial ou de um Estado N (S_n) identifica-se a divergência para o vetor de Estado Final (S_f) que é o objetivo da otimização. A partir daí um conjunto de interações baseado nas regras do sistema especialista ocorre em sucessivos loopings até que o vetor de Estado $N + 1$ (S_{n+1}) apresente similaridade ao vetor de Estado Final (S_f).

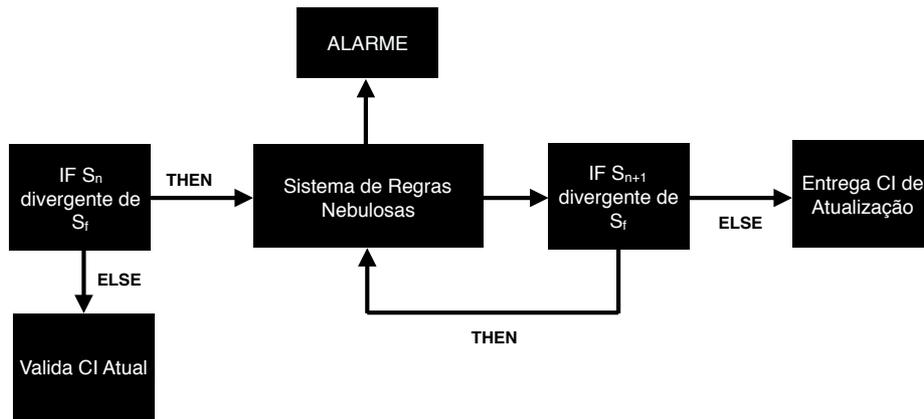


Figura 15: Diagrama do Sistema Proposto para Atualização do Cost Index
Fonte: Elaboração Própria

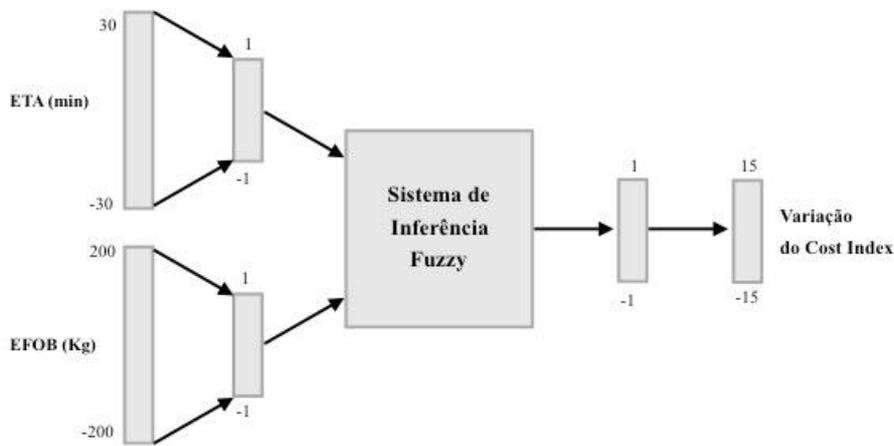


Figura 16: Detalhamento do Sistema de Inferência por Regras Nebulosas
Fonte: Elaboração Própria

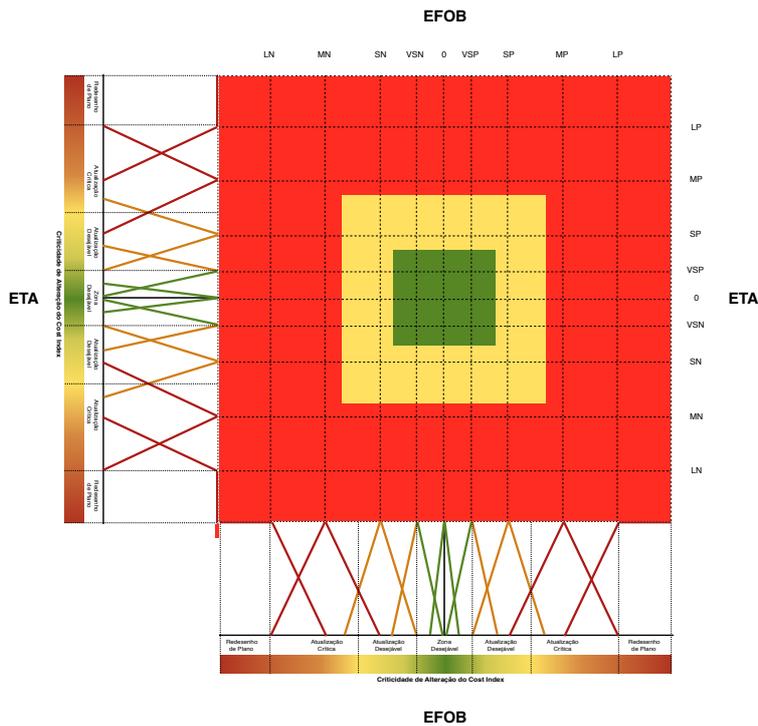


Figura 17: Criticidade das Regiões de Decisão do Sistema de Inferência.
 Fonte: Elaboração Própria

Após o primeiro ajuste o sistema realiza um conjunto de loopings até que os parâmetros atinjam uma zona de resultados ótimos aceitáveis. Em casos divergentes extremos dos planos iniciais da empresa aérea, o sistema de ALARME pode ser acionado com alertas diversos. No trabalho abordou-se como ilustração proposta o alarme para combustível crítico por ser ligado aos aspectos de segurança de vôo, mas também poderiam ser ajustados alarmes de perda de conexão de passageiros.

Apresenta-se, abaixo, um sistema de regras proposto. Observa-se que os limites inferiores e superiores de oscilação do sistema devem ser definidos, bem como o passo de alteração.

EFOB

	LN	MN	SN	VSN	0	VSP	SP	MP	LP
ETA	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN
	MN	LN	MN	MN	MN	MN	MN	MN	MN
	SN	LN	SN	SN	SN	VSN	VSN	VSN	VSN
	VSN	LN	VSN	VSN	VSN	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO
	0	LN	VSN	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO
	VSP	LN	ZERO	VSP	VSP	VSP	VSP	VSP	VSP
	SP	LN	ZERO	VSP	SP	SP	SP	SP	SP
	MP	LN	ZERO	SP	SP	MP	MP	MP	MP
	LP	LN	ZERO	MP	MP	LP	LP	LP	LP

Quadro 6: Regras Nebulosas com Termos Linguísticos Associados.

Fonte: Elaboração Própria

Para o exemplo de aplicação utilizou-se a ferramenta Matlab com Fuzzy Toolbox visando apresentar a modelagem dos triângulos para os parâmetros de entrada, saída e a superfície de decisão formada pelo sistema de inferência das 81 regras aplicadas. Em seguida apresentam-se 4 tabelas em que constam: os números fuzzy, a normalização aplicada, os números fuzzy duais e os números fuzzy duais normalizados com para cada um das variáveis de entrada, EFOB, ETA e, para a variável de saída CI CHANGE.

Limites para EFOB: $-200 < x < 200$ Unidades de Combustível

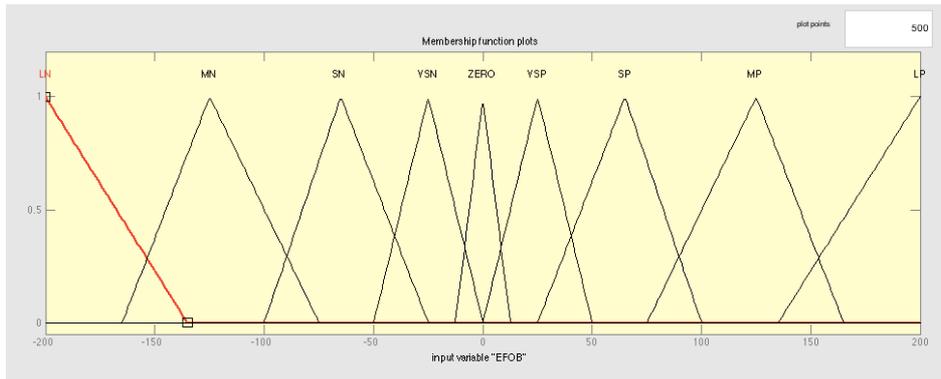


Gráfico 14: Números Fuzzy para os Termos Linguísticos de EFOB.
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.

	d	a	b	c	Norm	200	d	a	b	c
LN	-200,00	-200,00	-200,00	-135,00	LN	-1,00	-1,00	-1,00	-0,68	
MN	-175,00	-125,00	-125,00	-75,00	MN	-0,88	-0,63	-0,63	-0,38	
SN	-110,00	-65,00	-65,00	-20,00	SN	-0,55	-0,33	-0,33	-0,10	
VSN	-50,00	-25,00	-25,00	0,00	VSN	-0,25	-0,13	-0,13	0,00	
ZERO	-12,50	0,00	0,00	12,50	ZERO	-0,06	0,00	0,00	0,06	
VSP	0,00	25,00	25,00	50,00	VSP	0,00	0,13	0,13	0,25	
SP	20,00	65,00	65,00	110,00	SP	0,10	0,33	0,33	0,55	
MP	75,00	125,00	125,00	175,00	MP	0,38	0,63	0,63	0,88	
LP	135,00	200,00	200,00	200,00	LP	0,68	1,00	1,00	1,00	

Termo	a	b	Dual	Termo	Norm	200	Dual
LN	-200,00	65,00	$-200 + \varepsilon$ 65	LN	-1,00	0,33	$-1 + \varepsilon$ 0,33
MN	-125,00	50,00	$-125 + \varepsilon$ 50	MN	-0,63	0,25	$-0,63 + \varepsilon$ 0,25
SN	-65,00	45,00	$-65 + \varepsilon$ 45	SN	-0,33	0,23	$-0,33 + \varepsilon$ 0,23
VSN	-25,00	25,00	$-25 + \varepsilon$ 25	VSN	-0,13	0,13	$-0,13 + \varepsilon$ 0,13
ZERO	0,00	12,50	$0 + \varepsilon$ 12,50	ZERO	0,00	0,06	$0 + \varepsilon$ 0,06
VSP	25,00	25,00	$25 + \varepsilon$ 25	VSP	0,13	0,13	$0,13 + \varepsilon$ 0,13
SP	65,00	45,00	$65 + \varepsilon$ 45	SP	0,33	0,23	$0,33 + \varepsilon$ 0,23
MP	125,00	50,00	$125 + \varepsilon$ 50	MP	0,63	0,25	$0,63 + \varepsilon$ 0,25
LP	200,00	65,00	$200 + \varepsilon$ 65	LP	1,00	0,33	$1 + \varepsilon$ 0,33

Quadro 7: Matrizes com Números Fuzzy e suas Normalizações e Números Fuzzy Duais e suas Normalizações (EFOB)

Limites para ETA: $-30 < x < 30$ minutos

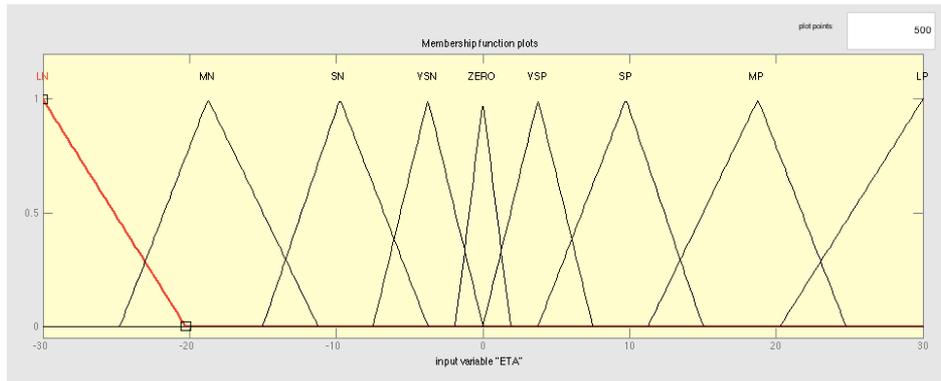


Gráfico 15: Números Fuzzy para os Termos Linguísticos de ETA.
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.

	d	a	b	c		Norm	30		
						d	a	b	c
LN	-30,00	-30,00	-30,00	-20,25	LN	-1,00	-1,00	-1,00	-0,68
MN	-25,75	-18,75	-18,75	-11,75	MN	-0,86	-0,63	-0,63	-0,39
SN	-17,75	-9,75	-9,75	-3,75	SN	-0,59	-0,33	-0,33	-0,13
VSN	-7,50	-3,75	-3,75	0,00	VSN	-0,25	-0,13	-0,13	0,00
ZERO	-1,88	0,00	0,00	1,88	ZERO	-0,06	0,00	0,00	0,06
VSP	0,00	3,75	3,75	7,50	VSP	0,00	0,13	0,13	0,25
SP	3,75	9,75	9,75	15,75	SP	0,13	0,33	0,33	0,53
MP	11,75	18,75	18,75	25,75	MP	0,39	0,63	0,63	0,86
LP	20,25	30,00	30,00	30,00	LP	0,68	1,00	1,00	1,00

Termo	a	b	Dual	Termo	Norm	30	Dual
					d	a	
LN	-30,00	9,75	$-30 + \varepsilon 9,75$	LN	-1,00	0,33	$-1,00 + \varepsilon 0,33$
MN	-18,75	7,00	$-18,75 + \varepsilon 7,00$	MN	-0,63	0,23	$-0,63 + \varepsilon 0,23$
SN	-9,75	6,00	$-9,75 + \varepsilon 6,00$	SN	-0,33	0,20	$-0,33 + \varepsilon 0,20$
VSN	-3,75	3,75	$-3,75 + \varepsilon 3,75$	VSN	-0,13	0,13	$-0,13 + \varepsilon 0,13$
ZERO	0,00	1,88	$0 + \varepsilon 1,88$	ZERO	0,00	0,06	$0 + \varepsilon 0,06$
VSP	3,75	3,75	$3,75 + \varepsilon 3,75$	VSP	0,13	0,13	$0,13 + \varepsilon 0,13$
SP	9,75	6,00	$9,75 + \varepsilon 6,00$	SP	0,33	0,20	$0,33 + \varepsilon 0,20$
MP	18,75	7,00	$18,75 + \varepsilon 7,00$	MP	0,63	0,23	$0,63 + \varepsilon 0,23$
LP	30,00	9,75	$30,00 + \varepsilon 9,75$	LP	1,00	0,33	$1,00 + \varepsilon 0,33$

Quadro 8: Matrizes com Números Fuzzy e suas Normalizações e Números Fuzzy Duais e suas Normalizações (ETA)

Limites para Mudança do CI por passo: $-15 < x < 15$

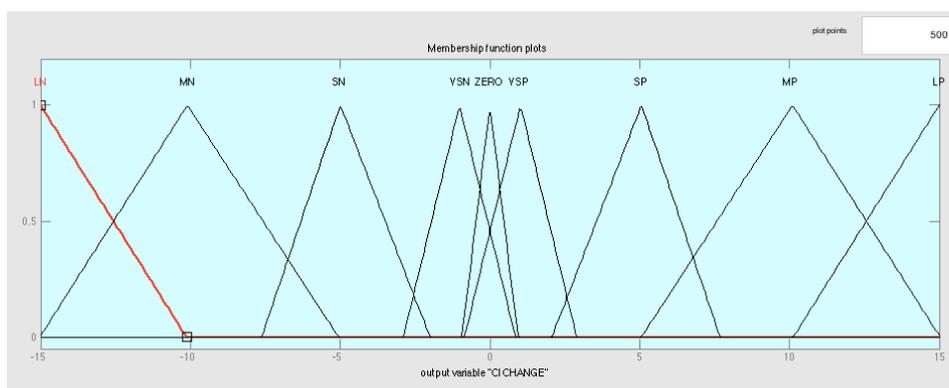


Gráfico 16: Números Fuzzy para os Termos Linguísticos de CI.
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.

	d	a	b	c		Norm	30		
						d	a	b	c
LN	-15,00	-15,00	-15,00	-10,00	LN	-1,00	-1,00	-1,00	-0,67
MN	-15,00	-10,00	-10,00	-5,00	MN	-1,00	-0,67	-0,67	-0,33
SN	-8,00	-5,00	-5,00	-2,00	SN	-0,53	-0,33	-0,33	-0,13
VSN	-2,50	-1,50	-1,50	-0,50	VSN	-0,17	-0,10	-0,10	-0,03
ZERO	-1,00	0,00	0,00	1,00	ZERO	-0,07	0,00	0,00	0,07
VSP	0,50	1,50	1,50	2,50	VSP	0,03	0,10	0,10	0,17
SP	2,00	5,00	5,00	8,00	SP	0,13	0,33	0,33	0,53
MP	5,00	10,00	10,00	15,00	MP	0,33	0,67	0,67	1,00
LP	10,00	15,00	15,00	15,00	LP	0,67	1,00	1,00	1,00

Termo	a	b	Dual	Termo	Norm	30	Dual
					d	a	
LN	-15,00	5,00	$-15 + \varepsilon 5,00$	LN	-1,00	0,33	$-1,00 + \varepsilon 0,33$
MN	-10,00	5,00	$-10,00 + \varepsilon 5,00$	MN	-0,63	0,23	$-0,63 + \varepsilon 0,23$
SN	-5,00	3,00	$-5,00 + \varepsilon 3,00$	SN	-0,33	0,20	$-0,33 + \varepsilon 0,20$
VSN	-1,50	1,00	$-1,50 + \varepsilon 1,00$	VSN	-0,13	0,13	$-0,13 + \varepsilon 0,13$
ZERO	0,00	1,00	$0 + \varepsilon 1,00$	ZERO	0,00	0,06	$0 + \varepsilon 0,06$
VSP	1,50	1,00	$1,50 + \varepsilon 1,00$	VSP	0,13	0,13	$0,13 + \varepsilon 0,13$
SP	5,00	3,00	$5,00 + \varepsilon 3,00$	SP	0,33	0,20	$0,33 + \varepsilon 0,20$
MP	10,00	5,00	$10,00 + \varepsilon 5,00$	MP	0,63	0,23	$0,63 + \varepsilon 0,23$
LP	15,00	5,00	$15 + \varepsilon 5,00$	LP	1,00	0,33	$1,00 + \varepsilon 0,33$

Quadro 9: Matrizes com Números Fuzzy e suas Normalizações e Números Fuzzy Duais e suas Normalizações (CI)

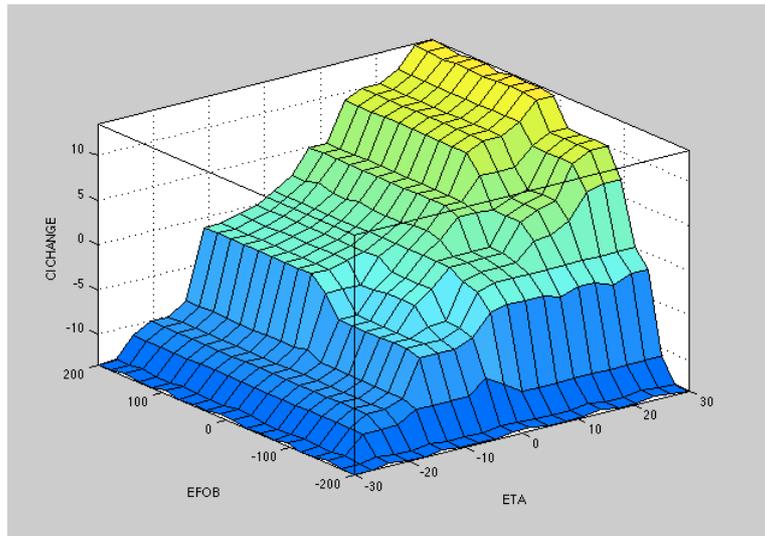


Gráfico 17: Superfície de Decisão EFOB x ETA X CI
Fonte: Elaboração Própria utilizando MATLAB.

O sistema é composto por 81 regras composta pelas 9 opções dos dois parâmetros de otimização. O cruzamento dos parâmetros gera uma região de decisão típica no qual o CI sugerido é exibido assim que os sucessivos loopings convergem o resultado para a região objetivo da otimização.

A estratégia da empresa aérea pode tornar o sistema de regras mais flexível, tolerando algum pequeno desvio entre os parâmetros objetivando preservar combustível ou tempo.

Observa-se valores intermediários aos típicos nos parâmetros são calculados pela soma das pertinências dos dois números fuzzy multiplicadas pelo valor típico do números fuzzy, tendo como resultado valores intermediários passíveis de interação.

O valor do CI obtido resultado da otimização é exibido ao piloto que pode aceitar ou não o resultado, sendo soberano no comando da aeronave.

Observa-se que a associação do nível de certeza do CI, será associado pela parte dual indicará o nível de certeza de que este CI será o CI final. Ao longo do tempo do plano de vôo, a incerteza do CI será reduzida até um valor mínimo.

Abaixo, um exemplo de um CI = 60 apresentando diferentes níveis de incerteza. O CI com maior nível de incerteza, representado pelo triângulo vermelho, indica que a possibilidade de que este CI seja alterado até o final da operação é elevada, enquanto que, no caso oposto representado pelo triângulo verde, indica que este CI é aceito como certo até o final do vôo.

Apesar de pouco explorado neste trabalho, esta associação poderia ser associada a incertezas de clima, informações de destino, etc, e não apenas ao tempo de vôo. A avaliação de destino, brevemente apresentada neste trabalho pode influenciar nesta medida de CI Dual, em que a parte dual será resultante da soma do efeito do tempo de vôo (estágios percorridos) e da avaliação de destino.

A associação destes dois fatores irá gerar diferentes patamares de incerteza associados ao CI.

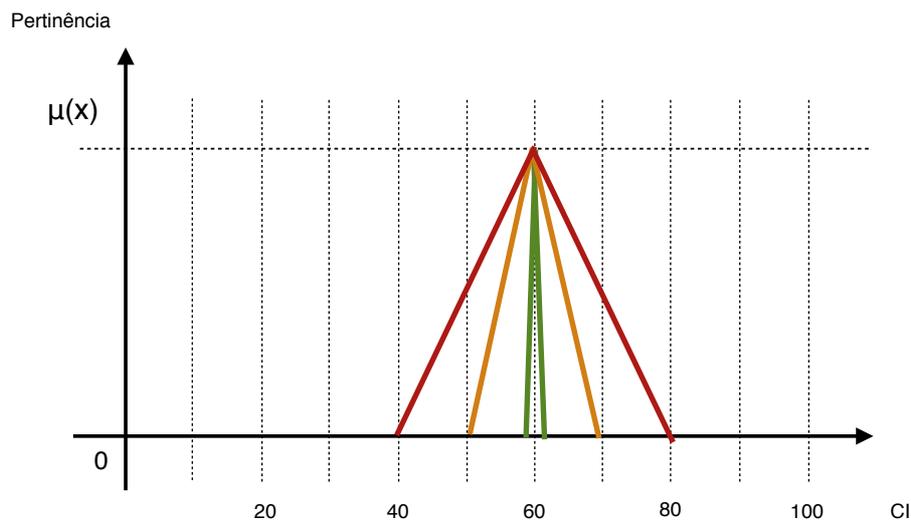


Gráfico 18: Exemplo de um mesmo valor de Cost Index em diferentes Níveis de Incerteza Dual

Verde: $CI = 60 + \varepsilon 2$

Amarelo: $CI = 60 + \varepsilon 10$

Vermelho: $CI = 60 + \varepsilon 20$

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO GERAL

O ambiente altamente competitivo, hoje, encontrado pelas companhias aéreas os conduz ao a fornecimento de um serviço de transporte aéreo de alta qualidade para seus clientes, buscando, sempre que possível, minimizar seus custos de operação. A gestão dos custos de operações, no contexto atual da indústria do transporte aéreo, é uma questão muito complexa e o conceito de índice de custo fornece às companhias aéreas uma oportunidade de explorá-lo em suas estratégias, bem como, em uma abordagem dos parâmetros em nível tático, para equilibrar os custos relacionados ao uso do combustível e do tempo. No entanto, a configuração eficiente do índice de custos em regime tático parece ser uma tarefa complexa para o piloto.

A presente proposta de reajuste do CI com apoio de ferramenta de tomada de decisão ao piloto é fundamental para melhoria da performance das empresas aéreas com benefícios ao setor.

O setor tem benefícios na medida em que o cumprimento de horários pré-programados auxiliam na melhoria de desempenho de todas as atividades de apoio e suporte ao vôo. Esta proposta associada com a implantação de sistemas de tomada de decisões colaborativas são maneiras modernas de enfrentar os diferentes níveis de incerteza do mundo moderno, sendo exigência para a manutenção de níveis de desempenho mais elevados necessários e exigidos para o crescimento do setor aéreo como um todo, atendendo a demanda crescentes e ao uso otimizado de uma infraestrutura estrangulada com muitas deficiências.

O sistema de informações organizado, a tomada de decisões regradas e a otimização das operações são grandes desafios do setor que, apesar de elevado nível de maturidade, sobretudo em aspectos de segurança, ainda atua de maneira moderadamente integrada. As soluções pontuais neste ambiente são colaboradoras da elevação da maturidade com pequenos incrementos a estes níveis.

É preciso ter a consciência que otimizar operações em vôo para recuperação de tempo ou para economia de combustível está diretamente associado ao desempenho operações de solo. Estas operações afetam o objetivo de economia de combustível e de

elevação de níveis de comprometimento ambiental na aviação. Os atrasos afetam a rede e se propagam em tempo e espaço, como uma epidemia, no chamado network delay. Isso ocorre porque um aeroporto com problemas operacionais afeta a operação de todos os destinos aos quais ele é ligado por vôos destino. Cada aeroporto tem uma capacidade de resiliência maior ou menor para lidar com estes atrasos. Um exemplo claro deste efeito, é ligado também aos aspectos do clima, quando recentemente os aeroportos europeus sofreram o efeito do mal tempo com a ação da neve fechando diversos aeroportos. Neste caso a rede inteira é afetada e passa a operar sob o efeito quase caótico. Lidar com a disruptura é um dos grandes desafios e estudos atuais buscam reduzir este tempo e como lidar com uma bruta quantidade de alterações e redistribuições de destinos.

Encerrando, concluímos que o sistema especialista proposto é uma contribuição interessante que associa simultaneamente o simples de processamento lidando com a extrema complexidade computacional. O sistema não precisa de muitas informações além das disponíveis, ainda que brevemente incertos, para estabelecer níveis de precisão elevados. Mesmo assim, registra-se que entradas ruins geram saídas ruins, mesmo neste caso sendo incorporados pela grande flexibilidade dos sistemas nebulosos em dialogar com dados imprecisos.

Observa-se ainda que estudos mais profundo devem ser realizados para analisar o efeito das divergências de massa entre o inserido no FMS e o real, um input incerto, medianamente preciso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-SINNA, M., A. Multi-objective (fuzzy) dynamic programming problems: a survey and some applications. *Applied Mathematics and Computation*, Amsterdam, v.157, n. 3, p. 861-888, out 2004.

AIRBUS. *Global Market Forecast – 2012*. Blagnac, 2012. p. 140.

AIRBUS. *Getting to grips with Cost Index – 1998*. Blagnac, 1998. p. 103.

BELLMAN, R. *Dynamic Programming*. Princeton: Princeton University Press, 2010.

BELLMAN, R.; Zadeh L., A. Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*, Maryland, vol.17, p. 141-164, 1970.

BRADLEY, S., P.; HAX, A., C.; MAGNANTI, T., L. *Applied Mathematical Programming*. 1ed. Boston: Addison-Wesley, 1977.

CANTOR, G. On a property of the Collection of all Real Algebraic Numbers. *Crelle's Journal for Mathematics*, vol. 77, p. 258–262, 1874.

CLIFFORD, W., K., In: PROC. LONDON MATHEMATIC SOCIETY. London: C. F. Hodgson & Sons, 1873, vol. 4, p. 381-395.

COSENZA, C., A., Nunes.; MORA-CAMINO, Felix. *Nombres et ensembles duaux flous et applications*. Technical report, LMF Laboratory, COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2011.

COSENZA, C., A., Nunes.; MORA-CAMINO, Felix. Fuzzy dual entropy and trip distribution in transportation systems, In: PROCEEDINGS OF THE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF HONG KONG SOCIETY FOR TRANSPORTATION STUDIES. Hong Kong, 2012, p. 15-17.

COSENZA, C., A., Nunes.; LENGUERKE, O.; MORA-CAMINO, F. Fuzzy sets and dual numbers: an integrated approach. In: PROCEEDINGS OF 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SETS AND KNOWLEDGE DISCOVERY. Chongqing, 2012, p.81-86.

COSENZA, C. A. Nunes ; KRYKHTINE, F. L. P. ; MORA-CAMINO, F. ; MOUDANI, W. E. . Introduction to Fuzzy Dual Mathematical Programming. In: FUZZY SYSTEMS AND DATA MINING. Macau, 2016. Amsterdam: IOS Press, 2016, v. 1, p. 1-637.

- COOK A.; TANNER G.; LAWES A. The Hidden Cost of Airline Unpunctuality. *Journal of Transport Economics and Policy*, Bath: University of Bath, vol. 46, n. 2, p. 157-173, 2012.
- DUBOIS, D.; PRADE, H. *Possibility theory*. New York: Plenum Press, 1988.
- ESOGBUE, A., O. Dynamic programming, fuzzy sets and the modeling of R&D management control systems. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13, New York, p. 18-30, 1983.
- ESOGBUE, A., O., Optimal clustering of fuzzy data via fuzzy dynamic programming. *Fuzzy sets and Systems*, Amsterdam, vol. 18, n. 3, p. 283-298, 1986.
- ESOGBUE, A., O., The computational complexity of some fuzzy dynamic programs. *The International Journal of Computers and Mathematics with Applications*, New York, vol. 37, p. 47-51, 1999.
- ESOGBUE, A., O.; BELLMAN, R. A fuzzy dynamic programming algorithm for clustering non-quantitative data arising in water pollution control planning. In: PROCEEDINGS OF 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL MODELING. California, USA, 1981.
- ESOGBUE, A., O.; BELLMAN, R. Fuzzy dynamic programming and its extensions. *TIMS/Studies in the Management Sciences*, vol. 20, p.147-167, 1984.
- ESOGBUE, A., O.; RAMESH, V. *Dynamic programming and fuzzy allocation processes*. Technical Memo No. 202, Department of Operations Research, Western University, Cleveland, USA, 1970.
- HILLIER, S., F.; LIEBERMAN, J., G. *Introduction to operations research*. 9th ed. Singapore: McGraw Hill International Edition, 2010.
- FAYE, R., M.; SAWADOGO, S.; MORA-CAMINO, F. Logique floue appliquée à la gestion à long-terme des ressources en eau. *Revue des sciences de l'eau*, Paris, vol. 15, n. 3, p. 579-596, 2002.
- JOVANIC R. The cost of passenger delays to airlines: an assessment of the impact of the regulation (EC) 261/2004. In: 12TH AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY WORLD CONFERENCE, 2008, Athens.
- KACPRZYK, J. Decision-making of a non-fuzzy system in a fuzzy environment with fuzzy termination time. *Systems Science*, vol 3, p. 325-341, 1977.

- KACPRZYK, J. *Multistage decision making under fuzziness*. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1983.
- KACPRZYK, J. *Multi-stage fuzzy control: A model based approach to control and decision making*. Chichester: Wiley, 1997.
- KACPRZYK, J.; ESOGBUE, A., O. Fuzzy dynamic programming: Main developments and applications. *Fuzzy sets and systems*, Amsterdam, vol. 81, p. 31-45, 1996.
- KACPRZYK, J.; STRASZAK, A. Application of fuzzy decision making models for determining optimal policies in ‘stable’, integrated regional development. In: WANG, P., P.; CHANG, S., K. (Eds.). *Fuzzy Sets Theory and Applications to Policy Analysis and Information Systems*. New York: Plenum Press, 1981, p. 321-328.
- KACPRZYK, J.; STRASZAK, A. A fuzzy approach to the stability of integrated regional development. In: LASKER, G., E. (Ed.). *Applied Systems and Cybernetics*. New York: Pergamon Press, 1982, vol.6, p. 2997-3004.
- KACPRZYK, J.; STRASZAK, A. Determination of ‘stable’ regional development trajectories via a fuzzy decision making model. In: YAGER, R., R. (Ed.). *Recent developments in Fuzzy Sets and Possibility Theory*. New York: Pergamon Press, 1982, p. 531-541.
- KACPRZYK, J.; STRASZAK, A. Determination of stable trajectories for integrated regional development using fuzzy decision models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-14, New York, p.310-313, 1984.
- KLIR, G., J. *Uncertainty and information – Foundations of generalized information theory*. New Jersey: Wiley Interscience, 2006.
- KLIR, G., J.; WIERMAN, M., J. *Uncertainty-based information*. New York: Physica-Verlag, 1998.
- KRYKHTINE, F. L. P.; CAPITANUL-CONEA, E. ; COSENZA, C. A. Nunes; CAMINO, F. A. C. M. . Fuzzy Dual Dynamic Programming. In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL COMPUTATION, FUZZY SYSTEMS AND KNOWLEDGE DISCOVERY. Changsha, 2016.
- KRYKHTINE, F. L. P.; CAPITANUL-CONEA, E. ; COSENZA, C. A. Nunes ; MORA-CAMINO, F. ; ALFAZARI, H. . Airport Planning Using Fuzzy Dual Dynamic Programming. In: ANAIS DO XV SITRAER. São José dos Campos: ITA, 2016.

- KRYKHTINE, F. L. P.; RAYMUNDO, L. O. G. A. ; COSENZA, C.A. Nunes ; CAMINO, F. A. C. M. ; PITFIELD, D. . Fuzzy Modelling Applied to Assessment of Impact Factors for Air Cargo Demand - Scenario Emulation. In: 19TH ATRS WORLD CONFERENCE. Singapore, July 2-5, 2015. Maryland: Airport Transport Research Society, 2015.
- KRYKHTINE, F. L. P.; RAYMUNDO, L. O. G. A. ; COSENZA, Carlos Alberto Nunes ; COSTA, K. M. . Fuzzy Logic Application to Pricing Strategy in Airline Revenue Management. In: AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY WORLD CONFERENCE, Bordeaux, 2014. Maryland: ATRS, 2014.
- KRYKHTINE, F. L. P.; COSENZA, C. A. Nunes ; MORA-CAMINO, F. Improving Cost Index Setting for Flight Management With Fuzzy Logic Approach. In: XVI SITRAER - Simpósio de Transporte Aéreo SBTA, 2017, Rio de Janeiro. XVI SITREAR. São José dos Campos: SBTA, 2017. v. 1. p. 1-15.
- PARIDA, P., K. Fuzzy dynamic system approach to multistage decision making problems. *Ultra Scientist*, Bhopal, vol. 25(2)A, p. 350-360, 2013.
- RAYMUNDO, L. O. G. A. ; KRYKHTINE, F. L. P. ; COSENZA, Carlos Alberto Nunes Fuzzy Model Applied to Impact Assessment of Air Cargo Demand. In: AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY WORLD CONFERENCE, Bordeaux, 2014.
- ROBERSON, B. Fuel Conservation Strategies: Cost Index Explained. *Aeromagazine*, Seattle 2007, vol 27, n. 2, p. 26-28, 2007.
- STEIN W., E. Optimal stopping in a fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, vol. 3, p. 252-259, 1968.
- UNIVERSITY OF WESTMINSTER - DEPARTMENT OF TRANSPORT STUDIES. *Evaluating the true cost to airlines of one minute of airborne or ground delay*. 4 ed. Brussels: Eurocontrol, 2004.
- WALTER. R. Flight Management Systems. In: SPITZER, C. R. (Ed.). *The Avionics Handbook*. Virginia: CRC Press LLC, 2001. 2ed.
- WIERNAN, J., M. *An introduction to mathematics of uncertainty*. California: Creighton University, 2010.
- ZADEH, L., A. Fuzzy sets. *Information and Control*, Amsterdam, vol. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- ZADEH, L., A. Fuzzy algorithms. *Information and Control*, Amsterdam, vol.12, p. 94-102, 1968.

ZADEH, L., A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3, New York, p. 28-44, 1973.

ZADEH, A.L.; FU, K.; TANAKA, K., SHIMURA, M. *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. Massachusetts: Academic Press, 1975.

ZADEH, L., A. From imprecise to granular probabilities. *Fuzzy set and Systems*, Amsterdam, vol. 154, p. 370-374, 2005.

ZADEH, A., L. Toward extended fuzzy logic – A first step. *Fuzzy Sets and Systems*, Amsterdam, vol. 160, p. 3175-3181, 2009.

ZIMMERMANN, H., J. Optimization in fuzzy environment. In: XXI INTL. TIMS AND 46TH ORSA CONFERENCE, San Juan, Puerto Rico, 1974.

ZIMMERMANN, H., J. An application-oriented view of modeling uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, vol. 122, p. 190-198, 2000.

ZIMMERMANN, H., J. *Fuzzy set theory*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.

ANEXO

A. ELEMENTOS ALGORITMICOS ASSOCIADOS A OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE VÔO

Neste anexo são apresentados os elementos de cálculo para o desenvolvimento da abordagem proposta no capítulo VII desta tese. A maioria destes elementos adotam a representação fuzzy dual para o tratamento das incertezas associadas ao problema considerado. É um ensaio livre do autor.

A.1 ALGORITMO PROPOSTO PARA OTIMIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

O que pretende-se aqui é realizar um cálculo para uso mais eficiente do combustível, através de um algoritmo de tomada de decisão, em que uma vez determinadas as orientações da estratégia, possa-se realizar inferência no controle de velocidade da aeronave, redesenhando seu perfil vertical para uma trajetória que seja mais econômica.

Estima-se que se esta medida de otimização for adotada, resultará na economia de alguns milhares de dólares, se considerada uma empresa de operações de porte médio. Para as empresas de grande porte, com operações globais e longos trajetos, a adoção da otimização tem impacto econômico ainda maior, sendo importante componente da sua competitividade.

Este cálculo não é de maneira nenhuma trivial. A categorização das variáveis e a geração de feições de variáveis capazes de modelar aspectos complexos que interferem na performance de financeira de um dado vôo, a exemplo de temperatura, pressão, velocidade do vento, altitude, velocidade, peso da aeronave, capacidade de combustível, quantidade de passageiros em conexão, entre outras, variáveis estas que resultam em custos por consumo de combustível e tempo.

Os custos de uma operação de transporte aéreo de passageiros, a exemplo, são diversos:

A) Diretamente ligados a satisfação do passageiro, cumprimento de indicadores de qualidade de serviço. Além da imagem, responsabilidades diretas com a necessidade de oferecer suporte a passageiros no caso de perda de conexão, cancelamento de vôo, atrasos e demais situações que trazem risco financeiro crescente ao ambiente operacional.

B) Diretamente ligado a operação, com a disponibilidade de infraestrutura, recursos operacionais para suporte do serviço e taxas.

Considerando que um vôo deva sempre cumprir horário, nosso algoritmo considera a otimização em função do cumprimento pontual da operação programada. A operação pontual facilita a programação dos demais serviços na recepção da aeronave e não onera a operação de custos de perda de conexão ou ligados a satisfação do passageiro por pontualidade.

Outros ajustes são possíveis, agregando ao sistema de otimização as seguintes restrições:

1. Menor tempo possível de viagem, sendo representado pelo limite superior de velocidade.
2. Maior distância possível viajada, sendo otimizado o combustível e aspectos aerodinâmicos.

O algoritmo proposto utilizará programação dinâmica e, de fato, avaliará as diversas possibilidades de realizar os diferentes estágios do perfil horizontal do vôo observando a orientação estratégica e intercalando, quando necessário, velocidade nos diversos segmentos.

A alteração do COST INDEX (CI) ocorrerá a cada estágio podendo, de acordo com as diversas variáveis de entrada no estante S_k , realizar o incremento ou supressão do valor do CI para responder ao objetivo estratégico.

O CI realizará a adequação do perfil de vôo definindo a nova altitude (FL) e velocidade, ótimas para a melhor performance da aeronave.

Estas alterações ocorrem caracterizadas como tomada de decisão tática e só podem ser avaliadas no momento do vôo, em dado estado, frente às diversas características do ambiente, a imprevisibilidade de fenômenos climáticos, que podem inferir positivamente ou negativamente no consumo de combustível, um mesmo no tempo estimado para chegada (ETA).

O algoritmo considera ainda a perda de massa de combustível ao longo tempo de vôo. Esta perda de massa se dá pelo consumo do combustível ao longo da operação. Em um Boeing 737, por exemplo, o volume de combustível é superior a 20 Toneladas.

A velocidade e ângulo dos ventos dos diversos períodos considerados na avaliação é outra variável que tem impacto relevante na otimização, dado que os ventos de proa interferem positivamente e os de poupa negativamente no consumo de combustível. Basicamente, o vento de cauda impulsiona a aeronave, enquanto os de proa representam em maior esforço aerodinâmico.

O algoritmo tem em sua modelagem, ainda, a restrição aerodinâmica que impede que a aeronave se danifique por excesso de velocidade ou entre stall por falta de sustentação, gerada por velocidade inadequadamente baixa.

Assim, descreveremos a frente a modelagem identificando as variáveis e seus comportamentos para descrevê-los em funções, as fontes de incerteza e seus impactos para simular suas ocorrências, e por fim, as características iniciais da aeronave, seu peso, quantidade de combustível e passageiros.

O algoritmo realizará a inferência para cálculo: do ângulo de ataque, da altitude e da velocidade em cada instante para o cumprimento do objetivo estratégico: voar mais tempo, chegar pontualmente, antecipar a chegada do vôo ao limite máximo.

A.2 AMBIENTE DE AVALIAÇÃO PARA SIMULAÇÃO

O ambiente de avaliação será modelado com base em informações consideradas em operações de planejamento de trajetória e introduz alguns dos elementos que serão apresentados em módulos e terão atuação no cálculo do Cost Index proposto.

Alguns dos elementos são discretos e outros carregam grande incerteza e serão descritos de maneira a interagir com o sistema de inferência do cálculo com a aplicação de ferramentais da lógica fuzzy tradicionais e por fuzzy dual.

O ambiente em que deseja-se modelar é apresentado na figura a seguir.

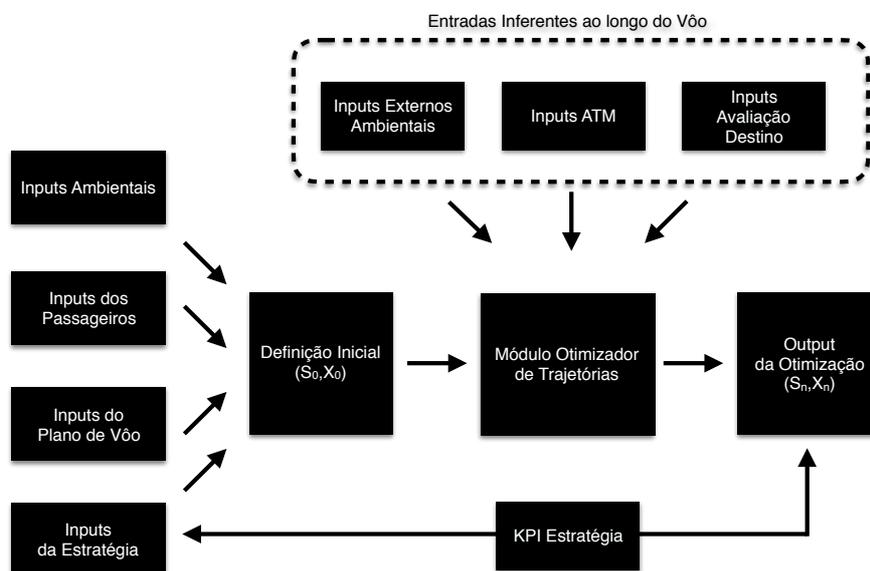


Figura 18: Visão Sistêmica das Entradas e Incertezas.
Fonte: Elaboração Própria

A.3 CARACTERIZAÇÃO DOS INPUTS DO SISTEMA DECISÓRIO

Inputs Ambientais

Os inputs ambientais são informações relativas a temperatura, ventos, eventos climáticos e serão considerados em cada etapa do voo.

Inputs dos Passageiros

Os inputs dos passageiros são moderadamente considerados em cálculos de Cost Index, embora sejam importantes pois podem representar impactos financeiros significativos. A caracterização deste input neste processo se inicia com a composição da listagem de passageiros conforme figura abaixo.

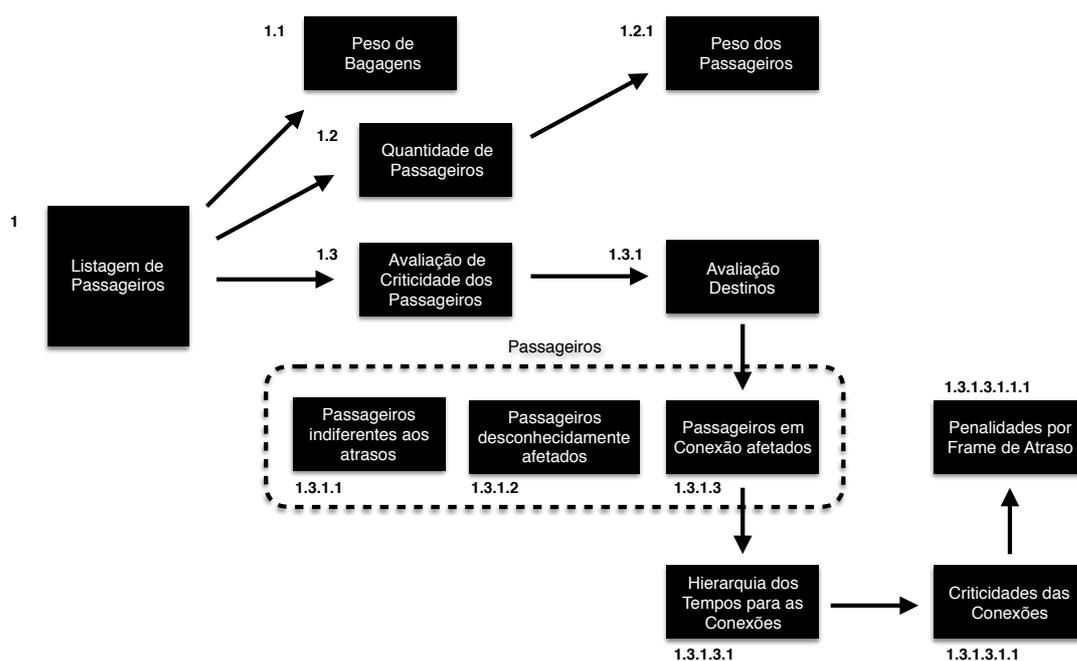


Figura 19: Detalhamento das Incertezas ligadas a Lista de Passageiros.

Fonte: Elaboração Própria

Observa-se no diagrama os diversos níveis de informação e as possibilidades de tratamento investigativo das informações impactantes nas receitas das companhias aéreas resultante de penalidades por danos aos passageiros.

Destaca-se neste framework a quantidade de dados que podem ser obtidos e são desconsiderados em análises para alimentação de operações táticas.

É certo que este esforço computacional e de coletar dados deverá ser ponderado, mas no destaque que apresenta-se, a maior parte das informações já são consideradas em sistemas e subsistemas de informações disponíveis que permitem a gestão mais eficaz de custos de penalidades e satisfação destes passageiros.

Uma parte pouco contabilizada no impacto da imagem da empresa, com contabilização muito subjetiva por insatisfação.

Nesta visão, estabelece-se então uma caracterização dos passageiros como maneira de obter informações relevantes na tomada de decisões táticas. Tem-se então as variáveis divididas em variáveis discretas e estimadas nebulosas:

Variável	Tipo de Variável
Peso das Bagagens	discreta
Quantidade de Passageiros	discreta
Peso dos Passageiros	nebulosa estimada
Avaliação de Criticidade dos Passageiros	nebulosa estimada
Avaliação de Destinos	discreta
Passageiros Indiferentes aos atrasos	nebulosa estimada
Passageiros Desconhecidamente Afetados	nebulosa estimada
Passageiros em Conexão Afetados	discreta
Hierarquia de Tempos para as Conexões	discreta
Criticidade das Conexões	nebulosa estimada
Penalidades Por Frame de Atrasos	nebulosa estimada

Quadro 8: Tipos de Variáveis e Incertezas Associadas.
Fonte: Elaboração Própria

Peso das Bagagens	discreta
--------------------------	-----------------

Obtido através da operação de pesagem das bagagens durante o check in de passageiros. Esta medida tem pouca incerteza um vez que é medida individualmente na emissão de cartões de embarque, sendo inclusive, fonte de receita para a empresa.

Quantidade de Passageiros	discreta
----------------------------------	-----------------

A quantidade de passageiros em um voo é obtido ao fim da operação de check in e representa uma informação relevante ao estabelecer em um primeiro momento o quantitativo de lugares ocupados na aeronave. Este valor dividido por sua capacidade nos fornecerá a taxa de ocupação.

$$\text{Taxa de Ocupação} = \text{Assentos Ocupados} / \text{Assentos Disponíveis}$$

A taxa de ocupação é um dado interessante mas pouco nos traduz quanto a receita do voo, que é obtida através da estratégia comercial e da prática de *revenue management*.

Peso dos Passageiros	nebulosa estimada
----------------------	-------------------

A.4 ESTIMAÇÃO DO PESO DA CARGA E DOS PASSAGEIROS

Enquanto a bagagem é pesada, os passageiros possuem uma avaliação pouco discreta, sendo estimada por um peso médio. Este valor está longe da realidade, sendo esta variável estimada e uma fonte de nebulosidade.

Na Finlândia, a empresa Finnair (notícia publicada no UOL em 7 de novembro de 2017) começou a pesar passageiros antes do embarque. A empresa manifesta que a intenção não é cobrar sobrepeso, mas sim calcular de maneira mais apurada o peso de

suas aeronaves. A Finnair quer comparar os dados reais obtidos com a pesagem com os valores utilizados atualmente, determinados pela Easa, a agência europeia de aviação civil. O peso padrão utilizado nos cálculos atuais dos vôos é de 84,6 kg para homens, 66,6 kg para mulheres e 30,7 kg para crianças.

Homens	Mulheres	Crianças
84,6 kg	66,6 kg	30,7 kg

Quadro 9. Peso médio de Passageiros adotado pela Agência Européia de Aviação Civil. Fonte: UOL

O peso dos passageiros não é muito destacado na literatura como importante mas considerando que é uma parte da massa da aeronave computada em vôo que permanece contínua, ao contrário do combustível que decresce ao longo do tempo, a estimativa mais afinada desta massa poderia revelar ganho na variável de entrada de algumas toneladas para uma aeronave de porte médio conforme apresentado no estudo de sensibilidade abaixo.

Enquanto os valores médios entregam um resultado 12.480 Kg para um grupo de passageiros, caso os passageiros fossem efetivamente pesados, a medida real com suficientes taxas de precisão seria identificada.

Abaixo um exemplo de como estes pesos podem oscilar e agregar massa a um vôo:

156 Passageiros de 80,00 Kg representam 12.480 Kg

Caso Extremo Superior: 156 Passageiros de 120,00 Kg representam 18.720 Kg

Caso Extremo Inferior: 156 Passageiros de 60,00 Kg representam 9.360 Kg

78 Passageiros de 60,00 Kg e 78 Passageiros de 120,00 Kg representam 14.040 Kg

A maneira sugerida neste trabalho de estimar melhor este dado é com o reconhecimento do passageiro no check in com avaliação nebulosa. Neste caso sugere-se atribuição de um perfil de três escalas e um índice de certeza associado.

$$m_{passageiro\ i} = a_i + \varepsilon b_i$$

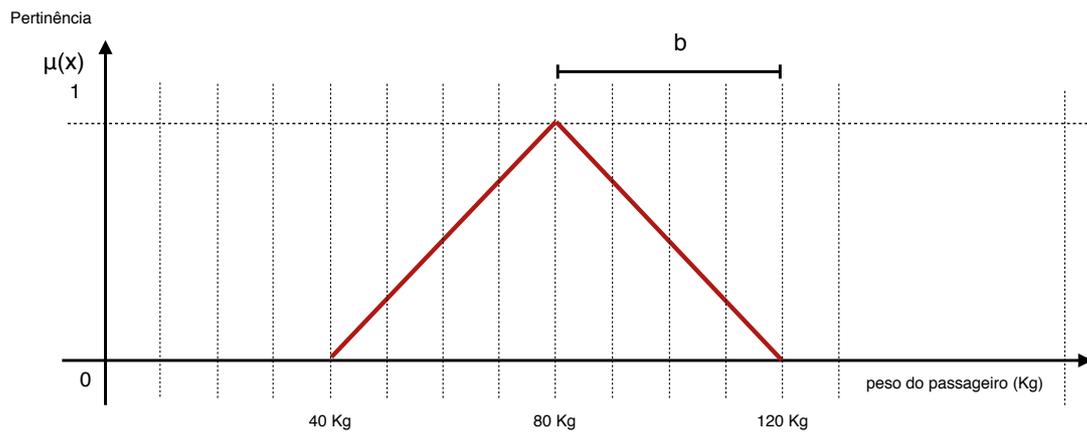


Gráfico 19: Uso de Números Fuzzy Dual para Estimação de Massa de Passageiros

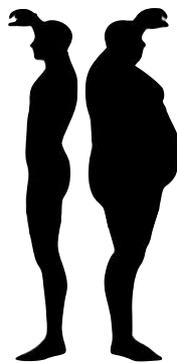


Figura 20: Silhueta de dois corpos humanos masculinos de pesos bem diferentes

Peso (Kg) x Incerteza	Alta	Média	Baixa
Pesado	$120 + \varepsilon 40$	$120 + \varepsilon 20$	$120 + \varepsilon 10$
Médio	$80 + \varepsilon 20$	$80 + \varepsilon 15$	$80 + \varepsilon 10$
Leve	$60 + \varepsilon 20$	$60 + \varepsilon 10$	$60 + \varepsilon 5$
Criança	$30 + \varepsilon 15$	$30 + \varepsilon 10$	$30 + \varepsilon 5$

Quadro 10: Exemplo de Medidas de Peso e Incerteza Associados

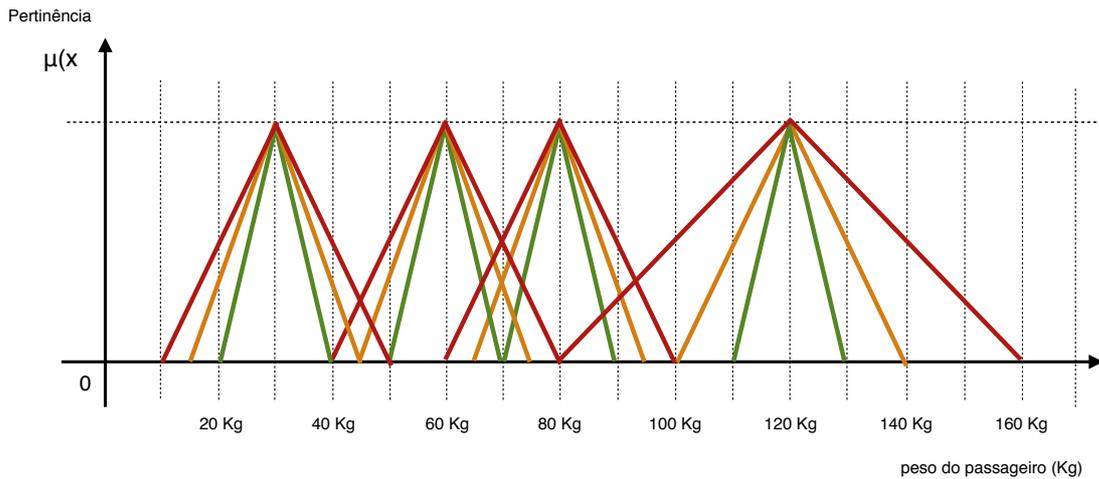


Gráfico 20: Diferentes Massas em 4 categorias de passageiros e incertezas associadas para cada uma delas.

A massa total estimada dos passageiros seria então traduzida por uma medida nebulosa dual em que uma parte primal seria o valor da massa estimada por uma avaliação visual do passageiro no ato do check in e a parte dual seria atribuída em três níveis de incerteza associados na avaliação conforme a equação abaixo:

$$\sum_{1}^{i=n} a_i + \varepsilon b_i$$

Peso (Kg) x Incerteza	Alta		Média		Baixa	
Pesado	120 + ε 40		120 + ε 20		120 + ε 10	
Max e Min	80	160	100	140	110	130
Médio	80 + ε 20		80 + ε 15		80 + ε 10	
Max e Min	60	100	65	95	70	90
Leve	60 + ε 20		60 + ε 10		60 + ε 5	
Max e Min	40	80	50	70	55	65
Crianças	30 + ε 15		30 + ε 10		30 + ε 5	
Max e Min	15	45	40	20	35	25

Quadro 11: Demonstração da Categorização Peso x Incerteza para valores limites.

Fonte: Elaboração Própria

Observa-se que estas sugestões de medidas e apurações, associando informações precisas o suficiente ou minimamente associados com níveis de incerteza que possibilitem o desenvolvimento de otimizações mais coerentes com a realidade das operações são importantes na determinação da massa da aeronave, com incidência de taxas e inferência direta na trajetória prevendo maior ou menor desempenho.

Evidentemente existem outras informações como os equipamentos embarcados se serviço e demais massas estimadas ou tomadas como medidas média por passageiro que influenciam na massa total da aeronave. De fato, além do peso seco da aeronave e da carga de combustível em tanque, existe muita nebulosidade.

Esta nebulosidade poderia estabelecer ganhos econômicos no desenho das trajetórias e a investigação se faz necessária. A oferta de uma simples revista para leitura abordo pode representar o incremento de algumas dezenas de quilos, fato que é incrementado a cada oferta de facilidades, tais como vendas a bordo (que obriga a empresa a manter carrinho e um mini estoque de itens na aeronave) e etc.

Nos estágios da trajetória em que ocorre angulação da aeronave (γ), com destaque para as fases da decolagem ao cruzeiro, a velocidade é afetada pela massa como apresenta a equação abaixo, exigindo maior energia das turbinas (Thrust).

$$\dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{Z} \\ \dot{x} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T-D}{m} - g \cdot \sin \gamma \\ V_a \cdot \sin \gamma \\ V_a \cos \gamma + V_w \\ -Q\rho_f \end{bmatrix}$$

Propõe-se a incorporação do valor nebuloso dual descrito por $m + \varepsilon m_i$ como forma de dialogar em uma operação de otimização com os níveis de incerteza reais das etapas posteriores.

$$\dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{Z} \\ \dot{x} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T-D}{m+\varepsilon m_i} - g \cdot \sin \gamma \\ V_a \cdot \sin \gamma \\ V_a \cos \gamma + V_w \\ -Q\rho_f \end{bmatrix}$$

A.5 AVALIAÇÃO DE CRITICIDADE DOS ELEMENTOS DECISÓRIOS

Avaliação de Criticidade dos Passageiros	nebulosa estimada
---	--------------------------

Esta avaliação de criticidade tem por objetivo caracterizar os passageiros em grupos que colocam a operação em algum nível de risco. Desta maneira, o primeiro dado possível de obter é relativo a quanto um passageiro é afetado num atraso, buscando tangibilizar o custo deste atraso para as partes. Desta maneira o raciocínio lógico nos conduz as questões:

Avaliação de Destinos	Discreta e objetiva
------------------------------	----------------------------

Quantos Passageiros estão em Conexão?

Obtem-se resposta para passageiros diretamente afetados pelos atrasos por conta de suas conexões. Neste conjunto existem, ainda, passageiros indiferentes ao atraso e passageiros que são desconhecidamente afetados (por conta de perder compromissos ou eventos programados que não são revelados mas que depõem contra a imagem da empresa) e que a empresa não tem informação.

Passageiros Indiferentes aos atrasos	nebulosa estimada
Passageiros Desconhecidamente Afetados	nebulosa estimada
Passageiros em Conexão Afetados	discreta

2 – Qual a hierarquia de intervalo de tempo para as Conexões? Qual o menor intervalo? Qual o segundo menor intervalo? E assim por diante.

3 – Qual é a Oferta de Vãos para substituição destas Conexões?

Como saída, para tratamento dos passageiros em conexão, pode-se estabelecer uma listagem matricial como a exemplificada abaixo que promove a associação do tempo de atraso ao risco que a empresa possui em receber penalidades.

Hierarquia de Tempos para as Conexões	discreta
Criticidade das Conexões	nebulosa estimada
Penalidades Por Frame de Atrasos	nebulosa estimada

O tratamento das informações pode ser caracterizado por conjuntos nebulosos associados para destinos, ofertas e riscos.

O destino estará diretamente associado aos níveis de custo de passagens. De acordo com as faixas de preços, os valores das passagens podem ser divididos em categorias associadas aos termos linguísticos.

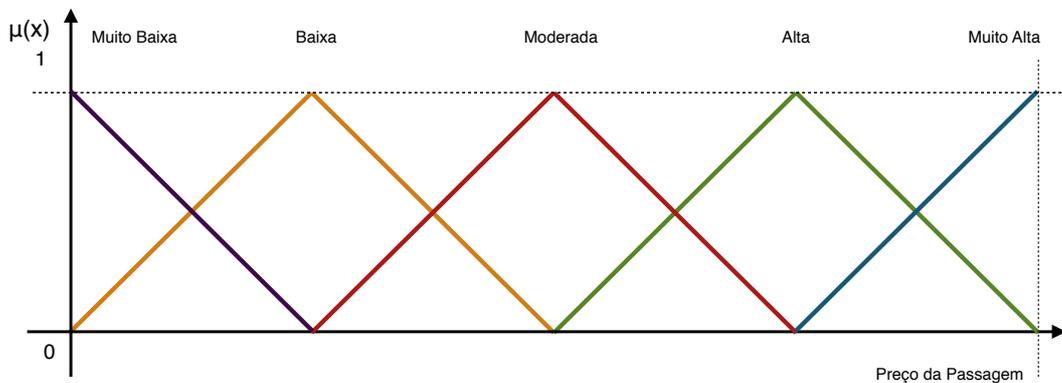


Gráfico 21: Criticidade de Custos de Passagens de Conexões Perdidas em Números Fuzzy.

Fonte: Elaboração Própria

Muito Baixa:

$$\text{Se } 0 < \mu(x) < 0,25 \text{ então } \mu(x) = -4x + 1$$

Baixa:

$$\text{Se } 0 \leq \mu(x) \leq 0,25 \text{ então } \mu(x) = 4x \quad \text{else}$$

$$\text{Se } 0,25 \leq \mu(x) \leq 0,5 \text{ então } \mu(x) = -4x + 2$$

Moderada:

$$\text{Se } 0,25 \leq \mu(x) \leq 0,5 \text{ então } \mu(x) = 4x - 1 \quad \text{else}$$

$$\text{Se } 0,5 \leq \mu(x) \leq 0,75 \text{ então } \mu(x) = -4x + 3$$

Alta:

$$\text{Se } 0,5 \leq \mu(x) \leq 0,75 \text{ então } \mu(x) = 4x - 2 \quad \text{else}$$

$$\text{Se } 0,75 \leq \mu(x) \leq 1,00 \text{ então } \mu(x) = -4x + 4$$

Muito Alta:

$$\text{Se } 0,75 \leq \mu(x) \leq 1,00 \quad \text{então } \mu(x) = 4x + 3$$

<i>Muito Alta</i>	[0,75	1	1	1]
<i>Alta</i>		0,5	0,75	0,75	1	
<i>Moderada</i>		0,25	0,5	0,5	0,75	
<i>Baixa</i>		0	0,25	0,25	0,5	
<i>Muito Baixa</i>		0	0	0	0,25	

Da mesma maneira a oferta de vôos pode ser traduzida por conjuntos e termos linguísticos conforme apresentados abaixo:

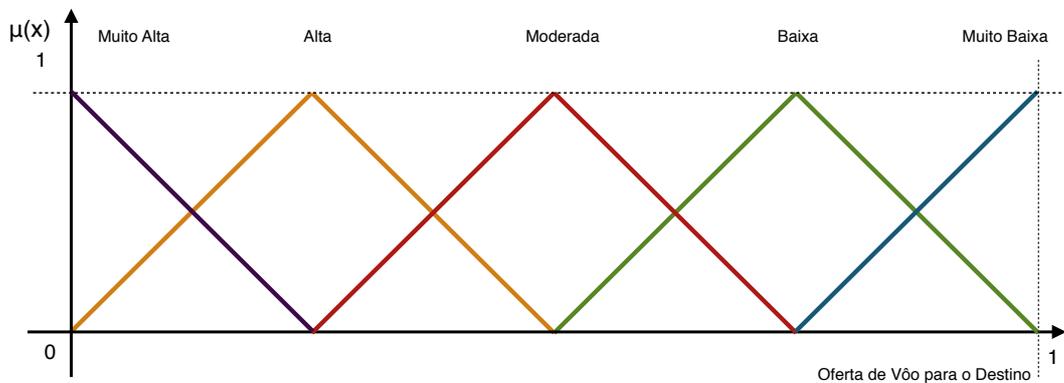


Gráfico 22: Níveis de Ofertas de Vôos em Números Fuzzy.
Fonte: Elaboração Própria

Muito Alta:

$$\text{Se } 0 < \mu(x) < 0,25 \quad \text{então } \mu(x) = -4x + 1$$

Alta:

$$\text{Se } 0 \leq \mu(x) \leq 0,25 \quad \text{então } \mu(x) = 4x \quad \text{else}$$

$$\text{Se } 0,25 \leq \mu(x) \leq 0,5 \quad \text{então } \mu(x) = -4x + 2$$

Moderada:

$$\text{Se } 0,25 \leq \mu(x) \leq 0,5 \quad \text{então } \mu(x) = 4x - 1 \quad \text{else}$$

$$\text{Se } 0,5 \leq \mu(x) \leq 0,75 \quad \text{então } \mu(x) = -4x + 3$$

Baixa:

$$\text{Se } 0,5 \leq \mu(x) \leq 0,75 \quad \text{então } \mu(x) = 4x - 2 \quad \text{else}$$

$$\text{Se } 0,75 \leq \mu(x) \leq 1,00 \quad \text{então } \mu(x) = -4x + 4$$

Muito Baixa:

$$\text{Se } 0,75 \leq \mu(x) \leq 1,00 \quad \text{então } \mu(x) = 4x + 3$$

<i>Muito Baixa</i>	0,75	1	1	1
<i>Baixa</i>	0,5	0,75	0,75	1
<i>Moderada</i>	0,25	0,5	0,5	0,75
<i>Alta</i>	0	0,25	0,25	0,5
<i>Muito Alta</i>	0	0	0	0,25

A.6 AVALIAÇÃO DO RISCO À OPERADORA

Como o tratamento final objetivado é o nível de risco à operadora, a escala linguística associa a Oferta “Muito Baixa” aos maiores valores.

A soma dos valores linguísticos dos dois conjuntos dividido pela soma dos valores máximos dos conjuntos representa um nível de risco à operadora, conforme apresentado abaixo. Esta computação é simples e pode ser atrelada a uma base de dados disponível e atualizável.

$$\text{Norm de Risco à Operadora} = \frac{\mu_{\text{Valor Passagem}}(x) + \mu_{\text{Oferta Vão}}(x)}{\text{MAX } \mu_{\text{Valor Passagem}}(x) + \text{MAX } \mu_{\text{Oferta Vão}}(x)}$$

Caso ocorra um atraso superior ao menor intervalo de conexão, pode-se contabilizar os impactos deste atraso através das somas de penalidades sofridas pela operação em relação aos passageiros afetados.

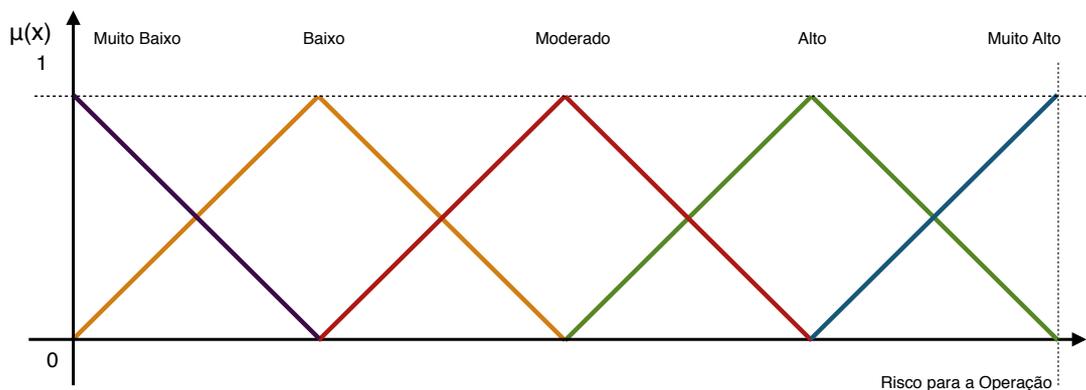


Gráfico 23: Nível de Risco à Operadora em Números Fuzzy.
Fonte: Elaboração Própria

<i>Muito Alto</i>	0,75	1	1	1
<i>Alto</i>	0,5	0,75	0,75	1
<i>Moderado</i>	0,25	0,5	0,5	0,75
<i>Baixo</i>	0	0,25	0,25	0,5
<i>Muito Baixo</i>	0	0	0	0,25

Passageiro	Conexão	Tempo para Conexão	Destino	Oferta	Risco
#1	sim	45 min	São Paulo	Alta	Baixo
#2	sim	60 min	Roma	Baixa	Alto
#3	não	não aplicável	não aplicável	não aplicável	não aplicável
...
#n	não	não aplicável	não aplicável	não aplicável	não aplicável

Quadro 12: Exemplo de Categorização Riscos na Lista de Passageiros
Fonte: Elaboração Própria

A.7 INPUTS DA ESTRATÉGIA

Considerando os processos de otimização, orientados para um resultado final de um conjunto de fatores, a estratégia vem pontuar, dos fatores de saída, quais os mais desejados para o atendimento de um ou mais objetivos estratégicos.

Assim, optou-se por desenvolver um seletor de criticidades que através do Modelo COPPE COSENZA realizará o casamento da estratégia ao conjunto de decisões de nível táticos adotados no processo de otimização de trajetória para atingir o objetivo estratégico.

A priori, o cumprimento da operação no ETA – Estimated Time to Arrive (tempo estimado de chegada) será sempre uma opção ótima por trabalhar com um

conjunto de estruturas de apoio, staff e expectativas de clientes com o cumprimento de uma operação previamente programada.

A questão de otimização envolve a interferência agentes e fenômenos externos à aeronave, a saber: controle de tráfego aéreo orientando operações e procedimentos, a incidência de eventos climáticos durante o voo e regiões que afetam a malha aérea, sistemas de destino em disruptura e etc.

Assim, a questão estratégica passa a exercer papel fundamental na orientação de tomada de decisão, dialogando com diferentes lógicas, por vezes convergentes e, em certos casos divergentes.

A.8 OBJETIVOS DE DESEMPENHO

Os objetivos de desempenho são definidos na administração da produção como um conjunto de objetivos que traduzem ganhos competitivos em operações.

O que está em análise é o serviço de transporte de passageiros/carga onde o próprio passageiro/carga é processado na operação, com o deslocamento programado de uma localidade à outra localidade.

Os objetivos estratégicos de desempenho então estão elencados em Custos, com a orientação estrita aos aspectos financeiros diretos; Ambientais, com orientação por mínimas emissões; e por fim, Tempo, com aspectos ligados a confiabilidade do serviço de transporte em honrar tempos programados inicialmente.

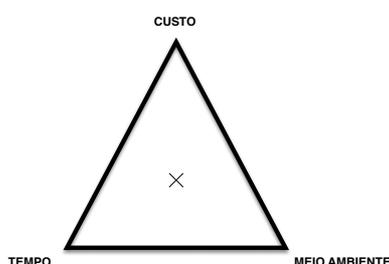


Figura 21: Trade-off de Estratégias
Fonte: Elaboração Própria

Objetivos Estratégicos

Orientação para Mínimos Custos Operacionais – A empresa realiza ações que visam atingir níveis mínimos de custos operacionais. Para tal, a empresa pode deixar de cumprir horários ou gastar mais combustível para atingir o equilíbrio financeiro, resultando em emissões e perda de imagem frente ao aspecto financeiro direto.

Orientação para Mínima Emissão – A empresa realiza ações que visam atingir níveis mínimas emissões. Para tal, a empresa pode deixar de cumprir horários e assume que não pode realizar emissões superiores a 30% do esperado em um voo em condições normais para recuperação de atrasos.

Orientação para Tempo – A empresa tem compromisso estratégico em realizar as operações dentro da agenda programada, ofertando melhor confiabilidade ao passageiro em sua viagem. Para tal, a empresa pode assumir queima excessiva de combustível buscando recuperar eventuais atrasos.

A opção por uma ou mais estratégias será inferente no processo de cálculo com a realização de restrições no processo de otimização orientado para um ou mais objetivos.

Em determinados casos da simulação é possível que a operação cumpra todos os objetivos de maneira simultânea. De maneira geral, na tomada de decisão, em um dado momento a realização de trade-off será determinante e neste momento o compromisso da estratégia será requerido.

A.9 ENTRADAS INFERENTES AO LONGO DO VÔO

Uma vez iniciada uma operação, o piloto conduzirá a aeronave utilizando um conjunto de informações e dados pre estabelecidos e que foram componentes da elaboração do plano de voo.

Estes dados são marcadores virtuais horizontais e verticais que a aeronave deverá realizar ao longo de sua trajetória considerando condições estáveis ao longo de todo o percurso.

A partir da decolagem, e até mesmo antes da decolagem, eventos rotineiramente interferem neste planejamento, seja por uma espera mais longa em uma cabeceira de pista, um passageiro atrasado que afetou o tempo de partida e outras ocorrências comuns.

Interferência do Controle de Tráfego Aéreo (ATC)

Ao longo do voo, o controle de tráfego aéreo pode solicitar alterações da trajetória visando melhorar condições de segurança e administração do espaço aéreo. No Brasil, a Força Aérea Brasileira é a responsável pela gestão das operações no espaço aéreo e preza por aspectos que consideram, em primeiro lugar, a segurança dos voos.

Interferências Ambientais

A condição de ventos também pode sofrer alterações e um voo permanecer maior ou menor tempo em ventos de cauda (tail winds) e em ventos frontais (head winds). Mesmo com dispositivos de atualização das condições climáticas sendo transmitidas por aeronaves que recentemente atravessaram uma zona de trajetória similar, estas condições climáticas são adversas e podem alterar, desatualizando programações iniciais. Neste contexto, os ventos representam uma incerteza presente com grande influência no desempenho das aeronaves.

Para tratar da incerteza dos ventos pode-se associar a informação de direção e intensidade dos ventos para níveis de incerteza de acordo com a lacuna de tempo em que a informação foi atualizada e outras informações climáticas, que neste caso podem ser gatilhos para uma associação de grande incerteza associada à avaliação.

$$V_w + \varepsilon V_w$$

A intensidade dos ventos e sua direção influenciam diretamente na performance da aeronave e são representados pelo vento resultante no perfil aerodinâmico da aeronave. Observa-se que esta influência é contabilizada nas equações diferenciais que definem a trajetória ótima como apresentadas abaixo:

$$\dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{Z} \\ \dot{x} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T-D}{m} - g \cdot \sin \gamma \\ V_a \cdot \sin \gamma \\ V_a \cos \gamma + V_w \\ -Q\rho_f \end{bmatrix}$$

O deslocamento da aeronave em relação ao solo tem em sua componente $V_a \cos \gamma + V_w$.

Propoe-se a incorporação do valor nebuloso dual descrito por $V_w + \varepsilon V_w$ e $m + \varepsilon m_i$ como forma de dialogar em uma operação de otimização com os níveis de incerteza reais das etapas posteriores.

$$\dot{\underline{X}} = \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{Z} \\ \dot{x} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T-D}{m+\varepsilon m_i} - g \cdot \sin \gamma \\ V_a \cdot \sin \gamma \\ V_a \cos \gamma + (V_w + \varepsilon V_w) \\ -Q\rho_f \end{bmatrix}$$

A.10 AVALIAÇÃO DE DESTINOS

A proposta tem objetivo de realizar uma avaliação quanto ao tráfego aéreo em regiões destino para a tomada de decisão de otimização. O processo baseia-se em informações de horário de pico de tráfego aéreo em regiões com objetivo de balancear a decisão de otimização visando atender a estratégica.

A lógica é simples e baseada na informação de tráfego na região e frequência de procedimentos perdidos, caracterizado em 5 níveis. De acordo com o nível de tráfego e a frequência de procedimentos perdidos, o risco de atraso na fase de decida é mensurado, podendo ser necessário realizar voltas em regiões próximas ao aeroporto, e neste caso além da penalidade do atraso o consumo excessivo de combustível pode representar custos incrementados. Neste caso, avaliando que o destino e hora representam um risco para a otimização o sistema de otimização pode antecipar ou atrasar o tempo de chegada, mediante informações de controle de tráfego aéreo e do destino.

Embora na prática isso já aconteça, o processo de otimização considerando o evento imprevisto não é calculado. Observa-se que em determinados casos a interferência externa, seja por atraso na partida da operação, por regulação ou por interferências climáticas, podem tornar a quantidade de atraso no tempo de um voo

irrecuperável pela ferramenta de otimização com escolha de melhor Cost Index. Neste caso o sistema passa a trabalhar por uma minimização de custos associados e penalidades que aumentam com a condição de atraso.

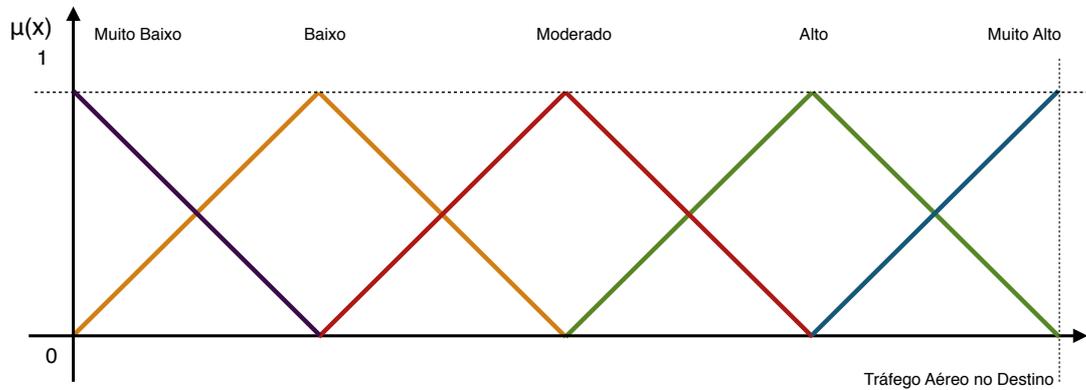


Gráfico 24: Níveis de criticidade em Destinos em termos de tráfego aéreo em Números Fuzzy.

Fonte: Elaboração Própria

<i>Muito Alto</i>	$\begin{bmatrix} 0,75 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5 & 0,75 & 0,75 & 1 \\ 0,25 & 0,5 & 0,5 & 0,75 \\ 0 & 0,25 & 0,25 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0,25 \end{bmatrix}$
<i>Alto</i>	
<i>Moderado</i>	
<i>Baixo</i>	
<i>Muito Baixo</i>	

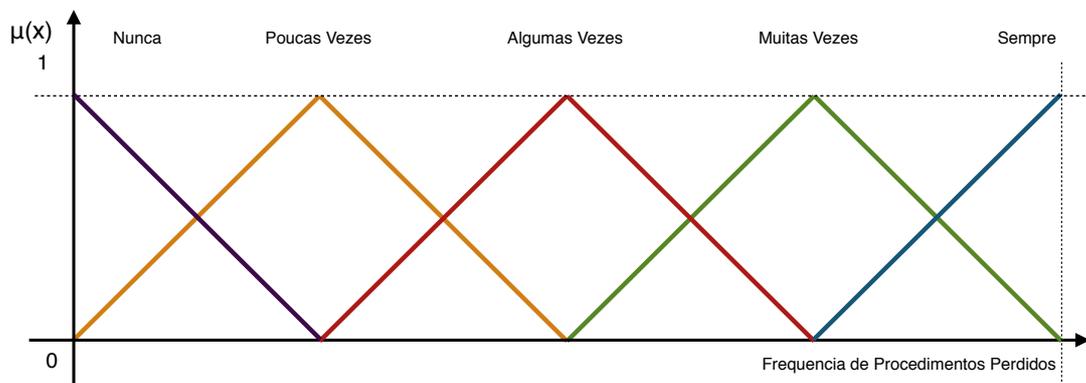


Gráfico 25: Frequência de solicitação de mudança em procedimentos em Números Fuzzy.

Fonte: Elaboração Própria

<i>Sempre</i>	$\begin{bmatrix} 0,75 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5 & 0,75 & 0,75 & 1 \\ 0,25 & 0,5 & 0,5 & 0,75 \\ 0 & 0,25 & 0,25 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0,25 \end{bmatrix}$
<i>Muitas Vezes</i>	
<i>Algumas Vezes</i>	
<i>Poucas vezes</i>	
<i>Nunca</i>	

$$\text{Norm de Risco} = \frac{\mu_{\text{Tráfego no Destino}}(x) + \mu_{\text{Procedimentos perdidos}}(x)}{\text{MAX } \mu_{\text{Tráfego no Destino}}(x) + \text{MAX } \mu_{\text{Procedimentos perdidos}}(x)}$$

Exemplo:

- Se $\mu_{\text{Tráfego no Destino}}(x) = \text{Alto}$
- E $\mu_{\text{Procedimentos perdidos}}(x) = \text{Algumas Vezes}$
- E Estratégia = Tempo, logo

$$\begin{array}{l} \text{Alto} \\ \text{Algumas Vezes} \end{array} \begin{bmatrix} 0,5 & 0,75 & 0,75 & 1 \\ 0,25 & 0,5 & 0,5 & 0,75 \end{bmatrix} \left/ \begin{array}{l} \text{Muito Alto} \\ \text{Sempre} \end{array} \begin{bmatrix} 0,75 & 1 & 1 & 1 \\ 0,75 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right.$$

$$= [0,5 \quad 0,625 \quad 0,625 \quad 1], \text{ com centróide } 0,6875$$

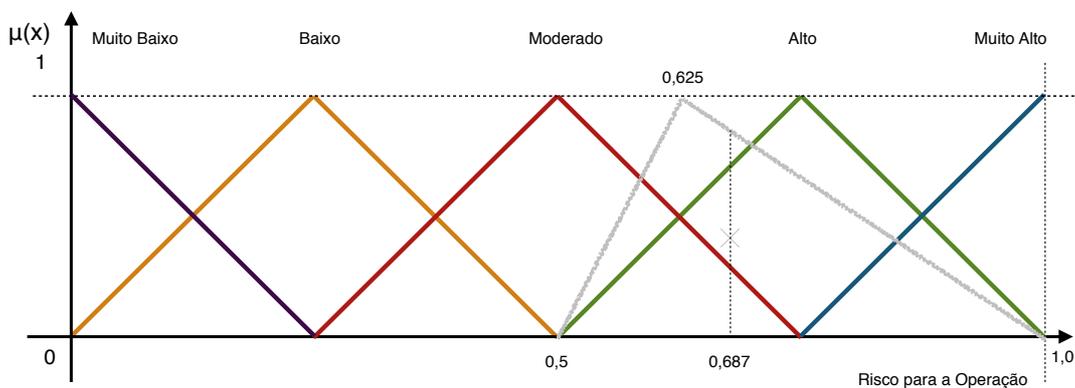


Gráfico 26: Exemplo de Resultante da Avaliação do Destino para criação de buffer de Tempo de Chegada.
Fonte: Elaboração Própria

Utiliza-se o índice obtido na defuzzificação por Centróide nas equações para obtenção das pertinências aos conjuntos típicos de Moderado e Alto e correlaciona com a tabela de ações por Perfil Estratégico abaixo:

Risco	Mínimo Custo	Mínima Emissão	Tempo
Muito Baixo	Antecipa 0 minutos	Antecipa 0 minutos	Antecipa 0 minutos
Baixo	Antecipa 0 minutos	Antecipa 0 minutos	Antecipa 1 minutos
Moderado	Antecipa 1 minutos	Antecipa 0 minutos	Antecipa 3 minutos
Alto	Antecipa 3 minutos	Antecipa 1 minutos	Antecipa 5 minutos
Muito Alto	Antecipa 5 minutos	Antecipa 3 minutos	Antecipa 7 minutos

Quadro 13: Níveis de Tomada de Decisão de acordo com a Estratégia para criação de buffer de Tempo de Chegada.
Fonte: Elaboração Própria.

Perfil do Risco (0,6875)	Equação do Segmento	Pertinência ao Perfil	Tempo
Moderado	$\mu(x) = -4x + 3$	0,25	(0,25) * 3 Minutos
Alto	$\mu(x) = 4x - 2$	0,75	(0,75) * 5 Minutos
Resultado	-----	1,0	4,5 minutos

Quadro 14: Exemplo de Processamento dos Números Fuzzy
Fonte: Elaboração Própria

Como conclusão da avaliação, o vôo no exemplo executará a otimização de perfil de trajetória prevendo que “Algumas Vezes” o procedimento de decida é perdido e que a condição de tráfego no destino é considerado “Alto” no horário programado para a decida. Conseqüentemente, o plano considerará 4 minutos e meio de antecipação visando completar a missão com o objetivo “TEMPO” plenamente atendido.