

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

DIEGO DUTRA MOREIRA

**DISPONIBILIDADE DE FROTAS DE TRANSPORTE AÉREO
OFFSHORE POR HELICÓPTEROS**

**Rio de Janeiro
2015**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

DIEGO DUTRA MOREIRA

**DISPONIBILIDADE DE FROTAS DE TRANSPORTE AÉREO
OFFSHORE POR HELICÓPTEROS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Cel. Paulo Afonso Lopes da Silva – Ph.D.

Rio de Janeiro

2015

c2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

629.133352 Moreira, Diego Dutra

C346m Disponibilidade de frotas de transporte aéreo offshore por helicópteros / Diego Dutra Moreira, orientado por Paulo Afonso Lopes da Silva – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

104p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

1. Curso de Engenharia de Transportes – teses e dissertações. 2. Helicópteros. 3. Óleo e gás - transporte. I. Silva, Paulo Afonso Lopes da. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

DIEGO DUTRA MOREIRA

**DISPONIBILIDADE DE FROTAS DE TRANSPORTE AÉREO
OFFSHORE POR HELICÓPTEROS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Cel. Paulo Afonso Lopes da Silva, Ph.D.

Aprovada em 21 de maio de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Cel. Paulo Afonso Lopes da Silva – Ph.D. do IME - Presidente

Prof. Erivelton Pires Guedes – D.Sc. do IPEA

Prof. Respício Antônio do Espírito Santo Junior – D.Sc. da UFRJ

Rio de Janeiro

2015

Dedico este trabalho aos meus pais, José Carlos e Rosângela, aos meus irmãos, Breno e Pablo e à minha esposa, Taciana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Militar de Engenharia e a todo corpo docente e administrativo por prover um ensino de qualidade e permitir a realização de um sonho. Agradeço, em especial, ao Prof. Cel. Paulo Afonso Lopes da Silva pelas orientações deste e outros trabalhos realizados ao longo do curso. Agradeço ainda ao Sr. Carlos Carmo e ao Prof. Augusto Virgílio Mascarenhas da Fonseca pela ajuda e a imprescindível recomendação para iniciar o curso. Por último, mas não menos importantes, agradeço aos Srs. Ultimo Mariz, Cláudio Araújo, Flávia Serpa e José João e pelas liberações que se fizeram necessárias para a consecução deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	11
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Justificativa	15
1.2. Objetivos	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. Exploração e produção de óleo e gás offshore.....	18
2.2. Helicópteros	20
2.3. Transporte aéreo por helicópteros <i>offshore</i>	23
2.4. Manutenção, confiabilidade e disponibilidade.....	26
2.4.1. Manutenção.....	27
2.4.2. Confiabilidade.....	28
2.4.3. Disponibilidade	30
2.4.4. Aviação civil	33
2.4.5. Aviação militar.....	38
2.5. Análise multivariada de dados	44
2.5.1. Análise fatorial.....	47
2.5.2. Regressão múltipla.....	52
3. METODOLOGIA	59
3.1. Identificação e seleção de indicadores de disponibilidade.....	60
3.2. Levantamento de dados e cálculo da disponibilidade	60
3.3. Análise da disponibilidade	62
3.3.1. Análise estatística.....	62
3.3.2. Análise das causas de indisponibilidade	64
3.4. Proposição de soluções para aumento da disponibilidade	65
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65

4.1.	Levantamento de dados e cálculo da disponibilidade	65
4.2.	Análise da disponibilidade	78
4.2.1.	Análise estatística - regressão múltipla	78
4.2.2.	Análise das causas de indisponibilidade	91
4.3.	Proposição de soluções para aumento da disponibilidade	94
5.	CONCLUSÕES	96
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Poços de produção de óleo em Summerland, California, EUA, 1906.....	18
FIG. 2.2.	Maiores componentes de um helicóptero.	21
FIG. 2.3	Aeronaves “Tilt-rotor”. Híbrido entre avião e helicóptero.....	22
FIG. 2.4	Modelos de helicópteros mais utilizados para transporte de passageiros.....	25
FIG. 2.5	Estados de um item.....	26
FIG. 2.6	Diagrama dos Tempos do estado de um item.....	26
FIG. 2.7	Mudança de paradigma na manutenção.....	28
FIG. 2.8	Ocorrências <i>Aircraft availability</i> , <i>Aircraft reliability</i> e <i>Helicopter Availability</i>	33
FIG. 2.9	Taxa de Atraso Mecânico na Japan Airlines na década de 1960.....	36
FIG. 2.10	Índice de padronização da frota (IPF) versus Resultados Financeiros.....	37
FIG. 2.11	Modelos mais utilizados Exército, Marinha e Força Aérea norte-americanos	42
FIG. 2.12	Manutenção de Helicópteros e Aviões da Força Aérea.....	43
FIG. 2.13	Taxa média de “Mission Capable” e “Fully Mission Capable”.	43
FIG. 2.14	Seleção de uma técnica multivariada.....	46
FIG. 2.15	Estágios 1-6 do diagrama de decisão da regressão múltipla.....	58
FIG. 4.1	<i>Boxplot</i> das observações da frota total.	
FIG. 4.2	<i>Boxplot</i> das observações da frota do modelo 13.....	66
FIG. 4.3	Disponibilidade geral da frota no tempo.	67
FIG. 4.4	Distribuição de frequências da disponibilidade diária da frota.	67
FIG. 4.5	Número de dias x aeronaves em operação por empresa.....	70
FIG. 4.6	Número de dias x aeronaves em operação por modelo.	70
FIG. 4.7	Número de dias x aeronaves em operação por base de apoio.....	71
FIG. 4.8	Disponibilidade diária da frota da Empresa 2.....	71
FIG. 4.9	Disponibilidade diária da frota da Empresa 3.....	72
FIG. 4.10	Disponibilidade diária da frota da Empresa 4.....	72
FIG. 4.11	Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 3.....	73
FIG. 4.12	Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 11.....	73
FIG. 4.13	Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 12.....	73
FIG. 4.14	Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 13.....	74
FIG. 4.15	Disponibilidade diária da frota da frota da Base 6.	75
FIG. 4.16	Disponibilidade diária da frota da frota da Base 8.	75

FIG. 4.17 Disponibilidade diária da frota da frota da Base 9.	75
FIG. 4.18 Disponibilidade da frota selecionada.....	76
FIG. 4.19 Frequências da disponibilidade diária da frota selecionada.	77
FIG. 4.20 Transformações da variável dependente Disponibilidade.	79
FIG. 4.21 Diagrama de dispersão para as variáveis estudadas.	80
FIG. 4.22 Gráfico de resíduos padronizados.....	81
FIG. 4.23 Histograma dos termos de erro.	82
FIG. 4.24 Gráficos de regressão parcial.....	85
FIG. 4.25 Análise dos resíduos padronizados.....	85
FIG. 4.26 Gráfico de probabilidade normal.	86
FIG. 4.27 Importância do Preditor para o modelo.	89
FIG. 4.28 <i>Mean Time Between Failures</i> (MTBF) e <i>Mean Time to Repair</i> (MTTR).....	93

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 Orientações para identificação de cargas fatoriais significantes.....	50
TAB. 2.2 R ² mínimo para ser estatisticamente significativa.....	54
TAB. 3.1 Etapas da Metodologia.....	59
TAB. 3.2 Estrutura dos dados a serem analisados.	61
TAB. 4.1 Quadro Geral da Disponibilidade Média (Empresa x Modelo).....	66
TAB. 4.2 Testes de Normalidade.	68
TAB. 4.3 Estatísticas descritivas da métrica de Disponibilidade da frota.	69
TAB. 4.4 Representatividade de cada modelo e empresa na amostra.....	70
TAB. 4.5 Testes de normalidade.	77
TAB. 4.6 Assimetria e Curtose das observações.	77
TAB. 4.7 Assimetria e Curtose das distribuições transformadas.	79
TAB. 4.8 Resumo do modelo.....	82
TAB. 4.9 Resultado do modelo de regressão após o passo final da técnica <i>Stepwise</i>	83
TAB. 4.10 Matriz de correlações das variáveis independentes.....	87
TAB. 4.11 Resumo dos modelos.....	90
TAB. 4.12 Variáveis inseridas no modelo de regressão <i>stepwise</i>	90
TAB. 4.13 Cálculo do índice de padronização da célula (IPC)	92

LISTA DE SIGLAS

AAM	Aircraft Availability Model (Modelo de Disponibilidade de Aeronaves)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALARP	As Low as Reasonably Practicable (Tão baixo quanto razoavelmente praticável)
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CBM	Condition Based Maintenance (Manutenção Baseada em Condição)
CVR	Cockpit Voice Recorder (Gravador de voz da cabine)
U.S. DoD	U. S. Department of Defense (Departamento de Defesa dos Estados Unidos)
EASA	European Aviation Safety Agency (Agência Europeia de Aviação Civil)
FAA	Federal Aviation Agency (Agência Federal de Aviação)
FMC	Fully Mission Capable (Totalmente Capaz para Missão)
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (Modo de Falha, Efeitos e Análise Crítica)
FTA	Fault Tree Analysis (Análise da Árvore de Falhas)
HMU	Helicopter Maintenance Unit (Unidade de manutenção do helicóptero)
HUMS	Health and Usage Monitoring System (Sistema de Monitoramento da Saúde e Utilização)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Organização Internacional de Aviação Civil)
IPF	Índice de Padronização de Frotas
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
IVHM	Integrated Vehicle Health Management (Gerenciamento Integrado da Saúde do Veículo)
MAAF	Mobility Aircraft Availability Forecasting (Previsão da Disponibilidade de Mobilidade de Aeronaves)
MCR	Mission Capable Rate (Taxa de Capacidade para Missão)
MOTBF	Mean Operating Time between Failures (Tempo médio de operação entre falhas)
MTBF	Mean Time between Failures (Tempo Médio entre Falhas)
MTTF	Mean Time to Failure (Tempo Médio para a Falha)
MTTM	Mean Time to Maintain (Tempo Médio de Manutenção)
MTTR	Mean Time to Repair (Tempo Médio de Reparo)
NMC	Not Mission Capable (Não Capaz para Missão)
PHM	Prognostics Health Monitoring (Monitoramento Prognóstico de Saúde)
PMC	Partially Mission Capable (Parcialmente Capaz para Missão)
PMD	Peso Máximo de Decolagem
UEP	Unidade Estacionária de Produção
VIF	Variance Inflation Factor (Fator de Inflação de Variância)

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a proposição de soluções para o aumento da disponibilidade de frotas de transporte aéreo *offshore* de asa rotativa (helicópteros) na indústria de óleo e gás. Foi realizada uma revisão de literatura acerca da história da exploração e produção de óleo e gás *offshore* e da aviação de asa rotativa, sobre o uso de helicópteros para transporte de e para plataformas de petróleo, além da manutenção, confiabilidade e disponibilidade das frotas de helicópteros civil e militar bem como de técnicas de estatística multivariada. A metodologia proposta para a consecução do objetivo foi calcada principalmente na análise estatística dos dados levantados de disponibilidade e os principais fatores que influenciam esta variável. A técnica multivariada escolhida foi a Análise de Regressão Múltipla, com o objetivo de se verificar a importância relativa de fatores como idade da frota, temperatura, umidade, modelo da aeronave, operador da aeronave entre outros na variabilidade do índice de Disponibilidade da frota. Os resultados mostraram que uma maior concentração da frota em modelos com alta disponibilidade é um fator mais preponderante do que a própria escolha das empresas de transporte aéreo, mantidas as outras condições inalteradas. A análise das causas de indisponibilidade da empresa estudada mostrou que um maior investimento em manutenção preditiva e redução de atrasos administrativos poderiam elevar a disponibilidade e reduzir custos significativos.

ABSTRACT

This work has as objective to propose solutions to increase the availability of rotary wing (helicopter) fleets for offshore transportation in the oil and gas industry. A literature review about the history of oil and gas offshore exploration and production has been carried, together with a brief history of the rotary wing aviation industry, the use of helicopters in the transportation of people to and from oil platforms, in addition to maintenance, reliability and availability of fleets of civil and military helicopters and multivariate statistical techniques. The proposed methodology for achieving the objective was based mainly in an statistical analysis of the data and the main factors that influence the availability of the fleet. The chosen multivariate technique was Multiple Regression Analysis, in order to assess the relative importance of factors such as fleet age, temperature, umidity, aircraft model, aircraft operator and others in explaining the variability in the fleet availability index. The results showed that a higher concentration of the fleet with few and high available models would be a more important factor than the actual choice of the helicopter operator, keeping the other conditions unchanged. The analysis of the causes of unavailability in the studied company showed that a higher investment on predictive maintenance and reduction of administrative delays could increase the availability and reduce significant costs.

1. INTRODUÇÃO

A depleção das fontes convencionais de petróleo e a redução das áreas ainda não exploradas em terra (*onshore*) levou empreendedores e companhias de petróleo ainda no final do século XIX a buscarem alternativas para elevarem a produção, entre elas a exploração e produção no mar (*offshore*). Segundo a Sociedade Americana Histórica de Óleo e Gás (AOGHS, 2015), os primeiros poços no mar foram perfurados entre 1891 e 1897 com a ajuda de píeres de madeira, nos estados americanos da Califórnia e Ohio. Com o sucesso da exploração e produção nesse novo ambiente, diversas companhias e empreendedores avançaram na construção de píeres ao longo da costa oeste e lagos no território norte-americano, culminando mais tarde com a evolução e o desenho e construção de plataformas de petróleo fixas sem a necessidade de conexão por píeres. Seriam a precursoras das atuais Unidades Estacionárias de Produção (UEP) no mar.

Ao longo do século passado, com o aumento da demanda e a redução da oferta de energia, as empresas buscaram ainda novas fontes para a obtenção de óleo e gás, como a exploração de águas profundas (*deepwater*), xisto betuminoso (*shale oil*), gás de xisto (*shale gas*), biocombustíveis entre outros. A exploração e produção em águas profundas e ultra profundas representou um marco importante e levou a um aumento substancial das reservas e capacidade de produção de países como Estados Unidos, Noruega, Reino Unido, Nigéria e Brasil. No entanto, ao mesmo tempo que trouxe solução para aumentar a oferta de energia, a exploração *offshore* trouxe novos desafios tecnológicos tanto para as atividades diretamente ligadas à exploração e produção quando para a cadeia de suprimentos envolvida nessas atividades.

A exploração de campos cada vez mais distantes do continente levou a mudanças substanciais nas formas de transporte dos suprimentos e pessoas às plataformas de petróleo. As embarcações utilizadas aumentaram gradativamente de tamanho para tornarem o transporte de materiais e equipamentos mais eficiente e econômico. O transporte de pessoas foi gradualmente substituído do modal marítimo para o aéreo, em função da redução do tempo de viagem e segurança no transbordo dos passageiros. Neste contexto, surgia a indústria de aviação especializada no transporte de pessoas de e para as plataformas de petróleo.

Registros das empresas pioneiras¹ do setor indicam que o nascimento desta indústria seja datado na década de 1940, quando nascia a necessidade de se transportar trabalhadores pelo modal aéreo para as plataformas em alto-mar com mais eficiência em campos petrolíferos no Mar do Norte.

Esta indústria se desenvolveu substancialmente ao longo dos últimos 70 anos e hoje estima-se² que existam mais de 1.900 helicópteros no mundo sendo utilizados para diversos fins relacionados à exploração e produção de óleo e gás *offshore*.

O mercado de serviços de transporte aéreo para apoio às plataformas de petróleo e gás, assim como a indústria de aviação em geral, enfrenta diversos desafios relacionados ao gerenciamento da frota de aeronaves. Com um modelo de negócio baseado em um equipamento sensível, de elevado custo e altamente complexo, as empresas de aviação enfrentam diversos problemas para manter a operação eficiente e rentável e o nível de segurança elevado. Esse segmento encontra desafios como alta volatilidade dos custos de combustíveis, choques de oferta de mão-de-obra especializada, dificuldade de previsão de demanda, capital intensivo para aquisição dos equipamentos e fortes barreiras de entrada econômicas e político-regulatórias em diversos países. Desse modo, gerenciar compras, estoques, manutenção das aeronaves e seleção e treinamento dos colaboradores com o objetivo de manter a frota com uma disponibilidade e confiabilidade ótimas aparecem como um problema substancial a ser solucionado.

1.1. JUSTIFICATIVA

A segurança, juntamente com a rentabilidade das operações, é o fator primordial que guia as empresas do setor de transporte aéreo. Altamente dependente da confiabilidade dos veículos (aviões ou helicópteros) e dos tripulantes, a indústria do transporte aéreo, em escala superior à de transporte terrestre e marítimo, tem investido largas quantias no desenvolvimento de equipamentos e processos que permitam reduzir os riscos de acidentes a níveis tão baixos quanto razoavelmente praticáveis. Este conceito, traduzido do inglês “*As Low as Reasonably Practicable*” (ALARP), tem origens na legislação inglesa³ e define diretivas para definição do menor risco residual possível e razoável em sistemas críticos em segurança, como a aviação.

¹ PHI, CHC, Bristow - <<http://www.chc.ca/AboutCHC/History/Pages/default.aspx>>, <http://www.phihelico.com/phi-general-info/information/our-history>>, <<http://bristowgroup.com/about-bristow/>>

² ODS-Petrodata, Market Segment Analysis - Offshore Helicopter Services, Outubro, 2013.

³ Health and Safety at Work Act etc., 1974. - <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarplance.htm>

Investimentos em sistemas de redundância, tecnologias de ponta, materiais compostos leves e super-resistentes, treinamentos e manutenção fazem parte, de uma maneira geral, das ferramentas utilizadas para atingir níveis de excelência em segurança.

Embora a segurança na indústria da aviação tenha evoluído consideravelmente nas últimas décadas, atingindo reduções na taxa de acidentes com fatalidades da ordem de 85% entre 1993 e 2012 segundo a Agência Europeia de Aviação Civil (EASA, 2012), as empresas ainda se debatem para atingir níveis de eficiência financeira e rentabilidade adequados. Fato que pode ser verificado pelo significativo número de falências e pedidos de recuperação judicial apresentado pelo setor ao longo das últimas décadas, com nomes expressivos como as americanas American Airlines, US Airways, Delta, United Airlines (CNN Money, 2013).

O transporte aéreo por helicóptero, incluídos geralmente na categoria de aviação geral ou táxi aéreo, embora também tenha evoluído significativamente em termos de segurança nas últimas décadas, ainda se encontra aquém dos níveis atingidos pela aviação regular (linhas aéreas). A frequência de acidentes do segmento de transporte de helicópteros *offshore* no Reino Unido é cerca de 13,8 fatalidades por bilhão de passageiros por quilômetro, enquanto a o segmento de aviação regular com aviões é de apenas 0,003. Estudos indicam ainda que o histórico de segurança de viagens por helicóptero sobre o mar é menos favorável que o de viagens de trem ou carro no Reino Unido (OIL & GAS UK, 2011).

Dadas as estatísticas, percebe-se que o transporte aéreo por helicóptero representa um complexo sistema sócio técnico, em que um número significativo de fatores pode afetar o risco relacionado a esta atividade (HOKSTAD et al., 2001). Dois destes fatores são a manutenção dos helicópteros e a oferta de pessoal em condições adequadas à atividade. Estes fatores influenciam diretamente a disponibilidade e confiabilidade desse sistema de transporte como um todo.

As aeronaves utilizadas no transporte aéreo *offshore* são equipamentos que requerem investimentos vultosos em sua aquisição e manutenção. Dependendo do porte, os valores podem chegar a US\$ 30 milhões por equipamento⁴, cuja capacidade máxima é de 21 passageiros, ou US\$ 1,43 milhão por assento. Em comparação, um avião modelo Boeing 737-700, cuja capacidade é de 132 passageiros, pode ser adquirido do fabricante por cerca de US\$ 76 milhões⁵, o equivalente a US\$ 0,58 milhão por assento, ou cerca de 2,5 vezes menor que o helicóptero do exemplo.

⁴ Helicopter Association International (HAI). Helicopter Annual 2010. 2011.

⁵ Boeing. List Price. <<http://www.boeing.com/boeing/commercial/prices/>>. Acesso em 20/11/2013.

Em função dos altos valores, assim como na aviação regular de asa fixa, o transporte aéreo de helicópteros requer uma gestão eficiente da frota, com a máxima utilização possível dos equipamentos em níveis de segurança controlados. A utilização está diretamente relacionada à disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos. Reduzir o tempo de *downtime*⁶ (indisponibilidade) das aeronaves, mantendo níveis elevados de segurança, aparece como um grande desafio para o segmento.

Com base nos valores de mercado dos helicópteros e em consulta a empresas especializadas no arrendamento (*leasing*) de aeronaves, estima-se que o custo apenas da disponibilidade da aeronave (não incluídos manutenção, tripulação, etc.), oscila entre 0,8% a 1,2% ao mês do valor total do equipamento, o que é definido em função de variáveis como risco de crédito da empresa, modelo da aeronave, país de operação, etc. Deste modo, uma aeronave de médio porte avaliada em US\$ 15 milhões é arrendada para uma empresa de aviação por valores entre US\$ 120.000 e US\$ 180.000 por mês. Assim, em uma estimativa conservadora, considerando apenas o valor do equipamento, um acréscimo de 1% na disponibilidade resultaria em ganhos diretos de até US\$ 1.800 por mês por aeronave. Considerando-se uma frota de 100 aeronaves, os ganhos podem chegar a cerca de US\$ 2,2 milhões por ano para cada aumento de 1% na disponibilidade da frota.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a Disponibilidade da frota de helicópteros utilizados para o transporte de pessoas para unidades marítimas de uma empresa de óleo e gás, identificando os fatores mais importantes relacionados e propondo soluções para o aumento desta métrica.

Como objetivo secundário, realizar uma revisão de literatura sob os temas relacionados à disponibilidade na indústria da aviação, mais especificamente do sistema de transporte aéreo de asa rotativa (helicópteros) utilizado para o transporte de pessoas para plataformas de petróleo em alto-mar, além de técnicas estatística multivariada para a realização das análises necessárias.

O desenvolvimento do trabalho, verificado nos próximos capítulos, está dividido em uma revisão de literatura, descrição da metodologia a ser empregada e análise dos resultados, bem como a proposição de soluções para aumento da disponibilidade e conclusões.

⁶ *Downtime*: termo da língua inglesa comumente utilizado na indústria. Indica o tempo em que a aeronave está indisponível para exercer suas funções requeridas sob condições especificadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS OFFSHORE

Após os primeiros avanços na exploração e produção de óleo e gás *offshore* no final do século XIX no estado americano da Califórnia, por cerca de duas décadas as atividades foram desenvolvidas com o uso de cavaletes (“*trestle*”) ou píeres de madeira. Essas estruturas eram utilizadas nas atividades na costa oeste americana e no mar Cáspio, na antiga União Soviética. Pelas limitações de profundidade e tecnologia, os píeres de madeira alcançavam comprimentos de até 400m, como ilustrado na Figura 2.1.

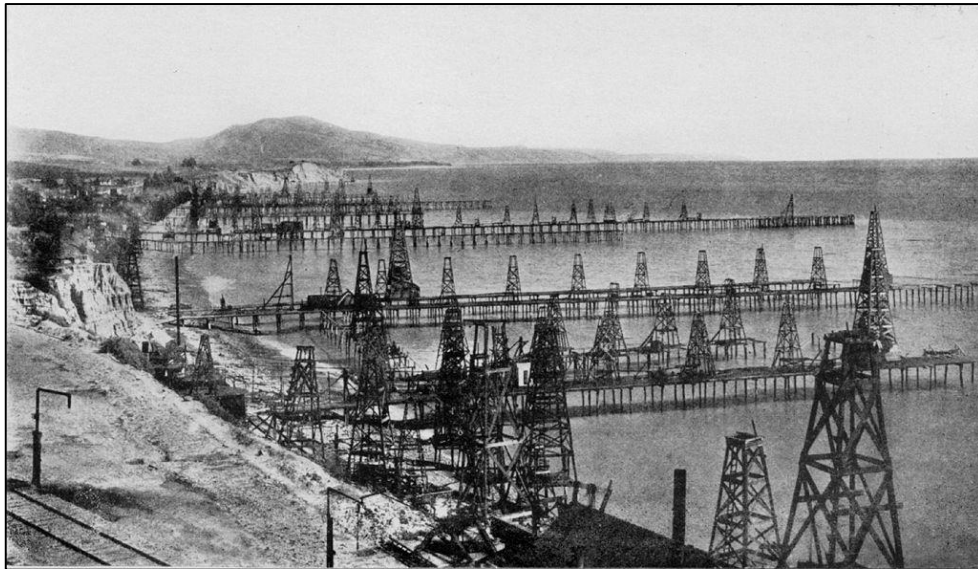


FIG 2.1 Poços de produção de óleo em Summerland, California, EUA, por volta de 1906. (Fonte: G.H Eldridge)

As condições inseguras destas instalações, associadas às condições severas do mar e solo marinho instável, levaram à necessidade de se encontrar soluções diferentes. Assim, de 1930 a 1950, a indústria adaptou as tecnologias usadas em terra para o uso em águas rasas. Um maior conhecimento das forças dos ventos e ondas nas estruturas marítimas levou ao desenvolvimento de novos equipamentos e procedimentos (PRATT et al., 1997).

Em novembro de 1947, Brown & Root, uma companhia de construção americana hoje parte do conglomerado Halliburton, construiu o que é considerada a primeira plataforma

offshore da indústria de óleo e gás, situada a 43km da costa da cidade de Morgan City, no estado americano da Louisiana, no Golfo do México.⁷

Ainda por volta de 1950, do outro lado do oceano Atlântico, eram realizadas as primeiras tentativas de exploração e produção na região conhecida como Mar do Norte, um mar marginal do oceano Atlântico limitado a oeste pelas costas da Inglaterra e Escócia, a leste pela Noruega e Dinamarca e a sul pela França, Bélgica, Holanda e Alemanha (WANG, 1992). Assim, entre 1959 e 1962, crescia a crença na hipótese que haveria óleo e gás no leito marinho do Mar do Norte e um grupo de companhias iniciava a exploração nessa região, culminando com a primeira descoberta comercial em 1965, pela British Petroleum (BP), no campo de gás de Westsole a 76km da costa da cidade de Easington, na Inglaterra (LARMINIE et al., 1987).

Mais tarde, na década de 1970, a Petrobras, estatal brasileira e maior empresa de óleo e gás do país, iniciou suas atividades na Bacia de Campos, no campo conhecido como Enchova (PETROBRAS, 2013). Com uma profundidade de 120 m e distância de aproximadamente 120 km da costa da cidade de Macaé, a exploração do campo representava o início da maior província petrolífera do Brasil, responsável por mais de 70% da produção do país atualmente⁸.

Desde então, estima-se que mais de 16.000 plataformas, dos mais diferentes tipos e tamanhos, tenham sido instaladas em alto-mar em diferentes partes do mundo para a produção de óleo e gás⁹. Atualmente cerca de 30% da produção mundial de óleo e gás é proveniente de reservas abaixo do leito marinho. Além da complexidade e quantidade de plataformas, as distâncias de instalação têm aumentado. Enquanto no início a exploração *offshore* só era possível em curtas distâncias, atualmente existem plataformas sendo instaladas a mais de 350 km, o que propicia um desafio enorme à logística de equipamentos, materiais e pessoas.¹⁰

2.2. HELICÓPTEROS

Um helicóptero pode ser definido como qualquer máquina voadora usando asas rotativas (rotores) para promover elevação, propulsão e forças de controle. O rotor produz uma força de elevação igual ao peso do helicóptero, o que não requer nenhuma velocidade para frente e

⁷ Kellog, Brown & Root (KBR). <<http://www.kbr.com/About/History/>>. Acesso em 24/11/2013.

⁸ Destaques Operacionais. Petrobras. Março/2015. <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/producao/producao-mensal-de-oleo-e-gas-natural-brasil-e-internacional/producao-mensal-de-oleo-e-gas-natural-brasil-e-internacional.htm>> Acesso em 26/04/2015.

⁹ Infield Systems. <<http://www.infield.com/oil-gas-database/fixed-floating-platform-facilities>>. Acesso em: 27 jul. 2014.

¹⁰ Global Offshore Oil & Gas Outlook, Infield Systems, 2013.

permite ao helicóptero elevar-se verticalmente do solo e pairar. Inclinando-se a orientação dos discos e pás do rotor são providos forças e momentos para controlar o helicóptero em voo (LEISHMAN, 2006). O termo helicóptero é adaptada da língua francesa *hélicoptère*, cunhado por Gustave de Ponton d'Amecourt em 1861 (LE ROY, 2007).

Segundo Leishman (2006), anteriormente ao século XIX houve poucas investigações científicas sobre o voo ou da ciência da aerodinâmica. Há indícios de contribuições chinesas por volta de 400 a.C., passando pelas contribuições de Leonardo da Vinci e seu “parafuso aéreo” no século XV e posteriormente por Mikhail Losmonov, Christian de Launoy entre outros no século XVIII. No entanto, essas contribuições podem ser consideradas inventivas, embora alguns desenhos tenham, de fato, contribuído para novos conhecimentos e direcionado para o desenvolvimento bem-sucedido do helicóptero moderno. Mas foram, ainda segundo o autor, as contribuições “mais científicas” de engenheiros como Juan de La Cierva, Henrich Focke, Raoul Hafner, Harold Pitcairn, Igor Sikorsky e Arthur Young que tornaram o desenvolvimento de um helicóptero verdadeiramente seguro e prático uma realidade.

Conforme indica Hirschberg (2000), Igor Sikorsky é conhecido por ter dado início à produção em série e larga escala de helicópteros comerciais em 1942, além de ter contribuído para a pesquisa e desenvolvimento do desenho dos rotores da forma como são hoje (rotor principal e rotor de cauda antitorque). A Sikorsky Aircraft Corporation™, empresa fundada por ele em 1923¹¹, é ainda hoje uma das três maiores fabricantes de helicópteros do mundo, e possui como principais concorrentes as empresas Boeing™, Airbus Helicopters™, Bell Helicopter™ e AgustaWestland™.

Os helicópteros modernos apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos, mas a maioria compartilha os mesmos grandes componentes, que podem ser classificados em estrutura fundamental (*airframe*), fuselagem (*fuselage*), sistema do rotor principal (*main rotor system*), sistema do rotor de cauda (*tail rotor system*), trem de pouso (*landing gear*), motores (*powerplant*) e transmissão (*transmission*) (FAA, 2013). A Figura 2.2 abaixo ilustra estes componentes comuns às aeronaves.

¹¹ Sikorsky. About Sikorsky. Disponível em: <<http://www.sikorsky.com/About+Sikorsky>>. Acesso em: 23 nov. 2013.

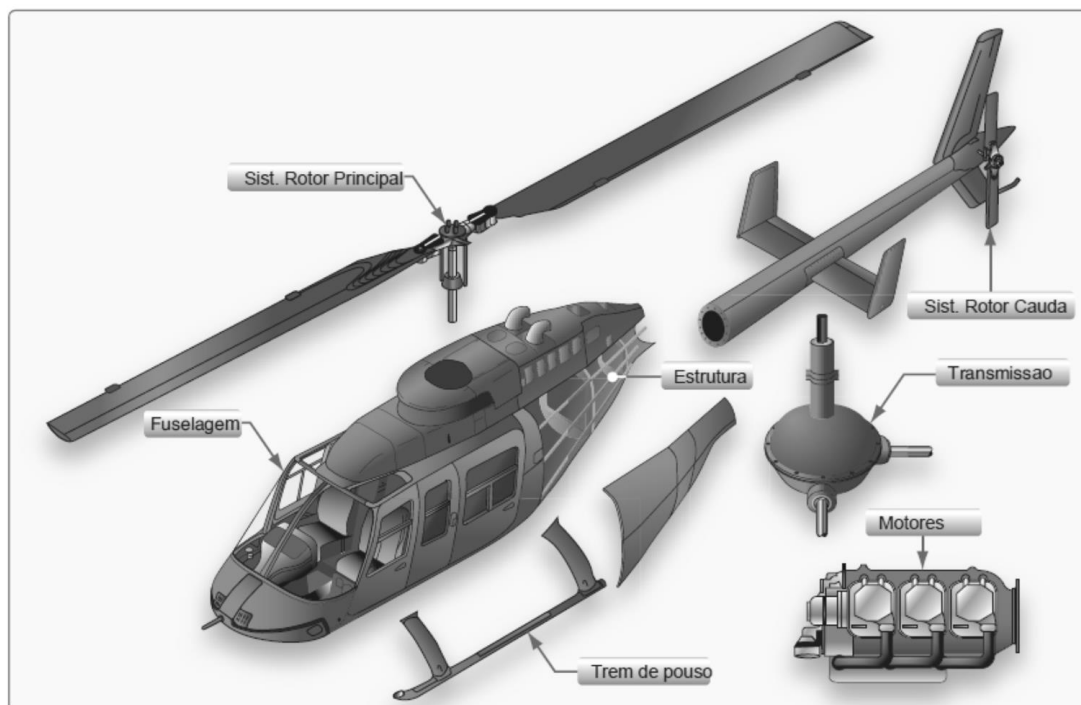


FIG 2.2. Maiores componentes de um helicóptero. (Fonte: Adaptado de FAA, 2013).

Os materiais mais utilizados nos componentes são ligas metálicas, madeira ou materiais compostos, ou uma combinação destes. Tipicamente, um material composto é constituído por diversas camadas de fibras impregnadas com resinas, ligados de modo a formar um painel liso. Estruturas tubulares e ou chapas de subestruturas metálicas geralmente são feitos de alumínio, apesar de aço inoxidável ou titânio por vezes serem utilizados em áreas sujeitas a maior desgaste ou calor.

A versatilidade do helicóptero despertou interesse nos fabricantes e projetistas de aviões. Deste modo, o desenvolvimento de veículos híbridos de helicóptero e avião tiveram seus primeiros desenvolvimentos por volta de 1920, com o desenho de aeronaves com capacidade para decolagem e pouso vertical. Estas aeronaves ficaram conhecidas como “tilt rotors” e tinham o objetivo de aliar a versatilidade de um helicóptero à velocidade e autonomia de um avião. Os desenvolvimentos se deram ao longo das décadas seguintes, com o desenvolvimento de aeronaves como o Bell XV-3, o Bell XV-15 e o Boeing V22 Osprey (MAISEL et al., 2000).

A Figura 2.3 apresenta alguns dos modelos desenvolvidos ao longo do século 20, sendo o V22 Osprey o único ainda em produção e operação pela Marinha e Força Aérea norte-americanos. Embora o emprego destes modelos tenha sido apenas militar, existem projetos para

uso civil, como o AgustaWestland AW609¹², que possui configuração similar ao V-22 Osprey. S, e previsão de entrada em operação a partir de 2017.

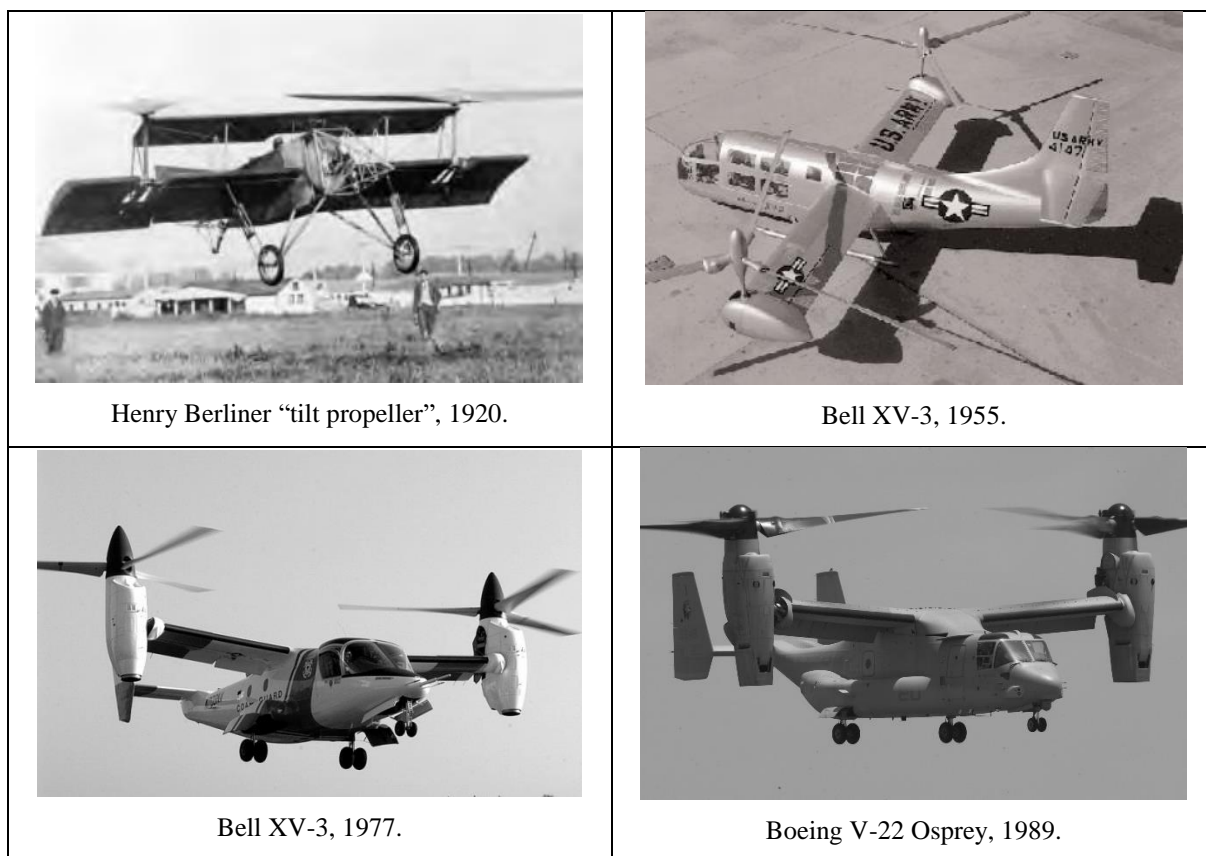


FIG 2.3 Aeronaves "Tilt-rotor". Híbrido entre avião e helicóptero. (Fonte MAISEL et al., 2000)

2.3. TRANSPORTE AÉREO POR HELICÓPTEROS *OFFSHORE*

Helicópteros têm sido o principal meio de transporte de pessoas de e para as instalações *offshore* da indústria de óleo e gás por mais de 60 anos. Embora seja mais confortável e menos prejudicial em termos de enjoo de viagem e cansaço se comparados às viagens por transporte marítimo, o transporte por helicóptero é percebido por muitos trabalhadores com sendo uma parte desconfortável e perigosa do seu trabalho. No transporte por helicópteros o voo consiste em uma sequência de estágios que começa em um aeródromo (heliporto ou aeroporto) em terra, visita algumas instalações *offshore* para embarcar ou desembarcar passageiros e, usualmente, retorna ao mesmo aeródromo (QIAN et al., 2012).

¹² <http://www.agustawestland.com/products/aw609>, Acesso em 31/05/2015.

Atualmente as áreas *offshore* mais exploradas no mundo são o Golfo do México (costa dos Estados Unidos), Mar do Norte, Mar Cáspio, Brasil, Oeste da África e Austrália. Os dois primeiros são as áreas mais maduras e desenvolvidas, sendo explorados há mais de 50 anos. Em cada uma dessas regiões podemos encontrar frotas dedicadas ao transporte de passageiros da indústria *offshore* que excedem os 200 helicópteros, dos mais diferentes modelos e portes.

Ulleberge et al. (1991) descrevem em linhas gerais as operações do Mar do Norte e as preocupações da indústria e do governo com as questões de segurança. O estudo indica que a utilização anual de cada helicóptero nesse segmento supera em quase 4 vezes a utilização média de helicópteros militares. Além disso, os voos são realizados em longas distâncias no mar, grande parte fora do espaço aéreo controlado, em condições climáticas severas, com pousos realizados em pequenas posições (*helidecks*) nas plataformas, que, embora ancoradas, possuem movimentos consideráveis que tornam esta etapa muito mais complexa. Em função dessas dificuldades, os autores concluem que na década de 1990, o índice de acidentes fatais por transporte de helicóptero no Mar do Norte era significativamente superior ao das linhas aéreas regulares, apesar do alto padrão das operações, manutenção e gestão. Indicam ainda que, embora outras fontes indiquem que fatores humanos eram a preocupação dominante na segurança mundial de helicópteros, a confiabilidade técnica é a área mais promissora para melhorias em relação à segurança do transporte por helicópteros.

O cenário brasileiro não é diferente. Com a descoberta da Bacia de Campos pela Petrobras em 1974, iniciava-se a necessidade por novas opções de transporte de pessoas e para as unidades estacionárias de produção (UEP) e sondas de perfuração. Enquanto uma viagem utilizando embarcações levaria não menos que 2 horas para as unidades mais próximas e envolvia operações de transbordo complexas no destino em alto-mar, o voo de helicóptero poderia ser realizado em pouco tempo e de uma maneira mais segura e confortável. A diferença se tornava ainda mais significativa para as plataformas mais distantes, atualmente situadas a mais de 300km da costa.

Registros indicam que as operações *offshore* da Petrobras tenham se iniciado nessa época com uma frota de 8 aeronaves, providos pela empresa de táxi aéreo Líder Aviação, que ainda aparece nos dias de hoje como um dos maiores fornecedores deste tipo de serviço no Brasil.¹³

¹³ Líder Aviação. Disponível em: <<https://www.lideraviacao.com.br/pt-br/institucional>>. Acesso em 19/04/2015

No final da década de 1980 a Petrobras já contava com cerca de 20 helicópteros de vários tipos fazendo o serviço de transporte aéreo para mais de 60 pontos em alto-mar. Já existia ali a necessidade e a preocupação com a implementação de sistemas computadorizados para controle da operação, incluindo algoritmos para processamento de dados e roteirização dos helicópteros (GALVÃO e GUIMARÃES, 1990).

Em 2005 a Petrobras já contava com cerca de 42 helicópteros em operação para transporte *offshore*. Eles eram contratados de companhias como a já citada Líder Táxi Aéreo e a Brazilian Helicopter Services – BHS (LYRA DA SILVA, 2005).

Atualmente a frota da Petrobras situa-se em torno de 110 helicópteros destinados ao transporte de passageiros, operando em praticamente toda a costa brasileira, e integralmente contratada de 6 diferentes fornecedores. A maior concentração da frota situa-se nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo.

Os modelos mais utilizados nesta indústria são os bi-turbina, em função de sua maior segurança em voo. A Agência Federal de Aviação dos Estados Unidos (FAA) classifica os modelos em leve/pequeno (9 passageiros ou menos), médio (10 a 18 passageiros) e grande porte (19 ou mais passageiros). Embora não haja um padrão internacional, essa classificação é também utilizada pela indústria *offshore*. Os modelos mais utilizados são o Bell 206, Bell 212, AgustaWestland AW109, AW139, AW169, Airbus Helicopters EC135, EC145, EC 155, EC225 e os Sikorsky S-76 e S-92. A Figura 2.4 apresenta alguns destes modelos.







Pequeno porte	Médio porte	Grande porte
 <p>Bell 206</p>	 <p>Bell 212</p>	 <p>EC225</p>
 <p>EC 135</p>	 <p>AW 139</p>	 <p>S-92</p>



FIG 2.4 Modelos de helicópteros mais utilizados para transporte de passageiros na indústria de óleo e gás.

Segundo Flanagan (2007), as maiores empresas de helicópteros do mundo são CHC e Bristow. Os mercados destas empresas são diversos, como a indústria de óleo e gás, táxi aéreo para empresários e políticos, operações de busca e salvamento (SAR - *Search and Rescue*) e evacuação médica (EMS – *Emergency Medical Services*) para governos em geral. No entanto, o autor indica que mais de 70% do faturamento destas empresas se deve ao mercado *offshore* de óleo e gás, entre transporte de passageiros, sísmica aérea e outros serviços específicos. O autor revela ainda que o tamanho das empresas é fator crítico para o sucesso. A consolidação dessas empresas, atividade que teve seu auge nas décadas de 1990 e 2000, permitiu que elas tivessem maior acesso a capital e ganhos de escala significativos. Essas vantagens competitivas, aliadas aos investimentos em segurança e disponibilidade, permitiram que as empresas crescessem em diversas regiões do globo, competindo com empresas menores.

O transporte aéreo por helicópteros, assim como outros modais de transporte, enfrenta os mesmos problemas de otimização de custos e definição de melhores rotas. No entanto, diferentemente do usual na indústria de transporte terrestre e marítimo, não raro os modelos de otimização possuem restrições fortes com relação à segurança ou até apresentam como objetivo a maximização da segurança em detrimento do custo. Assim, a literatura, embora menos extensa que a dos outros modais, indica vários trabalhos de otimização, roteirização entre outros. Como exemplo, Viotti e Andrade (2010) apresentam um modelo para escolha de aeronaves adequadas às missões *offshore*, baseado no método Analítico Hierárquico (AHP). Os critérios utilizados são a autonomia, capacidade, custo, equipamentos, treinamento e segurança.

2.4. MANUTENÇÃO, CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

A associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em 1994, a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 5462, que possuía como objetivo definir os termos relacionados com a confiabilidade e manutenibilidade. Conforme a norma, os estados de um item e os tempos relacionados aos mesmos podem ser verificados nas Figuras 2.5 e 2.6.

Disponibilidade			Indisponibilidade		
			Estado de Incapacidade		
Estado de Prontidão	Estado Livre	Estado de ocupação/operação	Estado de incapacidade por razões externas	Estado de Indisponibilidade	
				Sujeito à manutenção preventiva	Em pane

FIG 2.5 Estados de um item. (Fonte: Adaptado da NBR 5462 - ABNT, 1994)

Tempo Total			
Tempo não-requerido	Tempo Requerido		
	Tempo De Disponibilidade	Tempo De Incapacidade	Tempo De Disponibilidade
		Tempo De Indisponibilidade	Tempo De Incapacidade Por Razões Externas
	Tempo De Manutenção	Tempo De Pane Não-Detectada	Atraso Administrativo

FIG 2.6 Diagrama dos Tempos do estado de um item. (Fonte: Adaptado da NBR 5462 - ABNT, 1994)

No campo da confiabilidade e manutenção, mais especificamente para a Indústria do Petróleo e Gás Natural, foi definida a Norma ABNT ISO 14.224:2011, que é a versão brasileira da norma ISO 14.224:2006, da Organização Internacional para Padronização (ISO). A norma fornece a base para a coleta de dados de confiabilidade e manutenção em um formato-padrão para equipamentos em todas as instalações e operações nas indústrias de petróleo, gás natural e petroquímica durante o ciclo de vida dos equipamentos. Embora a norma não trate especificamente de helicópteros ou aeronaves, item estudado no presente trabalho, os termos e definições relacionados à confiabilidade e manutenção podem ser extrapolados para qualquer tipo de equipamento.

2.4.1. MANUTENÇÃO

Manutenção, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1994), é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. A manutenção é comumente classificada por tipos, dos quais os mais comuns são a preventiva, a corretiva e a preditiva.

Ainda segundo a Associação, a manutenção preventiva é aquela efetuada anteriormente à ocorrência de uma falha ou pane, geralmente realizada em intervalos

predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. A manutenção corretiva, por outro lado, é aquela realizada após a ocorrência de uma falha ou pane e é destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. O terceiro tipo, a manutenção preditiva, aparece como uma manutenção preventiva mais sofisticada, incluindo a aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão ou de amostragem, para aumentar a previsibilidade da ocorrência de uma falha e otimizar o número de manutenções preventivas a corretivas.

Pinto e Xavier (2009) definem seis tipos de manutenção: a corretiva, dividida em planejada e não planejada, a preventiva, a preditiva, a detectiva e a engenharia de manutenção. A manutenção detectiva, segundo os autores, começou a ser citada na literatura na década de 1990, proveniente do termo em inglês “Detective Maintenance”, e tem o objetivo de atuar na detecção de falhas ocultas ou não perceptíveis, muitas vezes por meio de sistemas digitais e instrumentação de controle. A engenharia de manutenção, por sua vez, é definida como uma sistemática e mudança cultural com o objetivo de identificação das causas raízes, modificar situações de baixo desempenho, eliminar problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, interferir tecnicamente nas compras para se ter equipamentos ou sistemas que tenham a disponibilidade de que a fábrica necessita para atender o mercado, atender ao cliente, razão de ser da existência da fábrica e da manutenção. A Figura 2.7 ilustra a evolução da manutenção ao longo do tempo, segundo os autores.

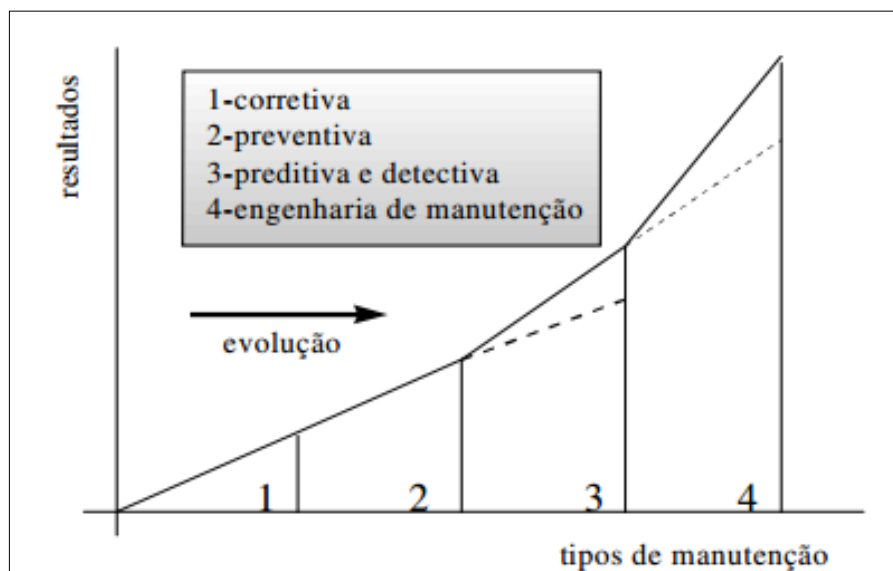


FIG 2.7 Mudança de paradigma na manutenção. (Fonte: Pinto e Xavier, 2009).

2.4.2. CONFIABILIDADE

Confiabilidade, segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1994), é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Segundo a associação, o termo “confiabilidade” é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade. Outras medidas são definidas na norma, como a Taxa de falha instantânea, Taxa de falha média, Intensidade de falha instantânea, Intensidade de falha média, Tempo de restabelecimento médio (MTTR – *Mean Time To Repair*), Eficiência de detecção de panes, Eficiência de reparo, Tempo médio até falha (MTTF – *Mean Time to Failure*), Tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failures*) e o Tempo médio de operação entre falhas (MOTBF - *Mean Operating Time Between Failures*).

Hosford (1960) indica que existem muitas medidas de confiança, mas que as mais importantes são a confiabilidade, a disponibilidade pontual e a disponibilidade intervalar.

Ranous (1964) critica a falta de uniformidade e conhecimento sobre o conceito de confiabilidade. Primeiramente ele apresenta o que o ela não é: não é simplesmente desempenho previsível, não é longevidade de um equipamento, não é acurácia ou precisão, nem prontidão, nem baixa taxa de falha ou *downtime*, nem alta qualidade. Posteriormente o autor define confiabilidade como a probabilidade que um dado equipamento irá atingir os parâmetros de desempenho selecionado sob condições ambientais e operacionais especificadas por um período de tempo.

Ireson et al. (1995) revelam que a confiabilidade é definida de diferentes formas e a mais amplamente aceita que é a habilidade ou capacidade de um produto desempenhar uma função específica em um determinado ambiente por um período mínimo de tempo ou um número mínimo de ciclos ou eventos. Segundo os autores, a confiabilidade é apenas uma característica, dentre outras, da qualidade, e indicam que a engenharia de confiabilidade é uma ciência em ampla expansão e essencial para o projeto de produtos duráveis e confiáveis.

Avizienis et al. (2014) utilizam um conceito mais geral relacionado à confiabilidade, chamado de Confiança (*dependability*), que é utilizado por alguns autores e pode ser definido como a capacidade de se oferecer um serviço que pode justificadamente ser confiável. Os atributos da confiança representam diferentes aspectos da entrega do serviço. Segundo os autores, os atributos mais difundidos e estudados são:

- Confiabilidade (*Reliability*): caracteriza a continuidade do serviço correto.

- Disponibilidade (*Availability*): caracteriza a prontidão do serviço correto.
- Segurança (*Safety*): caracteriza a ausência de consequências catastróficas para o usuário ou o ambiente.
- Integridade (*Integrity*): caracteriza a ausência de alterações impróprias no sistema.
- Manutenibilidade (*Maintenability*): caracteriza a capacidade de submeter-se a modificações e reparos.

Tiassou (2013a) indica que a confiabilidade pode ser medida de modo qualitativo, por meio de ferramentas como FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) e FTA (*Fault Tree Analysis*) ou de forma quantitativa por medidas de probabilidade do atendimento dos seus atributos como confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e outras medidas como MTTF (*Mean Time to Failure*).

A indústria aeronáutica e as empresas de transporte aéreo também estabeleceram um indicador importante de confiabilidade, chamado “Despachabilidade” ou “Confiabilidade de Despacho” (*Schedule Reliability ou Dispatch Reliability*). Segundo Júnior (2008) a Despachabilidade traduz o cumprimento do horário do voo, identificado no bilhete. Assim, terão maior despachabilidade as aeronaves ou empresas que estiverem em condições de efetuar um maior percentual de voos no horário previsto ou com um pequeno atraso.

Segundo Wu e Caves (2002), as consequências de atrasos em voos são a redução de produtividade das empresas além da perda de tempo e de lealdade dos clientes. Segundo os autores, os atrasos de voos geram um elevado custo, principalmente pela perda permanente de clientes (24% do custo total) e atrasos induzidos na cadeia de voos (54% do custo total), contra apenas 22% do custo total relativo ao impacto direto do atraso.

Wyndham (2013) indica que a Disponibilidade da aeronave e a Confiabilidade de Despacho são dois sinais vitais de qualquer operação de aviação. Para as empresas de linhas aéreas, uma janela padrão de confiabilidade engloba pequenos atrasos de até 15 minutos do programado. São excluídos problemas não relacionados à aeronave como controle de tráfego aéreo, mal tempo, atrasos de conexões, etc. A meta da maioria das empresas é obter uma confiabilidade de despacho superior a 99%. Os dados sugerem que as grandes regionais e maiores companhias aéreas atingem 96-98%, enquanto as mais confiáveis atingem 99-99.5%. Os níveis de disponibilidade, por outro lado, costumam ser mais baixos, em torno de 85%. Alguns operadores lidam com taxas ainda menores, próximas as 80%, em função de problemas relacionados à manutenção não programada. O autor indica que poucas companhias medem a

disponibilidade, tendo um maior foco no monitoramento e controle da confiabilidade de despacho. Isto eleva a necessidade de aeronaves na frota, uma vez que aeronaves não disponíveis deverão ser substituídas por outras para manter-se um nível de confiabilidade de despacho elevado.

2.4.3. DISPONIBILIDADE

Diferentemente da confiabilidade, mas ainda complementar na análise da confiança do sistema, a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (ABNT, 1994). Esta definição é reforçada pela norma ISO 14.224:2006, que também define a disponibilidade como a capacidade de um item de estar em estado de desempenhar uma função requerida, sob determinadas condições, num dado instante ou durante um determinado intervalo de tempo, considerando que os recursos externos necessários sejam fornecidos (ABNT, 2011).

Segundo a NBR 14.224:2006 (baseada na ISO 14.224:2006), a definição de disponibilidade pode levar a um entendimento de que Disponibilidade e Confiabilidade são conceitos idênticos. Ainda que as definições pareçam muito semelhantes, estes conceitos são diferentes, a saber:

- Disponibilidade: item operando em um dado instante (não importando o que aconteceu antes);
- Confiabilidade: item operando continuamente durante um período de tempo completo.

É importante também elencar as diferenças entre as medidas de disponibilidade, que podem ser instantânea (pontual) ou média. Para a disponibilidade pontual ou instantânea, interessa apenas o fato de que o item opera bem quando é exigido (não importando se ele apresentou falhas em algum momento anterior, contanto que ele tenha sido reparado desde então e não tenha apresentado novas falhas). Para a disponibilidade média, observa-se uma média durante um dado período de tempo. Isto corresponde à razão do tempo de operação efetivo ao longo de todo o período de tempo de interesse (ABNT, 2011).

Stapelberg (2009) relata que a disponibilidade, para sistemas reparáveis, é geralmente considerada a razão entre o tempo atual de operação e o tempo planejado, excluindo as manutenções preventivas ou planejadas. O autor considera que a disponibilidade e a confiabilidade de um sistema não-reparável possuem a mesma conotação do ponto de vista quantitativo, uma vez que representam a probabilidade de um sistema estar em um estado operável quando requerido. A diferença, no entanto, é que a confiabilidade é uma medida de um sistema ou equipamento sujeito a falhas e a disponibilidade é sujeito tanto à falha quanto ao reparo.

No campo da aviação, segundo Decker (2013), se toda a manutenção está concluída e a aeronave está aeronavegável (*airworthy*), da forma definida na regulamentação, então ela está disponível. O autor sugere que o cálculo da disponibilidade leve em conta todo o tempo disponível da aeronave, indiferente se o cliente ou usuário irá utilizá-la ou não, de maneira a tornar a métrica mais compreensiva. Ainda segundo o autor, uma pesquisa com operadores de 2000 jatos comerciais nos Estados Unidos indicou que apenas 36% medem e controlam a disponibilidade das aeronaves (além da confiabilidade de despacho). Outra descoberta indicada é que esses possuem uma utilização maior e menos dias de manutenção do que os que medem apenas a confiabilidade de despacho.

Outra definição comumente associada com disponibilidade, mais utilizada no meio militar, é a taxa de capacidade de missão ou *Mission Capable Rate* (MCR). O Departamento de Defesa e a Força Aérea Americana definem a MCR como a taxa utilizada para medir quanto tempo, em função do tempo total disponível, um sistema pode desempenhar pelo menos uma das missões designadas.¹⁴

A MCR é usada pela Força Aérea Americana para descrever a prontidão operacional das suas frotas de aeronaves. A força aérea tem três níveis primários dessa medida, *Fully Mission Capable* (FMC), *Partially Mission Capable* (PMC) e *Not Mission Capable* (NMC). Uma aeronave é capaz de desenvolver uma missão se está no estado FMC ou PMC. A lista mínima de subsistemas essenciais define os sistemas e subsistemas que devem estar operacionais para a aeronave realizar suas missões designadas (BALABAN et al., 2000).

No meio militar, a disponibilidade de uma aeronave é comumente relacionada à disponibilidade de peças de reposição ou peças reparáveis. Se uma aeronave não está à espera de um componente a ser reparado ou enviado, ela está disponível. Assim, uma aeronave

¹⁴ Air Force Pamphlet 63-128, Guide To Acquisition And Sustainment Life Cycle Management. 2009.

disponível é aquela que não possui componentes em lista de espera *ou backorder*. O cálculo da disponibilidade é feito em dois passos. Primeiro o número esperado de *backorders* é computado. Depois, a probabilidade das *backorders* ocorrerem na aeronave é calculado. Esta probabilidade é definida como a taxa de disponibilidade da aeronave (REXROAD, 1992).

A disponibilidade, como verificado, é um conceito amplo, que engloba a confiabilidade entre outros aspectos e métricas mais específicas. Conforme Figura 2.8, o termo disponibilidade de aeronaves (*aircraft availability*) possui mais ocorrências que o termo confiabilidade de aeronaves (*aircraft reliability*) segundo a ferramenta *N-Gram Viewer*, que é um mecanismo de busca e análise de combinações de palavras em mais de 5 milhões de livros digitalizados pela empresa Google Inc., que abrange livros publicados entre 1500 e 2008.

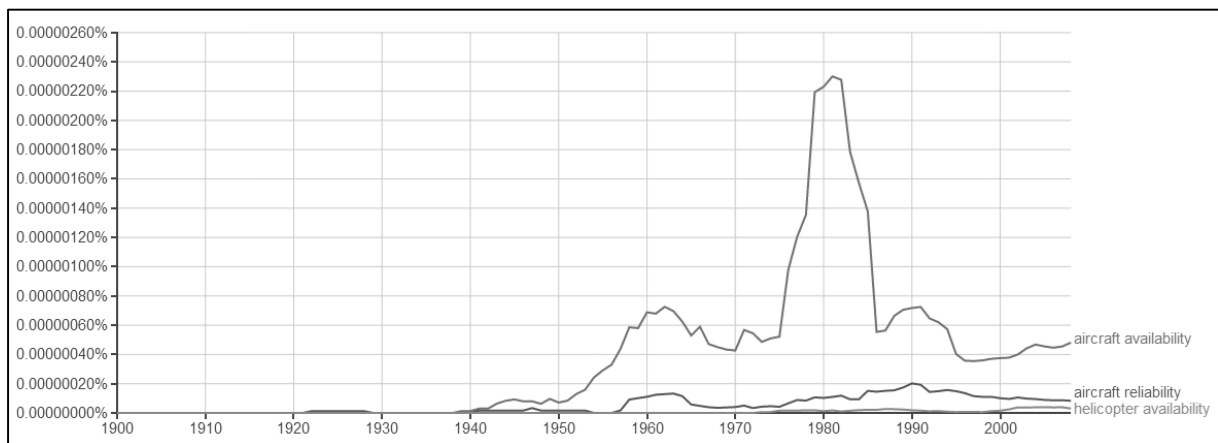


FIG 2.8 Ocorrências dos termos *Aircraft availability*, *Aircraft reliability* e *Helicopter Availability* entre 1900 e 2008. (Fonte: Google N-gram viewer).

2.4.4. AVIAÇÃO CIVIL

O sucesso da missão de uma aeronave está sujeito ao preenchimento de alguns requisitos operacionais antes e durante cada voo. Como estes requisitos dependem essencialmente dos componentes da aeronave e do perfil da missão, os efeitos de uma falha podem ser muito severos se não forem previstos antecipadamente. Nos anos iniciais da aviação, a análise de confiança (*dependability*) para planejamento de manutenção não era considerado essencial, e a manutenção era desempenhada somente quando era realmente necessária (TIASSOU et al., 2013b).

A indústria aeronáutica se depara com sérias dificuldades para manter suas margens de lucro e o negócio rentável. Um dos grandes desafios é balancear os custos de manutenção sem afetar os níveis de segurança de suas operações. Estima-se que de 12% a 15% dos acidentes no setor são ocasionados por falhas de manutenção (PATANKAR e TAYLOR, 2004). Dentre estes, supervisão inadequada, falhas de atenção/memória e erros de julgamento/decisão, estão envolvidos, respectivamente, em 80%, 51% e 52% dos casos de acidentes aéreos e aparecem como os principais fatores humanos envolvidos nas falhas. Os fatores podem ocorrer de forma isolada ou concomitante (KRULAK, 2004).

A manutenção nessa indústria, assim como em outras de alta confiabilidade, requer o uso de técnicas e procedimentos sofisticados, que são aplicados por pessoal altamente qualificado. As decisões anteriores e durante o voo são complexas e um erro pode custar a vida de dezenas ou até centenas de pessoas. Além disso, pode manchar a reputação da empresa de transporte aéreo ou do fabricante do modelo envolvido no acidente até que as causas sejam descobertas, o que pode levar anos.

Sachon e Pate-Cornell (2000) mostram a problemática das decisões que as empresas de aviação vivem diariamente entre um voo e outro. Os autores indicam que a prática padrão de manutenção de linha pode ser dividida em três etapas. Primeiro, o problema é reportado pela tripulação por meio de um relatório durante o voo. Segundo, quando a aeronave chega ao aeroporto de destino, a verificação do problema é realizada pelo pessoal de manutenção local. Qualquer problema identificado é classificado como adiável e não adiável, conforme a legislação¹⁵. Todos os problemas confirmados e não adiáveis devem ser corrigidos antes do próximo voo. Um mecânico certificado pela agência reguladora verifica se todas as regulações foram atendidas e, caso positivo, devolve a decisão à tripulação. O piloto faz então uma última vistoria geral na aeronave. Caso não fique satisfeito com o estado encontrado, pode se recusar a executar o voo, amparado e protegido pela legislação na maioria dos países.

Papakostas et al. (2010) revelam que os custos com manutenção oscilam entre 10% e 20% dos custos diretos de operação em uma empresa de aviação. Os autores introduzem uma abordagem para planejamento e suporte à decisão de manutenção de curto prazo entre voos nos aeroportos. Os critérios de seleção utilizados foram o custo, a vida útil remanescente, risco operacional e atraso de voo.

¹⁵ Itens adiáveis são aqueles não críticos para a segurança da aeronave. As agências reguladoras de diversos países, como a FAA (Federal Aviation Authority) dos EUA, a EASA (European Aviation Safety Agency) e a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) determinam quais itens são críticos e quais itens podem ter a reparação adiada por um período limitado de tempo.

A literatura indica que helicópteros aparentemente são mais vulneráveis a acidentes e incidentes severos do que aviões, uma vez que em sua maioria tem consequências fatais. Investigações mostraram que o rotor principal, o rotor de cauda, sistemas de transmissão e as turbinas são os mais críticos e ainda os componentes mais expostos a erros de manutenção (RASHID et al., 2010).

Em função da severidade enfrentada pelas operações *offshore*, que envolve um ambiente corrosivo e abrasivo, a manutenção dos equipamentos utilizados neste ambiente são ainda mais críticas. Muitas organizações como a Guarda Costeira Americana investem em programas de manutenção preventiva para mitigar os efeitos negativos dessas condições de operação adversas (HAHN e NEWMAN, 2008).

Percebe-se, por meio dos autores (RASHID et al., 2010; HAHN e NEWMAN, 2008) que, além de voos em helicópteros em geral serem inerentemente menos seguros que aviões, as operações aéreas sobre o mar (*offshore*) trazem um desafio adicional e um risco maior para os usuários deste transporte.

Em termos de manutenção, a preditiva aparece como uma das iniciativas mais sofisticadas e em atual expansão na indústria em geral. Na indústria aeronáutica, o uso de sistemas de gerenciamento prognóstico de saúde de equipamentos ou PHM (*Prognostic Health Management*) tem apresentado grandes avanços nos últimos anos. Conceitos relacionados ao PHM como HUMS (*Health and Usage Monitoring System*), CBM (*Condition Based Maintenance*) e IVHM (*Integrated Vehicle Health Management*)¹⁶ são processos e tecnologias promissoras para reduzir o custo total do ciclo de vida e melhorar a disponibilidade e prontidão dos equipamentos no campo da aviação civil e militar (YANG e WEI, 2013).

O impacto positivo de tecnologias de prognóstico nos custos de manutenção é primariamente o aumento da segurança, a redução de *downtime* (indisponibilidade) e dos custos extras envolvidos na manutenção não programada/corretiva (SCANFF et al., 2007). Estima-se que o mercado global para ferramentas de diagnóstico para a aviação comercial é superior a 1 bilhão de dólares americanos anuais (WYLIE, 1997).

Diversos autores como Zhao et al. (2012) e Papakostas et al. (2010) apresentam modelos para o uso de ferramentas de monitoramento de saúde e condição de aeronaves como forma de aumentar da segurança em voo e a redução dos custos do ciclo de vida desses equipamentos por meio de uma melhor programação da manutenção.

¹⁶ BELCASTRO, C. M. et al. Aviation safety program: integrated vehicle health management technical plan summary. NASA Technology Report, p. 1-53, 2006.

Segundo Kiyak (2012), a manutenção de aeronaves envolve todos os procedimentos e operações desempenhados para manter o equipamento pronto para o voo em condições adequadas durante todo seu ciclo de vida. O autor realiza um estudo dos efeitos da manutenção preventiva sobre a confiabilidade das aeronaves. O objetivo da manutenção preventiva, neste caso, é assegurar que partes da aeronave tenham uma confiabilidade acima de um nível determinado. Desta forma é teoricamente possível reduzir o número de *downtimes* inesperados e conseqüentemente o número de manutenções corretivas. O autor conclui que o uso de softwares centrados em confiabilidade pode trazer vantagens no longo prazo, embora os custos da manutenção preventiva devam ser sopesados para a obtenção de um nível de confiabilidade tão alto quanto razoavelmente praticável.

Fukushima (1972), uma das primeiras referências encontradas em termos de confiança da aviação comercial, apresenta como a confiabilidade operacional das aeronaves era monitorada e controlada nas companhias de aviação regular ou linhas aéreas na década de 1970. Segundo o autor, não havia, naquele momento, um índice aceito mundialmente que expressasse a confiabilidade de uma aeronave claramente. Ele apresenta três medidas comumente usadas na indústria: a Taxa de Atraso Mecânico (*Mechanical Delay Rate*), medido em função dos atrasos de 5 a 15 minutos nas decolagens programadas ocasionados por falhas mecânicas sobre o total de decolagens. Taxa de Defeitos em Voo (*Inflight Malfunction Rate*), medida pelo número de registro realizados por um período de tempo especificado em termos de horas voadas e por último, a Taxa de Falhas Significativas (*Significant Failure Rate*), medida pelo número de falhas registradas sobre o total de decolagens. Como exemplo o autor apresenta as taxas dos aviões DC-8 e Boeing 727 ao longo da década de 1960, como pode ser verificado na Figura 2.9. Percebe-se que as taxas, ao final da série de dados, encontram próximas de 4% para o DC-8 e 2% para o B727.

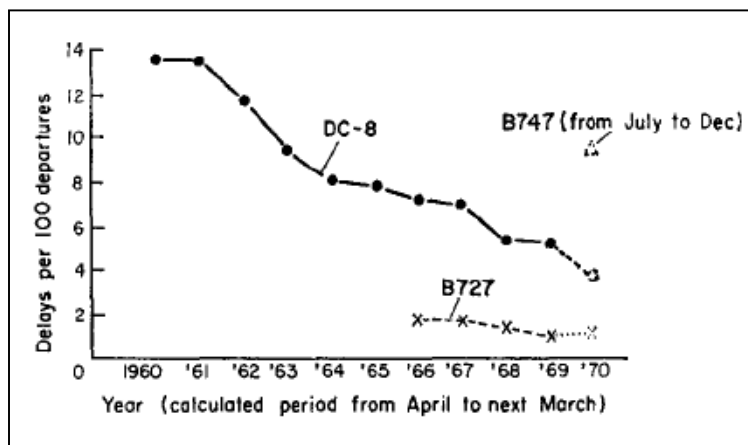


FIG 2.9 Taxa de Atraso Mecânico na Japan Airlines na década de 1960. (Fonte: Fukushima, 1972)

Na aviação por helicópteros as métricas são usualmente as mesmas da aviação regular por asa fixa. Como exemplo, a Sikorsky Corporation, grande fabricante de helicópteros americana, indica que a disponibilidade do seu modelo S-92, um helicóptero civil de grande porte, excede os 92%, considerando as 83 aeronaves desse modelo cumprindo missões *offshore* entre 2009 e 2011 (SIKORSKY, 2011).

Bazargan e McGrath (2003) apresentam um modelo de simulação discreta para aumentar a disponibilidade da frota de uma universidade aeronáutica americana, composta por 70 aeronaves. Segundo os autores, a disponibilidade da frota sempre foi um problema crônico. O número de aeronaves indisponíveis por manutenção atingia não raro um quarto da frota. Os autores propuseram um modelo de alocação dos mecânicos, distribuindo melhor as atividades entre os mesmos e reduzindo o tempo total de manutenção por aeronave, o que por sua vez aumenta a disponibilidade das mesmas para as missões programadas.

Tiassou et al. (2013) propõem uma modelagem para medir a confiabilidade operacional da aeronave de forma estocástica e dinâmica, levando em conta o estado operacional dos sistemas da aeronave, o perfil da missão e as instalações de manutenções disponíveis. O objetivo foi o de medir a confiabilidade em tempo real. Um estudo de caso foi apresentado para ilustrar o uso de Redes Estocásticas de Atividade na abordagem.

Pan e Espírito Santo Jr. (2004) apresentam a importância da padronização da frota para a obtenção de reduções de custos em manutenção, estoque de peças de reposição, ferramentas, treinamento e negociações com fornecedores. Os autores introduzem um índice para a medir o nível de padronização da Frota, o IPF (Índice de Padronização de Frotas). Com uma maior padronização da frota espera-se uma redução dos custos de manutenção somados a um melhor planejamento de rotas e voos na aviação. Kilpi (2007) estudou os efeitos da uniformidade e escala de uma frota de uma linha aérea no desempenho operacional e custos. O autor aplicou o índice proposto por Pan e Espírito Santo Jr. (2004), com uma pequena modificação, para 90 companhias aéreas, de 1976 a 2005. Os resultados mostraram que empresas com maior padronização da frota apresentam, em geral, um melhor resultado financeiro, como pode ser verificado na Figura 2.10.

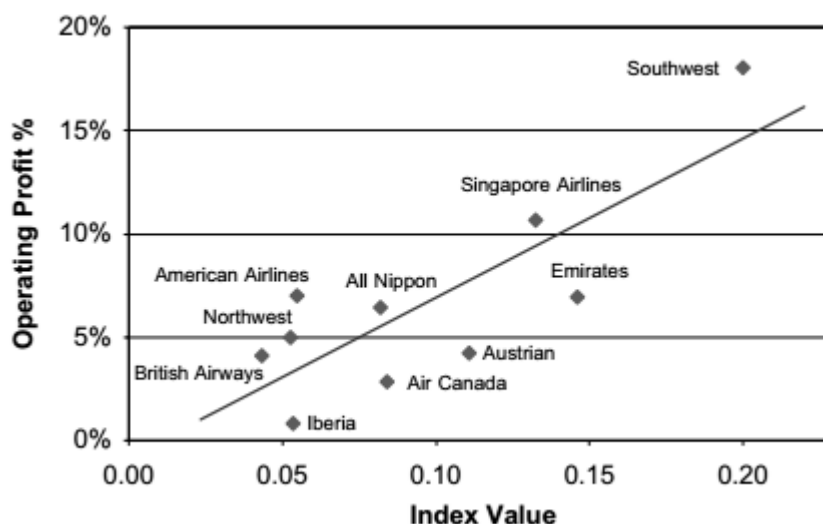


FIG 2.10 Índice de padronização da frota (IPF) versus Resultados Financeiros, para o ano de 2000.
(Fonte: KILPI, 2007)

Corroboraram estes resultados Zou et al. (2015), que em seus estudos também encontraram coeficientes significantes e altamente correlacionados entre a padronização da frota e os resultados financeiros de companhias aéreas. Os autores aplicaram, além do IPC, um índice similar ao Herfindahl-Hirshman Index (HHI), muito usado para medir concentração de mercado.

2.4.5. AVIAÇÃO MILITAR

A aviação militar brasileira remonta ao início do século XX, onde, em 1913, foi criada a Escola Brasileira de Aviação no Campo dos Afonsos, no Rio de Janeiro, sendo adquiridos os primeiros aviões do Exército.

As operações militares aéreas sob a gestão do Exército e Marinha perduraram ao longo das décadas de 1920 e 1930, terminando em 1941, quando foi criado o Ministério da Aeronáutica, cuja lei de criação atribuía à Força Aérea Brasileira a exclusividade da realização de estudos, serviços ou trabalhos relativos à atividade aérea nacional, extinguindo-se os Corpos de Aviação da Marinha e do Exército, encerrando a fase inicial da Aviação do Exército. Até a Segunda Guerra Mundial, a maioria das nações não dispunha de uma Força aérea independente. A Aviação Militar de apoio terrestre e naval eram integradas, respectivamente, ao Exército ou à Marinha. Com a criação do Ministério da Aeronáutica, o Brasil procurou alinhar-se às tendências da época, de criação de um comando independente de aeronáutica. Nesse modelo, toda a aviação militar fica integrada à Força Aérea.

No entanto, devido à experiência prática dos conflitos, em especial a Segunda Guerra Mundial, ficou constatada a necessidade do exército de implantação de uma aviação própria, que pudesse prover o apoio aéreo ao transporte de cargas e soldados de forma integrada e no menor tempo possível, agregando poder, mobilidade e flexibilidade às forças terrestres. Assim, na década de 1980, o Estado-Maior do Exército iniciou os estudos doutrinários do emprego de aeronaves de asas rotativas em proveito das forças de superfície, o que culminou com a criação da Diretoria de Material de Aviação do Exército e do 1º Batalhão de Aviação do Exército (CAVEX, 2014). Nesse novo modelo a maior parte da Aviação Militar fica integrada à Força Aérea, porém a Marinha e o Exército mantêm pequenos esquadrões para aviação militar aeronaval e aeroterrestre, respectivamente.

Para a retomada da aviação pelo Exército, alguns estudos foram realizados no âmbito organizacional e acadêmico como pode ser verificado em (MAZOTTI, 1987) e (CASTRO, 1987), que indicam, respectivamente, os aspectos a serem considerados no planejamento de operações de transporte envolvendo helicópteros e os procedimentos para avaliação de helicópteros para emprego militar.

Embora haja algumas diferenças significativas, a indústria enfrenta os mesmos problemas tanto no segmento militar quanto no segmento civil. Uma diferença básica é que a manutenção de aeronaves militares costuma envolver a diferenciação de tempos de paz (*peacetime*) e tempos de guerra (*wartime*). Desta forma, os estoques de peças são gerenciados de forma separada, sendo classificados em estoques de operação de tempos de paz (*POS – Peacetime Operating Stocks*) e em Kits de Peças de Prontidão para Guerra (*WRSK – War Readiness Spares Kits*). Esta diferenciação, por motivos óbvios, não é encontrada no segmento civil (O’MALLEY e BACHMAN, 1990).

A disponibilidade das aeronaves é ponto fundamental para a aviação militar. É função principalmente da adequação e eficiência da manutenção e suprimento. Tendo-se as condições de tempo e planejamento da operação, a disponibilidade pode atingir 100% em períodos curtos. No entanto, durante períodos prolongados, aviões podem manter maior percentagem de disponibilidade que os helicópteros (CASTRO, 1987).

Assim como o Brasil, o governo dos Estados Unidos da América, detentor do maior poderio militar global, criou a sua Força Aérea independente do Exército após a Segunda Guerra, no ano de 1947, mesmo ano de criação do Departamento de Defesa norte americano, que unificou as três forças armadas sob um mesmo comando (DoD, 2014).

Diversas leis requerem que o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América meça sua prontidão. O *Goldwater-Nichols DoD Reorganization Act of 1986* e o *United States Code* são duas das legislações principais que impõem esta diretiva sobre o órgão. O primeiro obriga o estabelecimento e manutenção de um sistema para medir a preparação de cada comando para desempenhar suas missões designadas. Já a seção 482 do título 10 do *United States Code* requer que o departamento de defesa envie relatórios trimestrais ao congresso, indicando o nível de prontidão militar, incluindo relatórios detalhadas de suas unidades, como disponibilidade de equipamento, equipamento não capazes de desempenhar sua função (*non mission capable*) entre outros (OLIVER, 2001).

Segundo o Manual de Métricas de Manutenção da Força Aérea Americana¹⁷, existem dois pilares para as métricas de manutenção: disponibilidade da frota (medida pela MCR) e execução das programações (medida pela taxa de utilização - UTE). Ainda segundo o manual, a disponibilidade da frota mede a habilidade logística de prover aeronaves suficientes para cumprir os requisitos das missões. Um dado percentual da frota necessita estar disponível em qualquer dia para executar o programa de voo. Assim, a MCR pode ser considerado um indicador global da saúde da frota. Ela pode ser calculada pela seguinte equação (1):

$$MCR = \frac{FMC (h) + PMCB (h) + PMCM (h) + PMCS (h)}{\text{Horas Disponíveis}} \times 100 \quad (1)$$

em que,

MCR = Mission Capable Rate (%) – Taxa de Disponível para Missão

FMC = Fully Mission Capable – Totalmente Disponível para missão

PMCB = Partially Mission Capable both maintenance and supply – Parcialmente Disponível para ambos manutenção e suprimento.

PMCM = Partially Mission Capable for maintenance – Parcialmente disponível para manutenção.

PMCS = Partially Mission Capable for supply – Parcialmente disponível para suprimento.

Balaban et al. (2000) apresentam um modelo de simulação desenhado para estimar a MCR da Força Aérea Americana. Segundo os autores, a MCR de aeronaves é utilizada para descrever a prontidão operacional (*operational readiness*) da frota. A medida combina frequência de falha com eficiência no reparo e, conseqüentemente, é dependente da confiabilidade, manutenibilidade e suprimento. O modelo é aplicado a uma frota de cargueiros

¹⁷ Maintenance Metrics U.S. Air Force. DIANE Publishing, 2001.

C-5 Galaxy. No artigo os autores indicam que a MCR da frota era de aproximadamente 60%. O modelo de simulação foi utilizado para testar uma série de possíveis modificações e seus impactos na MCR. Como resultado, o artigo indica que com as melhorias simuladas, a frota poderia atingir a taxa esperada de 75%.

Outro modelo desenvolvido para prever a MCR do órgão foi proposto por Ciarallo et al. (2005), com o nome de *Mobility Aircraft Availability Forecasting (MAAF)*, reforçando a importância e a preocupação do governo americano e do Departamento de Defesa acerca da previsão da disponibilidade das frotas aéreas.

Byrd et al. (1991) apresentam o conceito e um estudo de caso do que foi chamado de Sistema Inteligente de Gerenciamento da Manutenção (IMMS). O objetivo da metodologia é aumentar a MCR da frota, sem comprometer a segurança das missões e também equalizar o uso das aeronaves em uma base da Guarda Nacional Americana contendo uma frota de 44 helicópteros. O algoritmo mostra as próximas aeronaves a serem colocadas em manutenção programada, indicando os equipamentos que requerem manutenção em breve e o cronograma de prioridades de voo.

O'Malley (1983) apresenta um modelo analítico e de suporte à decisão, que relaciona os investimentos em compras e estoque de peças de reposição às taxas de disponibilidade de aeronaves. Os produtos finais são curvas de disponibilidade em função do custo para cada tipo de aeronave. O autor define disponibilidade de uma aeronave como o percentual de tempo em que ela está disponível sobre uma quantidade de tempo especificada, considerando que a aeronave está disponível quando não está faltando nenhuma peça ou componente. Assim, a disponibilidade olha apenas para o suprimento de peças reparáveis, sendo um componente da MCR. O autor mostra que aeronaves mais complexas, isto é, com um número maior de subsistemas e componentes, tendem a ter uma disponibilidade menor ao se usar determinadas políticas de ressurgimento como a taxa de preenchimento (*fill rate*) focada no componente. Tentando responder à pergunta “Com uma dada quantidade de dinheiro, quais peças devem ser compradas e estocadas para se atingir o maior nível de disponibilidade possível?”, são geradas listas ordenadas de compras de componentes para suporte à decisão. O modelo introduzido pelo autor, chamado de *Aircraft Availability Model (AAM)*, tornou-se o modelo mais utilizado e conhecido pela Força Aérea americana para a previsão da disponibilidade da frota, sendo comentado e aperfeiçoado por diversos autores nas décadas seguintes.

Asher et al. (1975) apresentam um estudo para identificar as tendências de crescimento da confiabilidade, manutenibilidade e segurança em helicópteros militares nos Estados Unidos

nas décadas de 1960 e 1970. São utilizados dados de três grandes fabricantes: Boeing, Sikorsky e Hughes. Segundo os autores, helicópteros tem consistentemente apresentado níveis relativamente altos de manutenções não-programadas em função dos altos riscos de confiabilidade e dos altos custos dos componentes. São apresentados os avanços em segurança nos helicópteros mais usados no Exército, Marinha e Força Aérea norte-americanos como o Bell UH-1 Iroquois, Kaman H-2 Seasprite, Sikorsky H-3 Sea King, Hughes OH-6 Cayuse, Sikorsky H-19 Chicksaw, Boeing Vertol H-21 Workhorse, Sikorsky H-34 Seabat, Sikorky H-37 Mojave, Boeing Vertol H-46 Sea Knight, Boeing CH-47 Chinook, Sikorsky CH-53 Sea Stallion e Sikorsky CH-54 Tarhe. Entre os avanços identificados, pode-se verificar reduções nos níveis de acidentes de 95.5 a cada 100.000 horas voadas em 1960 para 4.7 a cada 100.000 horas voadas em 1973, para o modelo UH-1, um dos mais utilizados. Algumas dessas aeronaves são apresentadas na Figura 2.11.



FIG 2.11 Modelos mais utilizados Exército, Marinha e Força Aérea norte-americanos nas décadas de 1960 e 1970.

O estudo dos autores indica ainda o impacto da evolução tecnológica com a introdução de novos modelos mais confiáveis e mais robustos ao longo dos anos na segurança das operações. A Figura 2.12 abaixo mostra esta tendência tanto para helicópteros quanto para aviões, com a redução do número de homens-hora investido na manutenção por cada hora de voo. Pode-se observar ainda como os helicópteros demandam mais tempo de manutenção que seus pares de asa fixa.

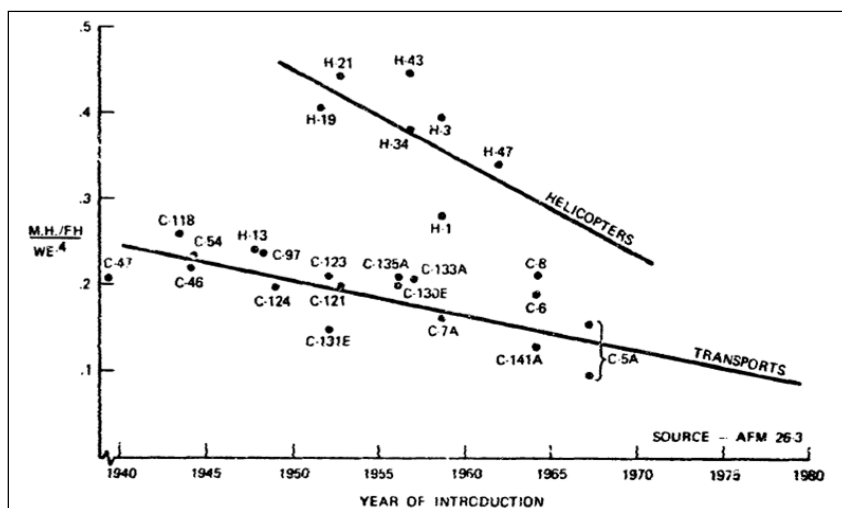


FIG 2.12 Manutenção de Helicópteros e Aviões da Força Aérea. Número de homens-hora por hora voada em função do ano de introdução dos modelos. Os pontos representam o ano de introdução de cada modelo (eixo x) de aeronave e seu respectivo consumo de mão de obra de manutenção (eixo y). (Fonte: Asher et al., 1975).

O'Malley e Bachman (1990) mostra os efeitos dos cortes de investimentos em estoque na disponibilidade da frota de dois modelos de aeronaves da Força Aérea Americana, o F-16A e F-111D. Segundo o autor, os cortes de investimentos em estoques levam a soluções alternativas como canibalização¹⁸, suprimento lateral entre setores e uso de estoques de guerra. O autor apresenta ainda as taxas de FMC e MCR desses dois modelos entre os anos de 1986 e 1989. A título de ilustração, pode-se verificar na Figura 2.13 essas taxas, que se situam em torno de 70% e 80%.

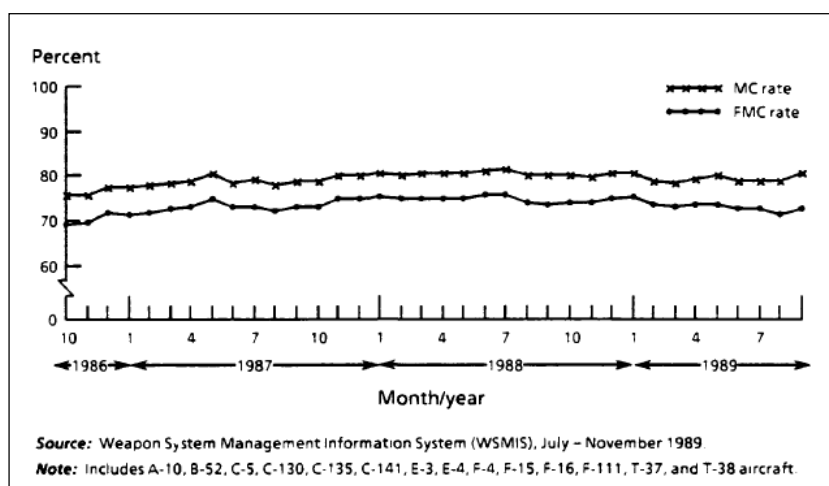


FIG 2.13 Taxa média de “Mission Capable” e “Fully Mission Capable” de vários modelos de aeronaves da Força Aérea Americana entre os anos 1986 e 1989. (Fonte: O'Malley, 1990).

¹⁸ Termo comum usado na indústria aeronáutica quando peças são retiradas de uma aeronave para recuperar outra que esteja indisponível. A aeronave canibalizada permanecerá indisponível em detrimento da que recebeu a peça.

OLIVER (2001) apresenta um modelo de previsão da taxa de prontidão (*readiness*) de uma frota de aeronaves com base em regressão. O autor revela que um dos indicadores da prontidão na Força Aérea Americana é a MCR. Revela ainda que a taxa MCR global do órgão se deteriorou ao longo da década de 1990. Entre 1986 e 2000 a taxa caiu de 94,5% para 82,5%. Entre as causas, as variáveis foram agrupadas em: pessoal, ambiente, confiabilidade e manutenibilidade da aeronave, investimentos e operações, sendo consideradas as 3 últimas as que mais influenciam na MCR.

A mesma problemática de medição e identificação dos fatores relacionados à MCR foi abordada por Pendley (2006). O estudo envolveu a frota de aviões modelo C-17 da força aérea americana, cujo MCR padrão era de 87,5% em 2006. Foram elencados os fatores que influenciam os níveis de MCR e disponibilidade da frota.

Além da forte influência dos fatores de confiabilidade, manutenibilidade e investimentos, Barthol (2005) indica que a estrutura organizacional também pode afetar as taxas de disponibilidade da frota.

Kapitzke (1995) estudou o efeito da variabilidade da distribuição de 15 itens na disponibilidade de uma aeronave. O modelo permite a simulação de diferentes curvas de distribuição de forma a se aferir a disponibilidade esperada do equipamento. O autor sugere que o modelo utilizado pela Força Aérea Americana para previsão da disponibilidade frota, o *Aircraft Availability Model* (AAM), fazia uso de médias de quatro atributos: o tempo de reparo em base, o tempo de reparo no depósito, o tempo de pedido e envio, e a taxa de falha/demanda do componente. Assim, o modelo desconsidera as médias de variabilidade desses atributos, que, mesmo em tempos de paz, são elevadas (CRAWFORD, 1988).

2.5. ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS

Segundo Kanti et al. (1980), a análise multivariada lida com dados contendo observações em duas ou mais variáveis cada uma medida em um conjunto de objetos. As técnicas têm o objetivo de fornecer uma gama de informações ao pesquisador que não podem ser observadas através da análise das variáveis isoladamente.

Mingoti (2005) define a Estatística Multivariada como um conjunto de métodos estatísticos utilizados em situações nas quais várias variáveis são medidas simultaneamente, em cada elemento amostral. A autora divide os métodos em dois grupos. O primeiro de técnicas exploratórias de sintetização (análise fatorial, análise de correlações canônicas, análise de

agrupamentos, análise discriminante e análise de correspondência) e o segundo de técnicas de inferência (estimação de parâmetros, testes de hipóteses, análise de variância, de covariância e de regressão múltipla).

Hair et al. (2009) citam os diversos tipos de técnicas multivariadas, entre elas a análise fatorial (de componentes principais e fatores comuns), regressão múltipla e correlação múltipla, análise discriminante múltipla, análise multivariada de variância e covariância, análise conjunta, correlação canônica, análise de agrupamentos e, por último, o escalonamento multidimensional. Ainda segundo os autores, a escolha do melhor método deve ser feita com base na análise dos dados disponíveis e dos objetivos propostos pelo pesquisador. Nesse sentido, formularam uma classificação de métodos multivariados, que pode ser verificada na Figura 2.14. O pesquisador deve realizar três julgamentos:

- 1) As variáveis podem ser classificadas em dependentes e independentes;
- 2) Quantas variáveis são tratadas como dependentes em uma única análise;
- 3) Como as variáveis são medidas (métricas ou não-métricas).

As respostas a estas perguntas indicarão o método estatístico multivariado mais adequado à análise dos dados. Os autores ainda introduzem as quatro suposições fundamentais para a realização de técnicas de estatística multivariada, a saber:

- 1) **Normalidade:** tida como a suposição mais fundamental, se a variação da forma da distribuição dos dados para uma variável métrica individual for suficientemente grande em relação à distribuição normal, todos os testes estatísticos resultantes são inválidos, uma vez que a normalidade é essencial para os testes F e t.
- 2) **Homocedasticidade:** suposição de que as variáveis dependentes exibem níveis iguais de variância ao longo do domínio das variáveis preditoras.
- 3) **Linearidade:** Como as correlações representam apenas a associação linear entre variáveis, os efeitos não lineares não serão representados no valor da correlação.
- 4) **Ausência de erros correlacionados:** deve-se garantir que qualquer erro de previsão seja não correlacionado.

Na presente revisão de literatura, serão apresentadas a Análise fatorial e a Análise de Regressão múltipla, duas técnicas multivariadas muito utilizadas para uma vasta gama de problemas de engenharia, economia, psicologia, sociologia, medicina, entre outros.

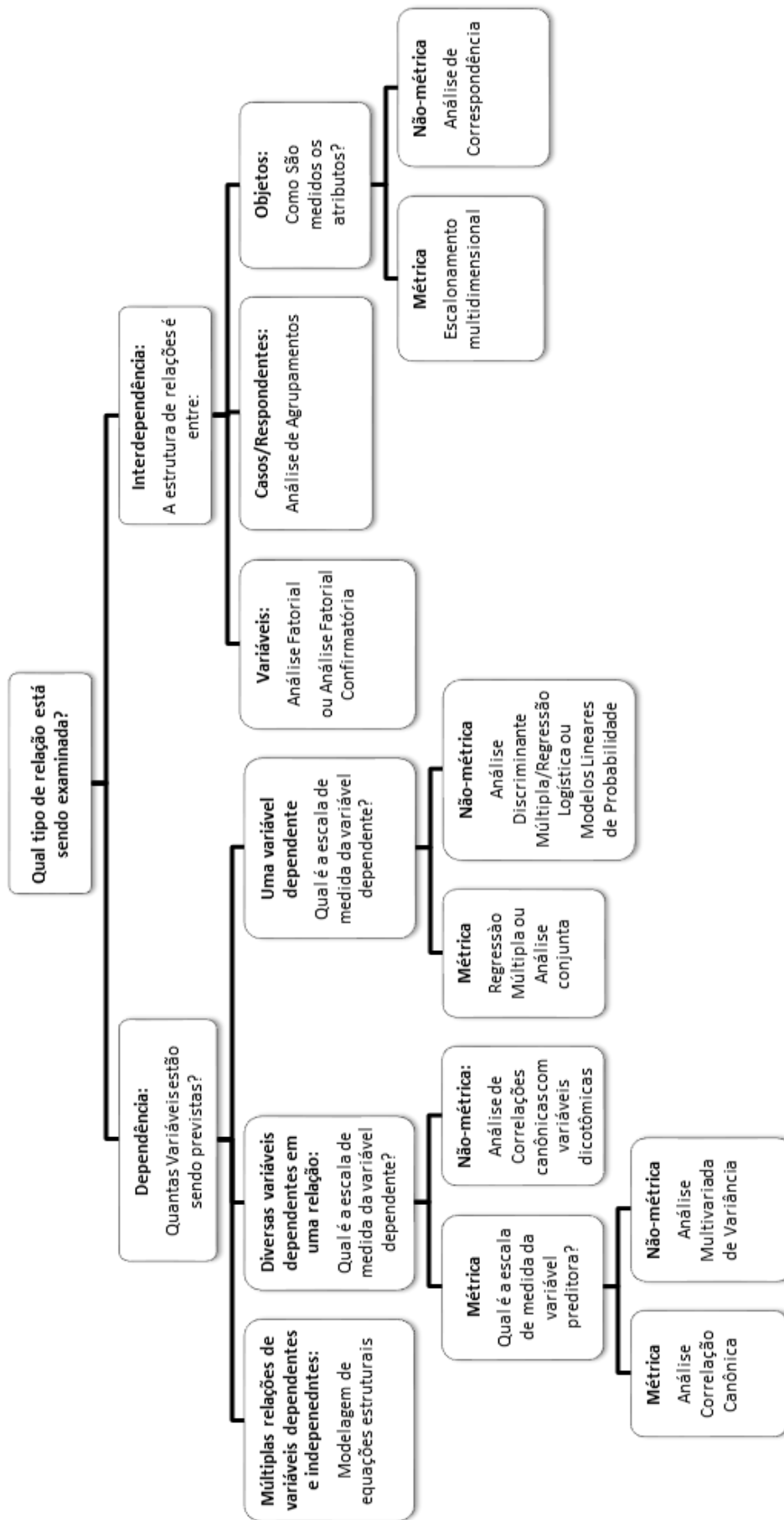


FIG 2.14 Seleção de uma técnica multivariada. (Fonte: Adaptado de Hair et al., 2009).

2.5.1. ANÁLISE FATORIAL

Segundo Gorsuch (1983) o objetivo do uso da análise fatorial é sumarizar as inter-relações (correlações) entre as variáveis de uma maneira concisa e acurada que facilite a conceituação. Este objetivo é comumente alcançado ao se incluir a máxima quantidade de informação possível das variáveis originais em poucas variáveis derivadas, ou fatores, de forma que a solução fique compreensível.

Hair et al. (2009) revelam que a análise fatorial é uma técnica de interdependência na qual todas as variáveis e suas relações com as demais são consideradas simultaneamente. Os fatores são formados de forma a maximizar seu poder de explicação do conjunto inteiro de variáveis e não para prever uma variável dependente, como fazem métodos como a regressão múltipla, análise discriminante e análise multivariada de variância ou correlação canônica.

Os autores consideram 7 estágios para elaboração de uma análise fatorial, a saber:

1. **Identificação dos Objetivos:** Resumo de Dados ou Redução de Dados. No resumo de dados o método pode ser aplicado à matriz de correlação das variáveis (análise fatorial R), resultando em um resumo das características, ou na matriz de correlação dos respondentes (análise fatorial Q), resultando na combinação ou condensação dos respondentes em grupos semelhantes. Essa última não é muito utilizada devido a dificuldades computacionais e os pesquisadores preferem a análise de agrupamentos para agrupar respondentes individuais.
2. **Planejamento:**
 - a. Cálculo dos dados de entrada (matriz de correlação): a correlação pode ser entre as variáveis ou entre os respondentes, de acordo com o objetivo escolhido.
 - b. Número de variáveis ou respondentes: O pesquisador deve minimizar o número de variáveis incluídas ao mesmo tempo que mantêm um número razoável de variáveis por fator. Deve-se incluir 5 ou mais variáveis que representem cada fator proposto.
 - c. Tamanho necessário para a amostra em termos absolutos e em função do número de variáveis: O tamanho da amostra deve ser maior ou igual a 100. Segundo os autores, o mínimo é ter pelo menos cinco vezes mais observações do que o número de variáveis a serem analisadas.

3. **Suposições:** O uso da análise fatorial deve ser justificado pelo grau de correlação entre as variáveis analisadas. Assim, se não houver um número significativo de correlações maiores do que 0,30, provavelmente a análise fatorial é inapropriada. Outras determinações de adequação são expostas pelos autores. Consultar a obra para maiores detalhes.
4. **Determinação de fatores:** decisões quanto ao método de extração dos fatores e ao número de fatores selecionados para representar a estrutura dos dados.

Os métodos de extração são dois:

- a. **Análise de fatores comuns:** Apropriada quando o objetivo principal é identificar as dimensões ou características latentes representadas nas variáveis originais e o pesquisador tem pouco conhecimento sobre a variância específica e do erro e deseja eliminar essa variância.
- b. **Análise de componentes principais:** Apropriada quando o objetivo principal é a previsão do número mínimo de fatores necessários para maximizar a explicação da variância do conjunto original de variáveis e quando um conhecimento prévio do pesquisador revela que as variâncias específicas e de erro representam uma parcela relativamente pequena da variância total.

Os critérios para escolha do número de fatores mais usados são:

- a. **Raiz latente:** É a técnica mais usada e consiste em eliminar todos os fatores com autovalores menores que 1 uma vez que cada variável contribui com um valor 1 no autovalor total e qualquer fator individual deve explicar a variância de pelo menos uma variável.
- b. **A priori:** O pesquisador determina quantos fatores extrair antes de empreender a análise fatorial.
- c. **Porcentagem da variância:** Consiste em extrair os fatores que representem a menor parte da variância, garantindo que os fatores restantes expliquem pelo menos um montante especificado da variância. Segundo os autores, é comum que nas ciências naturais o montante de explicação seja igual ou superior a 95%

enquanto nas ciências sociais, uma explicação de pelo menos 60% pode ser considerada satisfatória.

- d. **Teste *Scree*:** Determinado fazendo-se o gráfico dos autovalores em relação ao número de fatores em sua ordem de extração. O ponto em que o ângulo de inclinação decresce rapidamente e o gráfico se aproxima de uma reta horizontal representa o ponto de corte, indicando o número máximo de fatores que devem ser extraídos.

5. Interpretação dos fatores: A interpretação dos fatores resultantes e a seleção da solução final evoluem três passos.

- a. **Rotação de fatores:** A matriz fatorial inicial não-rotacionada contém cargas fatoriais que representam a correlação de cada variável com determinado fator. No entanto, algumas variáveis irão possuir correlações altas com mais fatores, o que dificulta a interpretação das informações. A rotação dos fatores tem o objetivo de reduzir esse problema, rotacionando os eixos de referência dos fatores em torno da origem até uma posição que redistribua a variância de modo a revelar quais variáveis estão mais relacionadas a cada fator de forma mais clara. Os métodos de rotação mais usados são o QUARTIMAX, VARIMAX E EQUIMAX, que realizam rotações ortogonais, isto é, mantendo o ângulo de 90 graus entre os fatores. Do lado das rotações oblíquas, os métodos mais utilizados são OBLIMIN, PROMAX, ORTHOBLIQUE, DQUART E DOBLIMIN. A seleção de um ou outro método não segue uma regra específica. O mais usado é o VARIMAX, muito mais por ser o método padrão em diversos softwares. No entanto, se o objetivo da pesquisa é obter diversos fatores teoricamente significativos, uma solução oblíqua é apropriada. Por outro lado, se o pesquisador quer reduzir um número grande de variáveis para um conjunto menor de fatores não-correlacionados para uso em posteriores técnicas estatísticas, a solução ortogonal é mais indicada.

b. Significância de cargas fatoriais:

- *Significância prática:* Cargas com valores de 0,50 ou mais são consideradas com significância prática. Como a carga é a correlação da variável com o fator, elevando-se esse valor ao quadrado tem-se a

variância total da variável explicada pelo fator. Assim, uma carga de 0,50 mostra que 25% da variância da variável é explicada pelo fator. Essa abordagem é aplicável quando o tamanho da amostra é superior a 100.

- *Significância estatística*: Como os erros-padrão de cargas fatoriais são substancialmente maiores que as correlações normais, deve-se avaliá-las em níveis mais restritos. Os autores sugerem o emprego do uso do conceito de poder, Hair et al. (2009, p. 29) e apresentam Tabela 2.1, a seguir.

TAB 2.1 Orientações para identificação de cargas fatoriais significantes com base no tamanho da amostra.

Carga Fatorial	Tamanho necessário da amostra para significância ¹⁹
0,30	350
0,35	250
0,40	200
0,45	150
0,50	120
0,55	100
0,60	85
0,65	70
0,70	60
0,75	50

Fonte: Hair et al., 2009.

- *Ajuste baseado no número de variáveis*: Os métodos acima não consideram o número de variáveis. À medida que o número de variáveis aumenta, o nível aceitável para considerar uma carga significativa torna-se menor. Além disso, quanto maior o número de fatores, as cargas devem ser maiores à medida que se seleciona os

¹⁹ A significância é baseada em um nível de 0,05 e um nível de poder de 80% e erros padrões considerados como o dobro dos coeficientes de correlação normais. Fonte: Hair et al. (2009, p. 107).

fatores, uma vez que a variância única e variância do erro começam a surgir em fatores posteriores.

c. Interpretação da matriz fatorial: Os autores sugerem que primeiro examine-se a matriz fatorial de cargas, onde cada coluna de números na matriz representa um fator. A seguir, deve-se indicar a maior carga para cada variável em qualquer fator. Caso não seja significativa (de acordo com os critérios de significância adotados) a mesma não deve ser selecionada. Repete-se esse procedimento para todas as variáveis. Avaliar ainda a existência de variáveis com diversas cargas altas em dois ou mais fatores. Essas variáveis são candidatas a uma eliminação. O próximo passo é avaliar as comunalidades, isto é, a quantia de variância explicada pela solução fatorial para cada variável, e eliminar aquelas que não possuem o nível de explicação aceitáveis para o estudo em questão. O último passo é dar nomes que expressem o significado para o padrão das cargas fatoriais. Esse nome deverá representar cada fator determinado da melhor maneira possível.

6. Validação da análise fatorial: Esse passo envolve a avaliação do grau de generalidade dos resultados para a população e a influência de respondentes individuais sobre o todo. A rara viabilidade do uso da análise fatorial confirmatória requer que os pesquisadores recorram a outros meios, como a análise de amostra repartida ou a aplicação da análise fatorial a amostras inteiramente novas.

7. Usos adicionais dos resultados: Os autores citam três métodos comumente utilizados para análises subsequentes, (1) a seleção de variáveis substitutas, (2) a computação de escores fatoriais e (3) a criação de escalas múltiplas. A primeira tem a vantagem de ser simples, pois seleciona a variável que tenha a maior carga fatorial em um fator para que seja substituta deste, mas não representam todas as informações de um fator. Os escores fatoriais têm a vantagem de representar todas as cargas variáveis do fator, mas também tornam a interpretação mais difícil, uma vez que todas as variáveis têm influência. A escala múltipla é uma conciliação entre os dois métodos anteriores, uma vez que considera mais de uma variável mas seleciona aquelas que têm uma carga fatorial mais elevada para composição do fator. No entanto, não garante a ortogonalidade da solução.

2.5.2. REGRESSÃO MÚLTIPLA

O objetivo da análise de regressão é prever ou explicar uma única variável dependente a partir de uma ou mais variáveis independentes. Quando se tem apenas uma variável independente, a regressão é chamada de simples. Quando duas ou mais variáveis independentes estão presentes, tem-se a regressão múltipla.

Segundo Hair et al. (2009), a Análise de Regressão Múltipla é de longe a técnica de dependência mais amplamente usada e versátil. Os autores indicam que o modelo é usado para relacionar um fator (ou fatores) a um resultado específico.

A relação matemática entre as variáveis independentes e a variável dependente pode ser expressa pela equação de regressão, representada pela equação 2:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_kX_k + \varepsilon \quad (2)$$

em que, Y = variável dependente.

X_k = variável independente.

B_k = coeficiente de regressão²⁰.

ε = erro, distúrbio ou ruído.

Ainda segundo os autores, as aplicações da regressão múltipla recaem em duas classes de problemas: previsão e explicação. A previsão revela a precisão com que a equação de regressão pode prever a variável dependente a partir do conjunto de variáveis independentes consideradas. A explicação examina os coeficientes de regressão (magnitude, sinal e significância estatística) de modo a explicar a influência de cada variável dependente na independente.

Segundo Doane e Seward (2008), a regressão múltipla é usada quando um modelo com uma única variável independente (preditor) não é adequado para descrever a relação entre a variável dependente (variável resposta) e seus preditores. Ainda segundo os mesmos, o objetivo do modelo é identificar se o modelo é enxuto, isto é, se considerada apenas preditores úteis. A omissão de preditores relevantes pode causar resultados equivocados.

²⁰ A variação estimada na variável dependente por variação unitária da variável dependente. O valor do coeficiente indica a extensão na qual a variável independente se associa com a dependentes (Hair et al., 2009, p. 158).

Weisberg (2014) indica que o problema de regressão começa com uma coleção de potenciais preditores (variáveis independentes). Alguns deles podem ser medidas contínuas, como a altura ou o peso de um objeto. Outras podem ser discretas, como a avaliação de saúde de um paciente em uma escala. Existe ainda a possibilidade de preditores serem variáveis categóricas, como cor dos olhos.

Aiken e West (1991) abordam os problemas comumente enfrentados por pesquisadores na utilização das técnicas de regressão, como interações entre variáveis predictoras e efeitos curvilineares. Os autores apresentam os erros comuns e soluções apresentados por vários pesquisadores.

Hair et al. (2009) definem seis estágios para a realização da regressão múltipla, que envolvem (1) definição dos objetivos, (2) planejamento da pesquisa, (3) suposições, (4) estimação do modelo e ajuste geral, (5) interpretação da variável estatística, (5) validação dos resultados. Abaixo, uma breve descrição de cada um dos estágios propostos pelos autores:

1. Identificação dos Objetivos: Previsão ou Explicação. Previsão é utilizada para identificar o quanto a variável estatística de regressão (uma ou mais variáveis independentes) pode prever a variável dependente. Já a explicação permite examinar os coeficientes de regressão para cada variável independente e seus efeitos na variável dependente. A explicação ou interpretação da variável estatística pode ser realizada por três perspectivas:

- a. Determinação da importância relativa de cada variável independente na previsão da medida dependente;
- b. Avaliação da natureza das relações entre as variáveis independentes e a variável dependente;
- c. Visão das relações entre variáveis independentes em sua previsão da medida dependente.

2. Planejamento:

- a. Tamanho da Amostra: O tamanho da amostra influencia diretamente no poder estatístico do teste de significância e na generalização do resultado. Os autores apresentam o efeito recíproco do tamanho da amostra, nível de significância e o número de variáveis independentes para um R^2 significativo. A Tabela 2.2 mostra

a relação entre o tamanho da amostra e o número de variáveis independentes para um determinado poder e nível de significância. O conhecimento dessa relação é imprescindível para o planejamento da pesquisa e definição do tamanho da amostra para atender às exigências de uma análise aceitável. Outro fator levantado pelos autores é a relação entre o tamanho da amostra e o número de variáveis independentes, cuja regra geral requer que existam pelo menos 5 observações para cada variável. O nível desejado é que haja de 15 a 20 observações para cada variável independente.

TAB 2.2 R² mínimo para ser estatisticamente significativo (Poder ou probabilidade de 0,80 e Nível de Significância de $\alpha = 0,05$.)

Tamanho da Amostra	Número de Variáveis Independentes			
	2	5	10	20
20	0,39	0,48	0,64	NA
50	0,19	0,23	0,29	0,42
100	0,10	0,12	0,15	0,21
250	0,04	0,05	0,06	0,08
500	0,03	0,04	0,05	0,09
1000	0,01	0,01	0,02	0,02

Fonte: adaptado de Hair et al., 2009.

- b. Elementos únicos da relação de dependência: as variáveis independentes devem ser consideradas métricas e ter uma relação linear com a variável dependente. No entanto, algumas transformações no modelo devem ser feitas quando da necessidade de utilização de variáveis independentes não-métricas ou quando a relação com a variável dependente for não-linear. Para o primeiro caso os autores sugerem a utilização de variáveis dicotômicas (0,1) para atuarem como variáveis substitutas das variáveis não-métricas.
 - c. Natureza das variáveis independentes: a regressão múltipla pode lidar com variáveis independentes determinísticas ou aleatórias.
- 3. Suposições:** conforme os autores, as suposições podem ser agrupadas em quatro áreas, sendo (a) Linearidade do fenômeno medido, (b) Variância constante dos termos de erro,

(c) Independência dos termos de erro e (d) Normalidade da distribuição dos termos de erro. Os autores sugerem, para a verificação do atendimento às suposições, a análise dos resíduos da variável estatística, isto é, a diferença entre os valores observados e previstos para a variável dependente. Além disso, sugerem que, além da variável estatística, também sejam feitos testes de suposições para as variáveis independentes e a dependente.

4. Estimação do Modelo e Ajuste Geral: nesta etapa o pesquisador deverá estimar o modelo de regressão e avaliar a precisão preditiva geral das variáveis independentes, selecionando uma técnica de estimação, avaliando a significância estatística e determinando se alguma das observações exerce influência indevida nos resultados.

- a. **Seleção de uma técnica:** em geral o pesquisador dispõe de um número de variáveis independentes que devem ser selecionadas para a inclusão na equação de regressão. Algumas técnicas podem ajudar na obtenção do modelo mais preciso como a Especificação Confirmatória, Métodos de busca sequencial (*stepwise*, adição *forward* e eliminação *backward*) ou Estimação combinatória. O método *stepwise* maximiza a variância explicada incremental em cada passo da construção do modelo. No primeiro passo, a mais elevada correlação parcial será adicionada, e assim sucessivamente, até que o incremento seja menor que um valor especificado.
- b. **Significância estatística:** são apresentados dois testes básicos para o exame da significância do modelo. O teste do coeficiente de determinação e o teste do coeficiente de regressão.
- c. **Observações Influentes:** a identificação de observações que estão fora dos padrões gerais do conjunto de dados ou que influenciam fortemente os resultados da regressão deve ser realizada. Os autores caracterizam três tipos básicos de observações influentes:
 - Observações atípicas (*outliers*);
 - Pontos de alavancagem; e
 - Observações Influentes.

5. Interpretação da variável estatística: deve ser interpretado o impacto de cada variável independente relativamente às demais variáveis no modelo. Os coeficientes de regressão estimados representam a relação e a força entre as variáveis independentes e a dependente. Tendo em vista o objetivo de Explicação, isto é, o foco na avaliação da natureza e impacto de cada variável independente, os coeficientes de regressão se tornam indicadores do impacto relativo e importância das variáveis independentes em sua relação com a variável dependente.

Os autores ainda sugerem técnicas para a padronização dos coeficientes de regressão, nos casos em que a variação em escala e variabilidade torna a interpretação direta problemática. Neste ponto, são introduzidos os coeficientes resultantes da análise de dados padronizados chamados de coeficientes beta (β).

Outro ponto importante a ser observado na etapa de interpretação da variável estatística é a multicolinearidade, isto é, a alta correlação entre variáveis independentes. Este efeito é indesejado para o modelo, uma vez que cria variância compartilhada entre variáveis, diminuindo assim a capacidade de prever a medida dependente, bem como de explicar a importância de cada variável independente.

6. Validação dos resultados: a validação tem o objetivo de garantir que o modelo de regressão definido represente a população geral e possa ser generalizado e que também seja apropriado aos casos em que se pretende ser usado. De um modo geral, o modelo pode ser validado aplicando-se a novas amostras ou utilizando-se a amostra existente de forma particionada.

Para a correta execução dos estágios propostos os autores ainda sugerem um processo de decisão para a análise de regressão múltipla, o que pode ser verificado por meio da Figura 2.15a e Figura 2.15b.

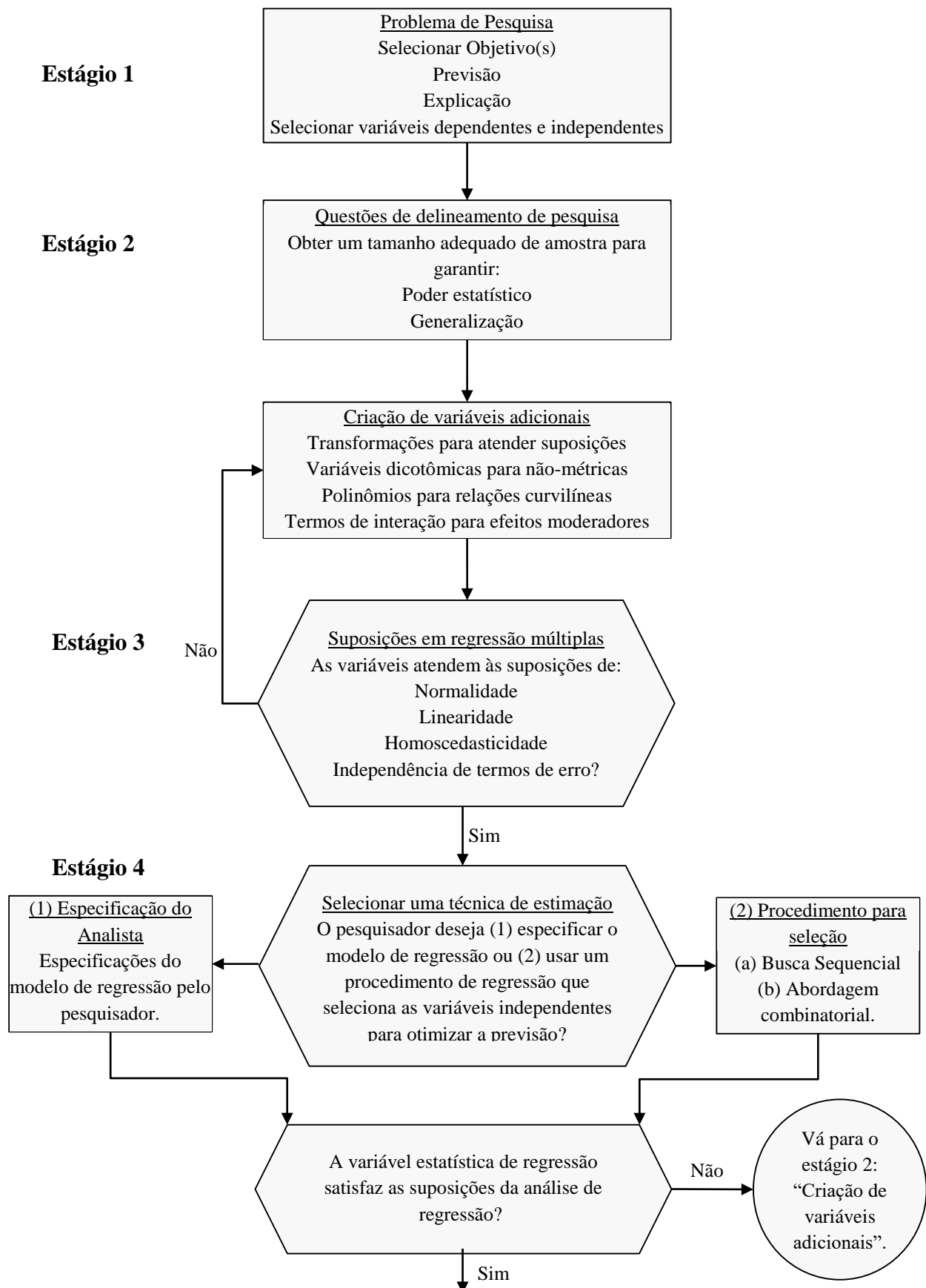


FIG 2.15a. Estágios 1-6 do diagrama de decisão da regressão múltipla. (Fonte: Adap. Hair et al., 2009)

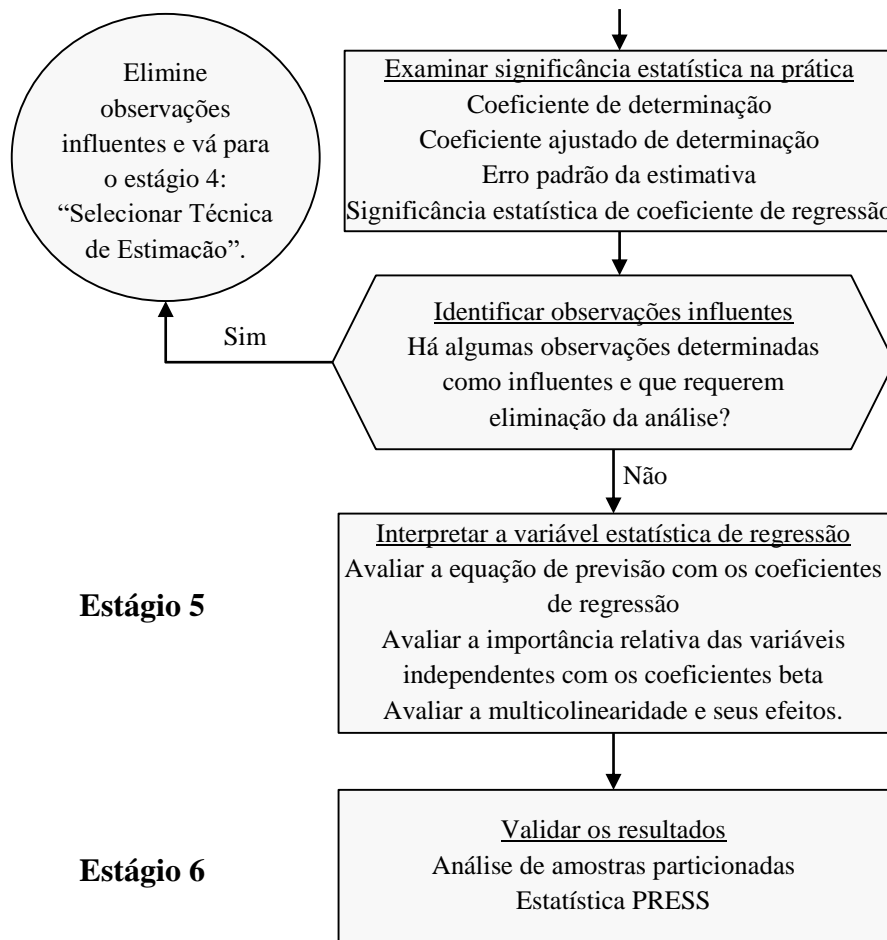


FIG 2.15b. Estágios 1-6 do diagrama de decisão da regressão múltipla. (Fonte: Adaptado de Hair et al., 2009)

3. METODOLOGIA

No presente capítulo será apresentada a metodologia utilizada neste trabalho. Para o cálculo e a análise da disponibilidade de uma frota de helicópteros e atendimento ao objetivo inicial de identificação dos fatores e causas que a influenciam é necessário o levantamento e análise de uma grande quantidade de dados, tendo em vista todos os fatores organizacionais, tecnológicos, eletromecânicos, climáticos e regulatórios que levam uma aeronave tornar-se indisponível para o voo. Para tanto, a metodologia consistirá em quatro passos, conforme Tabela 3.1:

TAB 3.1 Etapas da Metodologia

Etapa	Fonte	Período de Abrangência	Técnicas de Coleta	Técnicas de Análise/Síntese
1. Identificação e Seleção do(s) Indicador(es) de Disponibilidade	Revisão Literatura e Documentos da Empresa	~30 anos	Pesquisa Bibliográfica/ Documental	Análise Bibliográfica / Documental
2. Levantamento de dados, cálculo da Disponibilidade	Apontamentos diários da Empresa (planilhas eletrônicas)	~2 anos	Pesquisa Documental	Estatística Descritiva
3. Análise da Disponibilidade	Apontamentos diários da Empresa e Especialistas	~2 anos	-	Análise Estatística (Descritiva, Análise Fatorial, Regressão Múltipla), <i>Text Mining</i> , Análise de frequência das causas, MTBF, MTTR, IPF.
4. Proposição de soluções para aumento da disponibilidade	Análises Estatísticas Elaboradas e Especialistas	-	-	Síntese das frequências das causas e importância relativa dos coeficientes de regressão

3.1. IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DE INDICADORES DE DISPONIBILIDADE

Conforme revisão bibliográfica, não existe uma fórmula padrão internacional ou nacional para o cálculo da disponibilidade de uma frota de aeronaves. Deste modo, optou-se por utilizar a definição de disponibilidade da ABNT (1994) e ABNT (2011), que é baseada na definição da norma ISO 14.224:2006, reproduzida a seguir:

“A disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado.”

Ainda conforme a NBR 14.224:2011 (ISO 14.224:2006), a disponibilidade operacional, A_o , é dada pela Equação (3):

$$A_o = \frac{t_{MU}}{t_{MU} + t_{MD}} \quad (3)$$

em que, t_{MU} = o tempo médio operacional estimado, usando-se o tempo operacional real observado no campo;
 t_{MD} = o tempo médio não operacional estimado, usando-se os tempos reais operacional e não operacional, observados no campo.

Com base na definição, decidiu-se pela utilização dessa medida mais comum de disponibilidade que, além de facilitar o entendimento sobre o tema, permitiria ainda utilizar de forma direta e sem a necessidade de adaptações os dados produzidos por apontamentos já realizados na empresa estudada. Nesse sentido, a disponibilidade média será calculada com base na capacidade de a aeronave estar ou não disponível para efetuar um voo em um período de tempo determinado. Assim, a disponibilidade da frota será calculada, para um período determinado, pela equação 3 acima.

3.2. LEVANTAMENTO DE DADOS E CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE

O levantamento de dados para o cálculo da disponibilidade será feito por meio de análise dos documentos produzidos pela empresa estudada e seus fornecedores de transporte aéreo. Os dados estão organizados em planilhas eletrônicas semiestruturadas. Diariamente a empresa coleta informações sobre disponibilidade informada de cada aeronave para o dia seguinte, onde são apontadas as aeronaves que estarão fora devido a manutenções programadas, manutenções

corretivas, aeronaves em auditorias/inspeção, entre outros. Estes dados podem variar durante a noite ou no próximo dia, porque aeronaves disponíveis podem apresentar panes e se tornarem indisponíveis ou aeronaves indisponíveis podem ter seus problemas resolvidos durante o período noturno e ficarem disponíveis no dia seguinte. Embora possam ocorrer as variações citadas, os dados ainda assim permitem o estudo da variabilidade (ou dispersão) da disponibilidade, uma vez que a probabilidade de um ou outra situação ocorrer são independentes e aleatórios.

A informação é utilizada pela Central de Programação de Voos da empresa com a finalidade de previsão da frota disponível no próximo dia. A estrutura padrão dos dados pode ser verificada na Tabela 3.2.

TAB 3.2 Estrutura dos dados a serem analisados.

Data	Empresa	Prefixo	Modelo	Base	Disp.	Indisp.	Causa
XX/XX/XX	Empresa A	PT-XXX	Modelo Y	Aeroporto Z		✓	Causa XPTO
XX/XX/XX	Empresa B	PT-YYY	Modelo T	Aeroporto K	✓		

Descrição dos dados:

- **Data:** dia da coleta das observações.
- **Empresa:** indica o fornecedor do equipamento tripulado, responsável pela realização do transporte dos passageiros (empresa de táxi aéreo).
- **Prefixo:** conforme Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) n° 45, representa a marca de nacionalidade combinada com a marca de matrícula, determinados pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*). São identificações únicas das aeronaves em território brasileiro.
- **Modelo:** modelos das aeronaves, conforme definido pelos fabricantes.
- **Base:** aeroportos ou helipontos utilizados para o apoio *offshore*.
- **Disponível/Indisponível:** registro (*flag*) indicando a disponibilidade ou indisponibilidade da aeronave.
- **Causa:** informação não-estruturada a ser preenchida pela empresa indicando o motivo da indisponibilidade ou outra informação importante, como a realização de auditoria/inspeção.

O acompanhamento diário do estado operacional de cada modelo permite o cálculo da disponibilidade média da frota, seja ela por empresa, por modelo, por fabricante ou por qualquer

outra métrica que possa ser associada à aeronave, tendo em vista que todas elas possuem uma identificação única.

As análises estatísticas serão realizadas com o auxílio do *software IBM® SPSS® Statistics* versão 22. Em comparação com outros pacotes estatísticos, o SPSS tem a vantagem de possuir uma curva de aprendizado fácil e uma interface amigável, além da integração com o pacote estatístico *R*.

3.3. ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE

3.3.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Será realizada a análise estatística dos dados com base nas variáveis:

1. Disponibilidade de Frota (variável dependente)
2. Empresa (empresa de transporte aéreo)
3. Modelo da aeronave
4. Base de operação
5. Número de Aeronaves de Cada Modelo
6. Número de Aeronaves de Cada Empresa
7. Número de Aeronaves em Cada Base
8. Desembolso Mensal com a Aeronave (“Fixo Mensal”)
9. Idade média da frota
10. Umidade
11. Temperatura

O objetivo principal é identificar correlações entre as variáveis independentes e a disponibilidade da frota de aeronaves, identificando padrões e influências mais importantes na variabilidade da mesma.

O objetivo de inclusão da variável “Fixo Mensal” é tentar identificar a relação entre o valor contratual de remuneração da aeronave e a disponibilidade. Pretende-se verificar se as aeronaves mais “caras” possuem uma disponibilidade maior, indicando se os fornecedores escolhem as aeronaves a ficarem disponíveis em função desta variável. Caso seja comprovado, isto permitirá o estudo de algumas soluções contratuais para impedir tal prática e reduzir o custo

de operação da frota. A inclusão das variáveis Umidade e Temperatura tem o objetivo de verificar a influência dessas duas medidas externas na Disponibilidade. Já a variável Idade Média da Frota tem o objetivo de mostrar a relação entre o envelhecimento da frota e a disponibilidade.

Conforme abordado na revisão bibliográfica, será utilizada a técnica de Regressão Múltipla para a explicação dos principais fatores de indisponibilidade e outras conclusões sobre os caminhos mais promissores para a redução da mesma.

A regressão múltipla apresenta-se como a técnica mais apropriada tendo em vista que a variável dependente sendo estudada é métrica, enquanto as variáveis preditoras são métricas e não-métricas (categóricas). Embora a Análise Fatorial tenha sido introduzida na revisão de bibliográfica e alguns testes com os dados tenham sido realizados com o uso da técnica, ela se mostrou inadequada tendo em vista os objetivos do trabalho de avaliar a relação de dependência entre variáveis e não a avaliação de interdependência entre as mesmas, conforme explanado nas seções 2.5.1 e 2.5.2.

A Regressão Logística também apareceu como uma técnica possível de ser utilizada, tendo em vista o caráter dicotômico da variável dependente (0, 1). Porém, transformações de variáveis serão utilizadas para adequação do modelo ao uso da regressão múltipla, tendo em vista o objetivo inicial de verificar os fatores que possuem maior importância relativa na predição da variável independente e não o cálculo da probabilidade, como prevê a Regressão Logística.

O objetivo da análise de regressão múltipla será a explicação sobre a dependência da variável disponibilidade em relação a outras variáveis de estudo, examinando-se os coeficientes de regressão (sua magnitude, sinal e significância estatística) para cada variável independente. A finalidade é tentar desenvolver uma razão teórica para os efeitos das variáveis independentes sobre a variável dependente.

Tendo em vista a técnica de regressão múltipla ser uma técnica de dependência, deve-se especificar qual variável é dependente e quais são as independentes. Para a escolha das variáveis, deve-se observar três pontos importantes, conforme disposto por Hair et al. (2009): teoria forte, erro de medida e erro de especificação. Esta e outras etapas serão realizadas conforme definido pelos autores e apresentado na seção 2.5.2 da revisão bibliográfica.

3.3.2. ANÁLISE DAS CAUSAS DE INDISPONIBILIDADE

Conforme descrito na etapa anterior, para cada estado de indisponibilidade de uma aeronave em um determinado dia, a empresa identifica qual a causa aparente. Essa informação é registrada de forma não estruturada pelos diversos fornecedores de transporte aéreo e é consolidada pela empresa. A não exigência de uma estrutura padrão e a não uniformização dos termos utilizados, abreviações, idioma, pontuação, etc., levou a uma proliferação de causas descritas das mais variadas formas. Deste modo, será necessário o tratamento da informação de forma manual e, em alguns momentos, automatizada. Para tanto, serão utilizadas técnicas de Mineração de Texto.

Como forma de se identificar e corrigir duplicidades, ambiguidades, abreviações incorretas, dentre outros problemas de registro, optou-se pelo tratamento manual, uma vez que a definição de um algoritmo ou utilização de *software* que automatizasse o tratamento levaria um tempo maior, dada a quantidade de variações possíveis e à especificidade exigida por cada tratamento.

Após o primeiro tratamento dos dados de forma manual, os motivos serão tratados por meio de ferramentas de mineração de texto (*text mining*). O objetivo da mineração de texto é processar informação textual não estruturada ou semiestruturada, extrair índices numéricos significativos a partir do texto, e, assim, tornar a informação contida no texto acessível para os vários algoritmos de mineração de dados e análises estatísticas.

A mineração de texto será feita utilizando-se o software *RapidMiner® Studio Starter Edition 5.3*, cujas etapas utilizadas serão: pré-processamento, por meio da geração de símbolos (*tokenization*), filtragem (eliminação de preposições, artigos, conjunções ou palavras sem significado) e a transformação de combinações de palavras (*n-gram*). Por último, tem-se o processamento propriamente dito, cuja principal atividade será a contagem de ocorrências de termos iguais ou equivalentes.

Mesmo após o tratamento manual e a mineração de texto, serão necessárias entrevistas com os especialistas da empresa para categorização e tratamento final dos dados, dada a utilização de termos técnicos e específicos do mercado de helicópteros além da constante utilização de termos e substantivos em língua estrangeira sem existência do termo correspondente em língua portuguesa, por se tratarem de substantivos e neologismos criados pela indústria aeronáutica.

Além do estudo das causas individuais relatadas, realizar-se-á uma breve análise dos efeitos da padronização da frota nos indicadores-chave de manutenção MTBF e MTTR.

3.4. PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA DISPONIBILIDADE

A proposição de soluções para o aumento da disponibilidade será baseada na síntese das análises realizadas nos passos anteriores. Pretende-se identificar os principais fatores que levam à indisponibilidade e as causas mais frequentes. Os resultados da Análise de Regressão Múltipla, em especial os coeficientes de regressão padronizados, indicarão o foco a ser seguido para o aumento da disponibilidade. Além disso, será apresentada a síntese dos resultados da mineração de texto e estudo de frequências das causas apontadas, revelando as oportunidades de melhoria.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Assim como definido na metodologia, os resultados das etapas 2, 3 e 4, conforme descritos nas seções 3.2, 3.3 e 3.4, serão apresentados a seguir.

4.1. LEVANTAMENTO DE DADOS E CÁLCULO DA DISPONIBILIDADE

O levantamento dos dados foi realizado por um período de cerca de 2 anos. Conforme descrito na metodologia, para cada dia de operação, foram levantados as aeronaves disponíveis e indisponíveis e os motivos de sua indisponibilidade. A disponibilidade diária apresenta apenas dois valores possíveis (disponível ou indisponível). Esta medida visa simplificar a análise, tendo em vista que a disponibilidade diária pode alterar ao longo do dia em função de manutenções não previstas no dia anterior, conclusões de manutenções antes da data prevista, dentre outros fatores.

O tratamento de observações atípicas/discrepantes foi realizado com a utilização do software SPSS®, conforme descrito na metodologia. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os gráficos de caixa (*Boxplot*) das observações da disponibilidade da frota total e de um dos modelos avaliados. As observações atípicas são identificadas pelos círculos numerados. A análise foi realizada para cada variável analisada, pelo método de detecção univariada. As observações atípicas foram retiradas da amostra para a análise dos dados.

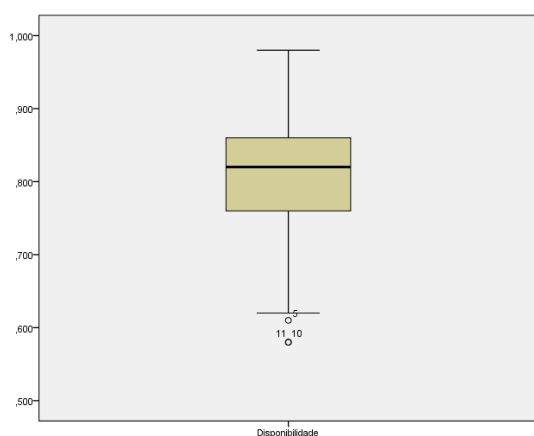


FIG 4.1 *Boxplot* das observações da frota total.

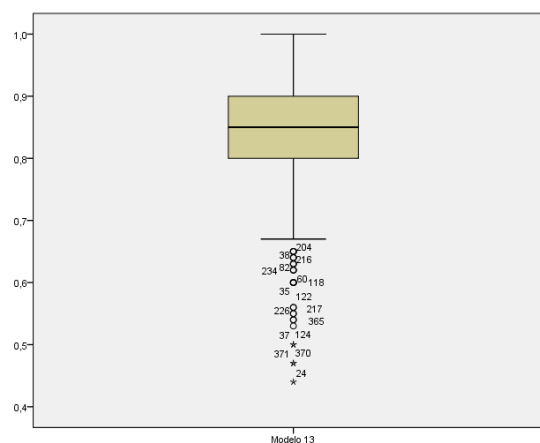


FIG 4.2 *Boxplot* das observações da frota do modelo 13.

Os dados levantados representam a operação de 156²¹ diferentes aeronaves, de 13 diferentes modelos, operadas por 5 empresas em 10 bases de apoio (aeroportos ou helipontos)

²¹ A frota diária média no período foi de 103 aeronaves. No entanto, aeronaves foram substituídas ao longo do período de análise em função de encerramento de contratos, problemas operacionais, alienação, obsolescência, etc.

por um período de cerca de 2 anos. Este conjunto de dados representa uma amostra composta de cerca de 77.000 observações. Na Tabela 4.1 é apresentada a média de disponibilidade por empresa e modelo e a média geral da frota.

TAB 4.1 Quadro Geral da Disponibilidade Média (Empresa x Modelo)

	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Média
Modelo 1					24%	24,3%
Modelo 2				30%	12%	14,9%
Modelo 3	72%			78%	64%	71,6%
Modelo 4			76%			76,3%
Modelo 5				86%		86,0%
Modelo 6				87%		87,3%
Modelo 7	78%	70%		84%		72,6%
Modelo 8			87%			87,0%
Modelo 9		78%				77,6%
Modelo 10			55%			55,2%
Modelo 11		83%	81%		42%	75,5%
Modelo 12		81%	86%	86%		85,0%
Modelo 13		86%	80%	93%		84,4%
Média	74,7%	81,0%	83,5%	83,7%	43,5%	78,49%

Pela Tabela 4.1 verifica-se que a disponibilidade total da frota no período analisado foi de cerca de 78,49%. A Figura 4.3 revela o comportamento da disponibilidade geral da frota durante todo o período de análise. A média do período, de 78,49%, apresenta um desvio padrão de 5,2%.

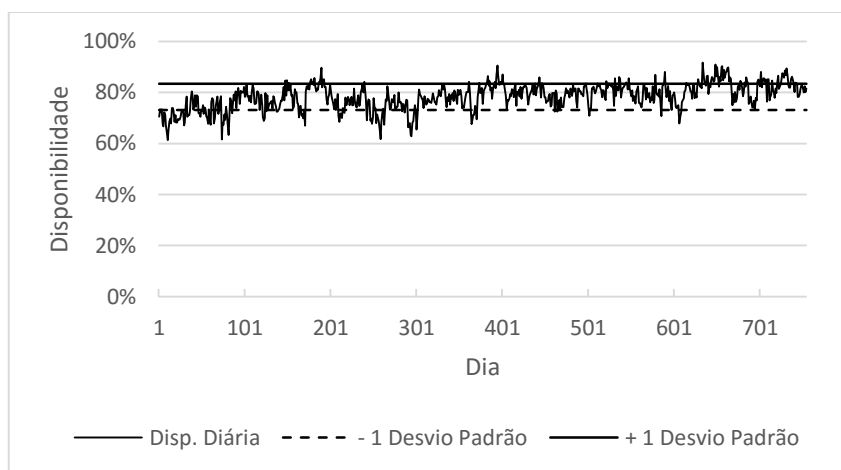


FIG 4.3 Disponibilidade geral da frota no tempo.

Os dados observados da disponibilidade média da frota apresentam a distribuição da Figura 4.4. Os testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk, conforme Tabela 4.2, indicaram a não normalidade da distribuição, uma vez que o valor-p (“sig”) calculado foi menor do que o

nível de significância utilizado para o teste (5%), ou seja, o teste foi significativo, o que nos leva a rejeitar a hipótese de que a distribuição é de Moivre-Laplace-Gauss (normal). No entanto, é preciso avaliar melhor o resultado, uma vez estes testes citados são muito sensíveis para amostras grandes, devendo-se proceder à análise gráfica e outros testes estatísticos.

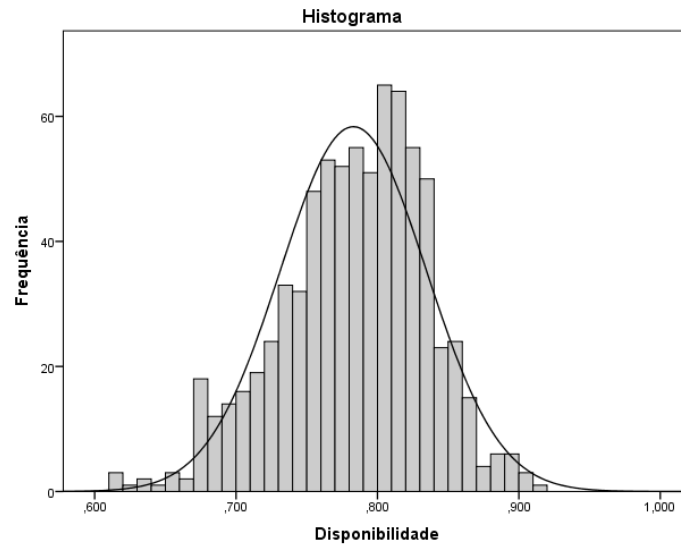


FIG 4.4 Distribuição de frequências da disponibilidade diária da frota.

TAB 4.2 Testes de Normalidade.

	Kolmogorov-Smirnov ^a		Shapiro-Wilk	
	Estatística	df	Estatística	df
Disponibilidade	0,051	755	0,987	755

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Conforme Hair et al. (2009), um teste com base na assimetria e curtose da distribuição também pode ajudar o pesquisador a definir a influência de uma distribuição não-normal em relação ao tamanho da amostra. Segundo os autores, para amostras acima de 200 observações, os efeitos da não-normalidade total são reduzidos. Deste modo, os autores apresentam os testes das equações abaixo:

$$Z_{assimetria} = \frac{assimetria}{\sqrt{\frac{6}{N}}} \quad Z_{curtose} = \frac{curtose}{\sqrt{\frac{24}{N}}} \quad (4)$$

em que, N = tamanho da amostra.

Se o valor z calculado exceder o valor crítico especificado, então a distribuição é não normal. O valor crítico de uma distribuição z, baseado no nível de significância de erro de 0,05

é $\pm 1,96$. Deste modo, calculando-se os valores z , com base na assimetria e curtose apresentados na Tabela 4.3, tem-se:

$$z_{assimetria} = \frac{-0,414}{\sqrt{\frac{6}{755}}} = -4,644 \quad z_{curtose} = \frac{0,116}{\sqrt{\frac{24}{755}}} = 0,651$$

Verifica-se que a distribuição, também por estes testes, é não-normal em termos da assimetria, uma vez que essa métrica excedeu o valor crítico especificado ($-4,644 < -1,96$).

Pode-se observar na Figura 4.4 um descolamento da distribuição normal para as frequências de 80%, 81%, 82% e 83% de disponibilidade. Esse efeito pode ser também verificado nos valores de assimetria da distribuição, conforme Tabela 4.3, em que o valor negativo denota uma distribuição deslocada para a direita.

A distribuição não-normal prejudica a utilização de técnicas multivariadas como a Regressão Múltipla ou Análise Fatorial, uma vez que esta suposição é condição fundamental para as mesmas, conforme descrito na seção 2.5 da revisão de literatura. Este tema será tratado e discutido mais à frente no trabalho.

TAB 4.3 Estatísticas descritivas da métrica de Disponibilidade da frota.

Métrica		Estatística
Média		0,78292
95% Intervalo de Confiança para Média	Limite inferior	0,77924
	Limite superior	0,78661
Desvio Padrão		0,05164
Mínimo		0,614
Máximo		0,917
Assimetria		-0,414
Curtose		0,116

A não normalidade da distribuição da medida de disponibilidade da frota nos leva a levantar algumas perguntas sobre os motivos pelos quais a frequência das observações apresenta uma concentração maior entre 80% e 83% de disponibilidade, faixa em que pode ser verificado um descolamento maior da distribuição normal teórica elaborada com base na média e desvio padrão do conjunto de dados.

Em busca de uma explicação para esse comportamento, foram analisados os contratos e padrões de operação. No entanto, não foi encontrada nenhuma evidência da existência de

obrigações quanto à manutenção da disponibilidade em um patamar mínimo, por exemplo, de 80%. De acordo com entrevistas realizadas com colaboradores da empresa, cláusulas com mínimo de disponibilidade não são utilizadas devido ao fator segurança ser preponderante na aviação de um modo geral. Em outras palavras, acredita-se que a exigência de mínimos de disponibilidade poderia influenciar as empresas prestadoras de serviço, por meio de seus gestores, a tomarem decisões forçadas para manter aeronaves disponíveis com o objetivo de atingimento de metas comerciais, em detrimento da segurança operacional.

Embora existam diversos modelos de aeronaves operadas por várias empresas em diferentes bases, a maior parte da operação da frota é concentrada em poucos modelos e poucas empresas e em um número de bases reduzido. A Tabela 4.4 e as figuras complementares 4.5, 4.6 e 4.7.

TAB 4.4 Representatividade de cada modelo e empresa na amostra.

Rótulos de Linha	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4	Empresa 5	Total
Modelo 1					0,76%	0,76%
Modelo 2				0,38%	1,83%	2,20%
Modelo 3	1,93%			4,90%	3,91%	10,74%
Modelo 4			0,97%			0,97%
Modelo 5				0,98%		0,98%
Modelo 6				4,32%		4,32%
Modelo 7	1,43%	4,35%		0,56%		6,34%
Modelo 8			0,99%			0,99%
Modelo 9		0,80%				0,80%
Modelo 10						0,04%
Modelo 11		7,80%	11,33%		3,67%	22,80%
Modelo 12		8,14%	19,85%	4,71%		32,69%
Modelo 13		7,13%	7,03%	2,20%		16,36%
Total	3,36%	28,22%	40,21%	18,05%	10,17%	100,00%

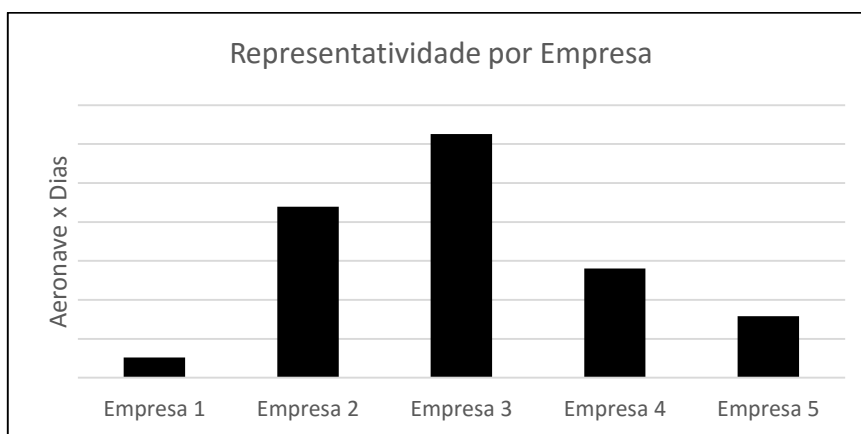


FIG 4.5 Número de dias x aeronaves em operação por empresa.

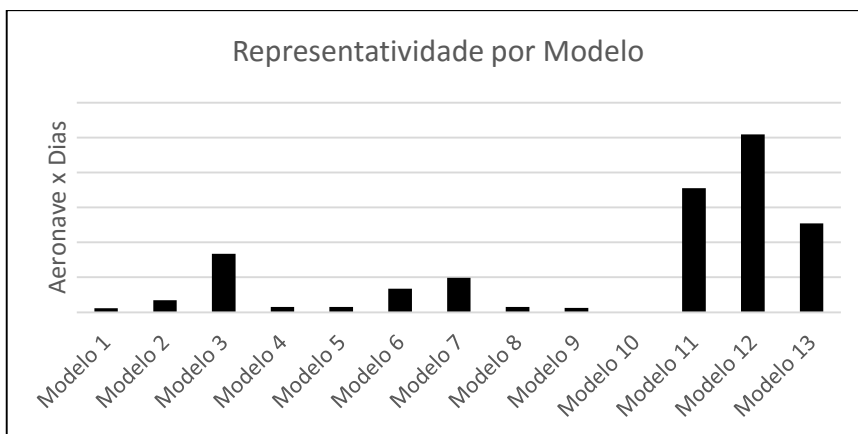


FIG 4.6 Número de dias x aeronaves em operação por modelo.

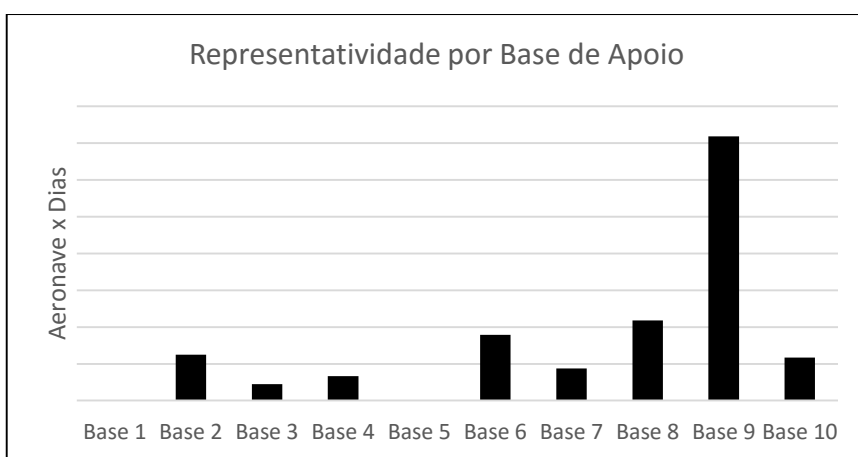


FIG 4.7 Número de dias x aeronaves em operação por base de apoio.

Tendo em vista a maior representatividade das empresas 2, 3 e 4, dos modelos 3, 11, 12 e 13, e das bases 6, 8 e 9, para uma maior precisão e simplificação do modelo, serão estudados apenas as observações deste conjunto de dados.

Deste modo, é apresentada a disponibilidade média diária avaliada ao longo de todo o período de análise das empresas 2, 3 e 4, conforme figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

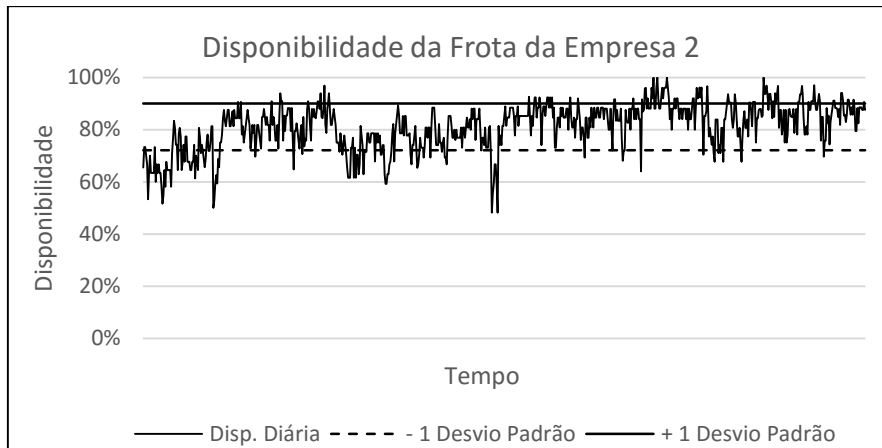


FIG 4.8 Disponibilidade diária da frota da Empresa 2.

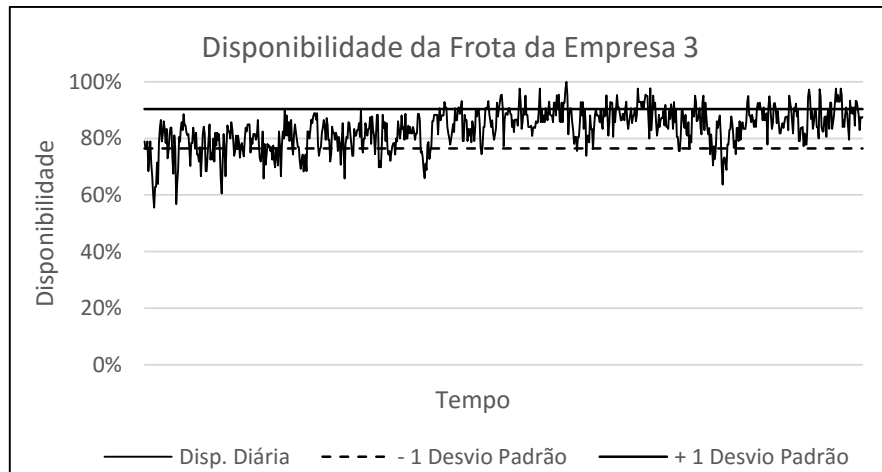


FIG 4.9 Disponibilidade diária da frota da Empresa 3.

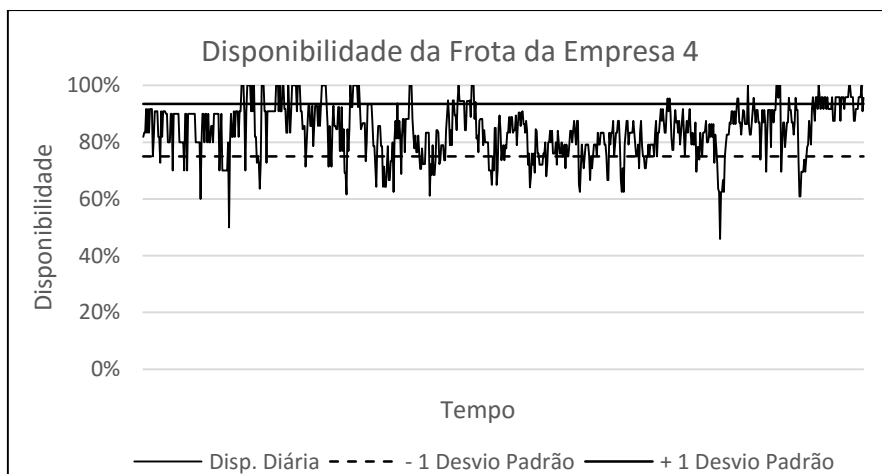


FIG 4.10 Disponibilidade diária da frota da Empresa 4.

A partir da análise dos gráficos percebe-se a menor variabilidade da disponibilidade da frota da empresa 3, a qual, apresentou um desvio padrão de 7%, contra 9% e 9,3% das empresas 2 e 4, respectivamente. Para a programação de voos, quanto maior a previsibilidade da frota disponível melhor, uma vez que permite uma programação com menos alterações de última hora e menos atrasos nos voos.

Os modelos 3, 11, 12 e 13, pela sua maior representatividade da frota também permitem uma análise mais detalhada do comportamento da disponibilidade ao longo do período estudado. As figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 revelam a disponibilidade média diária da frota destes modelos durante todo o período analisado.

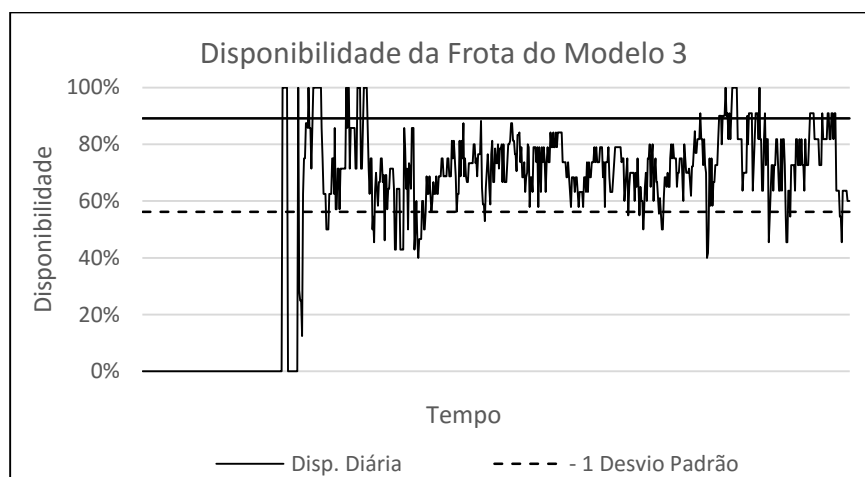


FIG 4.11 Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 3.

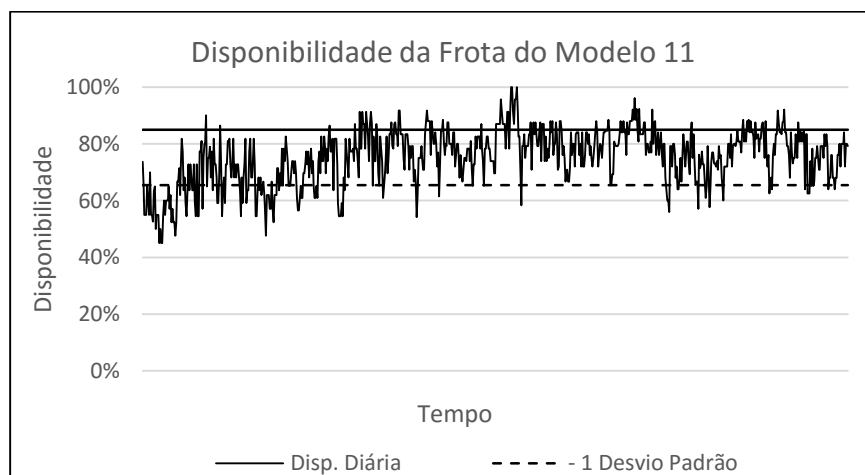


FIG 4.12 Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 11.

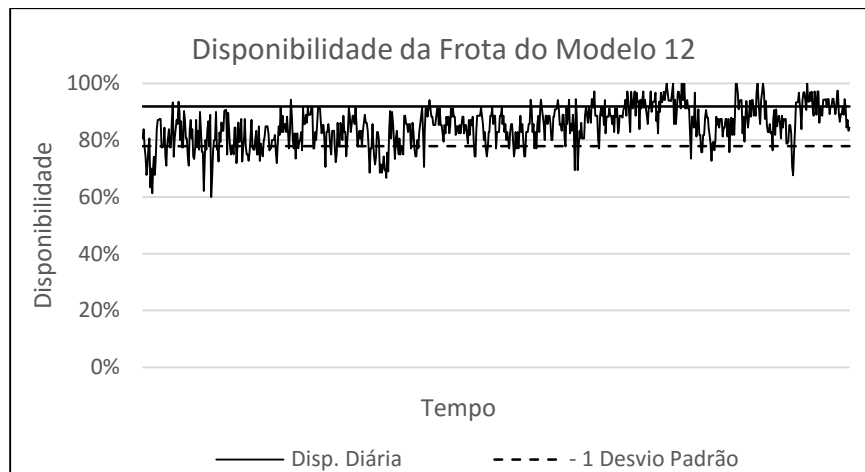


FIG 4.13 Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 12.

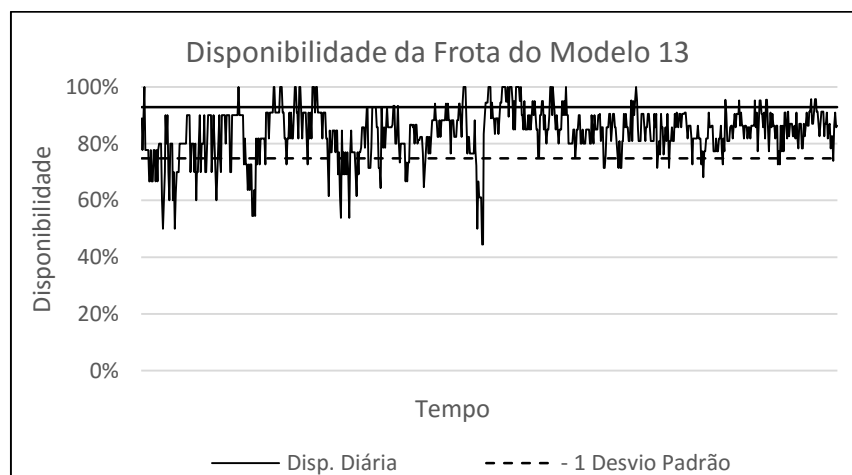


FIG 4.14 Disponibilidade diária da frota da frota do Modelo 13.

Os modelos 3 e 11, 12 e 13 apresentaram desvios-padrão de 16,5%, 9,8%, 7% e 9%, respectivamente. O primeiro apresenta um período inicial de indisponibilidade na frota, o que foi resultado da paralisação de toda a frota para averiguação de um problema estrutural na aeronave. O modelo, considerado de última geração, iniciou operação comercial em 2003. O segundo, um projeto maduro, introduzido em 1976, apresenta um período inicial de maior variabilidade, tendo estabilizado na segunda metade do período analisado.

Os lançamentos de novos modelos, embora sejam precedidos de extensos testes e aprovações pelas agências reguladoras internacionais, costumam apresentar problemas intrínsecos como falta de disponibilidade de peças, maior tempo de manutenção devido a curva de aprendizado, entre outros. Um exemplo recente no campo da aviação comercial de asa fixa foi a introdução do *Boeing 787 Dreamliner*, em 2011. O modelo, considerado um sucesso comercial e operacional, apresentou diversos problemas em seu lançamento, relacionados à

construção das baterias²², medição de combustível e trincas nos para-brisas. Outro exemplo é o V22 Osprey, “tilt rotor” apresentado na seção 2.2, que por se basear uma tecnologia complexa e ainda não totalmente dominada, apresentou diversos problemas em sua operação²³.

Do ponto de vista das bases de operação (aeroportos e helipontos), a disponibilidade da frota operando nas bases 6, 8 e 9 é apresentada a seguir nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17.

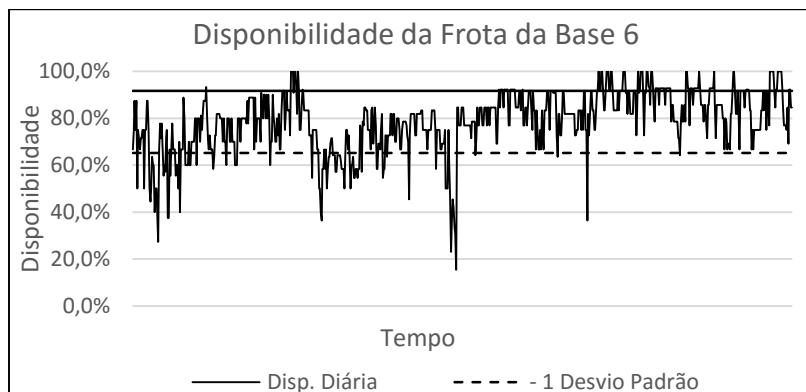


FIG 4.15 Disponibilidade diária da frota da frota da Base 6.

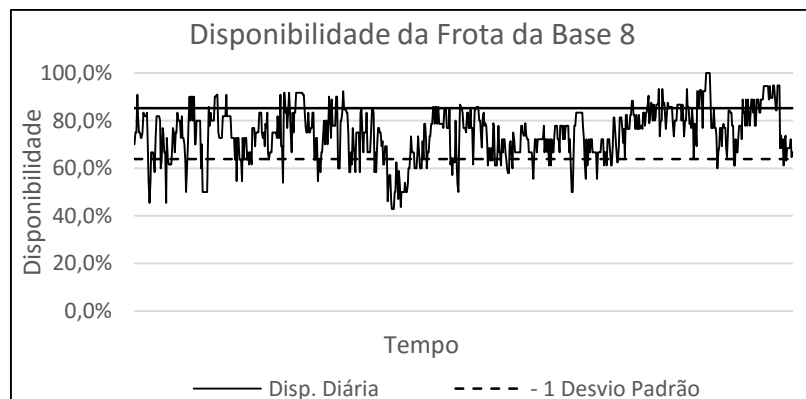


FIG 4.16 Disponibilidade diária da frota da frota da Base 8.

²² https://www.faa.gov/news/press_releases/news_story.cfm?newsId=14233. Acesso em 31/05/2015.

²³ <http://www.history.navy.mil/research/library/online-reading-room/title-list-alphabetically/v/v-22-osprey-tilt-rotor-aircraft.html#no>. Acesso em 31/05/2015.

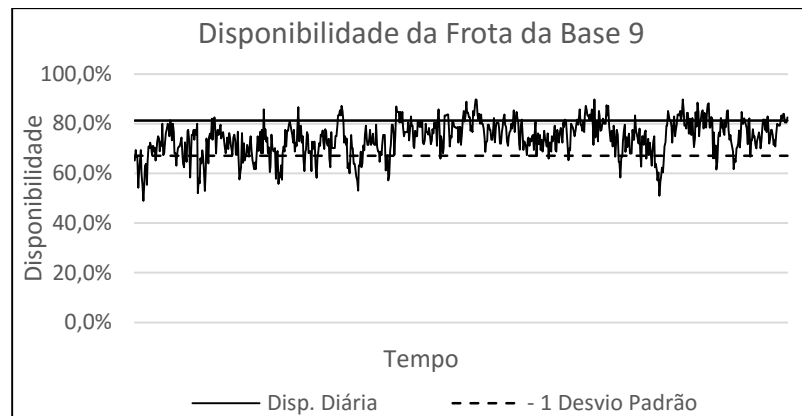


FIG 4.17 Disponibilidade diária da frota da frota da Base 9.

Conforme verificado no estudo de campo, as variações na disponibilidade das frotas nas bases podem ser influenciadas pelo deslocamento das aeronaves entre as bases. Embora a Base 9 apresente a menor variabilidade, com um desvio padrão de 7,1%, contra 13,2% e 10,7% das bases 6 e 8, respectivamente, a mesma é a que concentra o maior número de aeronaves e abriga alguns centros de manutenção das empresas analisadas.

Deste modo, aeronaves que se apresentam indisponíveis podem ser deslocadas temporariamente ou definitivamente entre as bases, prejudicando a análise por esta ótica. Este efeito, portanto, deverá ser isolado nos estudos da disponibilidade de forma a não deturpar os resultados da variabilidade das medições em uma determinada base.

Com base na seleção amostral apenas das ocorrências das empresas 2, 3 e 4, dos modelos 3, 11, 12 e 13 e das bases 6, 8 e 9, conforme descrito nos parágrafos anteriores, tem-se a disponibilidade da frota selecionada, apresentada na Figura 4.18.

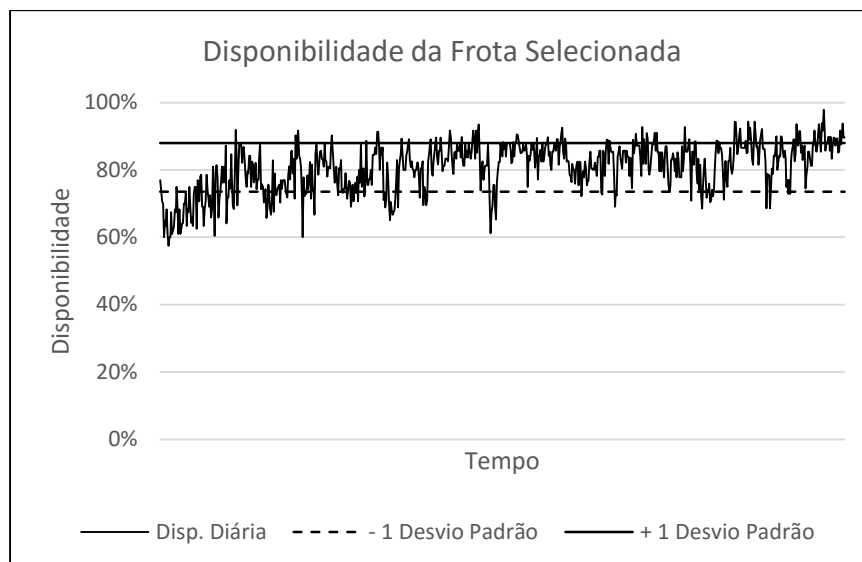


FIG 4.18 Disponibilidade da frota seleccionada (Empresas 2, 3 e 4, Modelos 3, 11, 12 e 13 e Bases 6, 8, 9).

A análise dos dados da frota seleccionada corroborou a não normalidade da distribuição, como pode ser verificado graficamente na Figura 4.19, e nos testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk da Tabela 4.5, que rejeitaram a hipótese de normalidade, e na assimetria da distribuição, conforme Tabela 4.6.

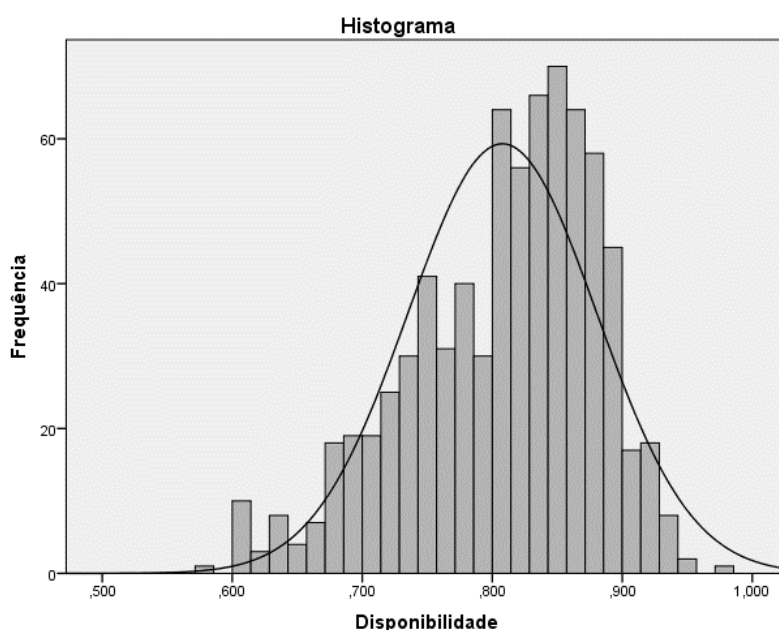


FIG 4.19 Frequências da disponibilidade diária da frota seleccionada.

TAB 4.5 Testes de normalidade.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadística	df	Sig.	Estadística	df	Sig.
Disponibilidade	0,088	755	0,000	,965	755	0,000

a. Correlação de Significância de Lilliefors

TAB 4.6 Assimetria e Curtose das observações.

Assimetria	-0,646
Curtose	-0,024

O não atendimento da suposição de normalidade da distribuição das observações levou à necessidade de maior estudo da distribuição e das técnicas multivariadas previstas para serem utilizadas.

Como o tamanho da amostra considerado é grande, o poder estatístico é elevado, por meio da redução do erro de amostragem. Para tamanhos de amostras com 200 ou mais observações os efeitos da não normalidade podem ser negligenciados, observando-se a forma da distribuição (Hair et al., 2009). No entanto, transformações de variáveis serão testadas na etapa de análise estatística na próxima seção, como forma de reduzir ou eliminar a distorção da distribuição em relação à normal.

4.2. ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE

4.2.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA - REGRESSÃO MÚLTIPLA

4.2.1.1. IDENTIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

O objetivo da análise de Regressão Múltipla proposta, conforme metodologia, é examinar os coeficientes de regressão para cada variável independente e seus efeitos na variável dependente. Deste modo, tendo em vista o objetivo de pesquisa proposto para o presente trabalho, a análise de regressão terá o objetivo de explicar a relação entre a variável dependente “Disponibilidade” e as variáveis independentes disponibilidade do Modelo_i (i = 3, 11, 12 e 13), disponibilidade da Empresa_j (j = 2, 3 e 4), Umidade, Temperatura, Idade Média da Frota e valor contratual para o “Fixo Mensal”, totalizando 11 variáveis independentes.

Conforme já mencionado anteriormente, e após uma análise mais aprofundada do “modus operandi” da empresa, verificou-se que as aeronaves são constantemente alteradas de base em função de sua indisponibilidade. Este fato ocorre pelas empresas focarem sua manutenção, preferencialmente em poucas bases, tanto pela carência de infraestrutura em alguns aeroportos quanto pela necessidade de ganhos de escala em manutenção, mão-de-obra e estoque de peças. Assim, quando uma aeronave fica indisponível, ela pode ser transladada para a base em que a empresa prestadora de serviços possui seu centro de manutenção. Este fato

prejudica a análise estatística, tornando a variável $Base_k$ mais correlacionada à variável Disponibilidade do que realmente é. Em função disto, optou-se pela realização da análise com a exclusão das variáveis $Base_k$ ($k = 6, 8$ e 9) de forma a tornar mais clara a importância dos outros preditores estudados.

A explicação da variável estatística será realizada pela perspectiva da determinação da importância relativa de cada variável independente na previsão da medida dependente.

4.2.1.2. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Conforme revisão de literatura, o tamanho da amostra influencia diretamente no poder estatístico do teste de significância e na generalização do resultado. Como exemplo, o R^2 mínimo para amostras de 500 observações e 20 variáveis independentes é de 0,09, conforme Tabela 2.2. Em nosso exemplo, temos cerca de 750 observações e 11 variáveis independentes, o que exigiria um R^2 mínimo relativamente baixo (menor que 0,09) para ser estatisticamente significativo.

Tendo em vista a não-normalidade dos dados, uma transformação dos dados pode ser utilizada para a correção de violações desta suposição estatística exigida pelas técnicas multivariadas e para melhorar a correlação entre variáveis.

Segundo Hair et al. (2009), geralmente as distribuições negativamente assimétricas (deslocadas para a direita) são melhor transformadas empregando-se o quadrado ou o cubo, enquanto o logaritmo ou a raiz quadrada normalmente funcionam melhor em assimetrias positivas (deslocada para a esquerda). Ainda segundo os autores, os pesquisadores devem proceder muitas vezes por tentativa e erro, monitorando as melhorias versus a necessidade de transformações adicionais.

Para as observações estudadas e tendo em vista a assimetria negativa da distribuição, foram realizadas 3 transformações: quadrado, cubo e raiz quadrada. Os resultados podem ser verificados na Figura 4.20.

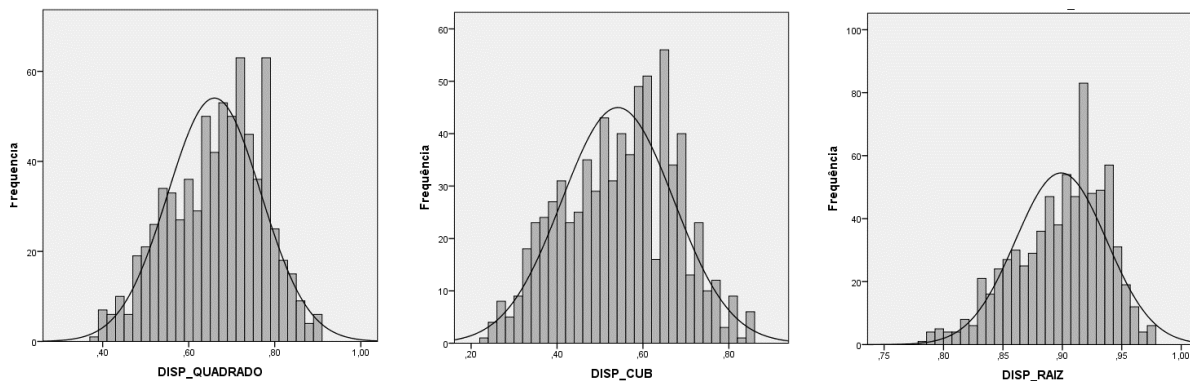


FIG 4.20 Transformações da variável dependente Disponibilidade.

Observando a tabela Tabela 4.7 verifica-se que a transformação cúbica foi a que melhor aproximou a curva da normal, reduzindo a assimetria, embora tenha elevado a curtose (elevação da distribuição se comparada à normal - leptocúrtica).

TAB 4.7 Assimetria e Curtose das distribuições transformadas.

Métrica	DISP_QUADRADO	DISP_CUB	DISP_RAIZ
Assimetria	-0,299	-0,121	-0,571
Curtose	-0,531	-0,653	-0,237

Realizando-se os testes propostos por Hair et al. (2009), verifica-se que a assimetria passou a se enquadrar dentro do limite considerado normal, enquanto a curtose apresenta-se superior ao limite crítico, sendo não-normal para esta variável. No entanto, a aderência geral da distribuição à normal aumentou. Os testes podem ser verificados a seguir:

$$z_{assimetria} = \frac{-0,121}{\sqrt{\frac{6}{735}}} = -1,339 > -1,96 \quad z_{curtose} = \frac{-0,653}{\sqrt{\frac{24}{735}}} = -3,614 < -1,96$$

4.2.1.3. SUPOSIÇÕES

- (a) **Linearidade do fenômeno medido:** o conceito de correlação é baseado em uma relação linear. A Figura 4.21 apresenta a matriz com os diagramas de dispersão para as variáveis estudadas, que é uma forma simples e rápida de identificação de relações não lineares. A análise dos gráficos não indicou relações curvilíneas ou outras relações não lineares entre as variáveis.

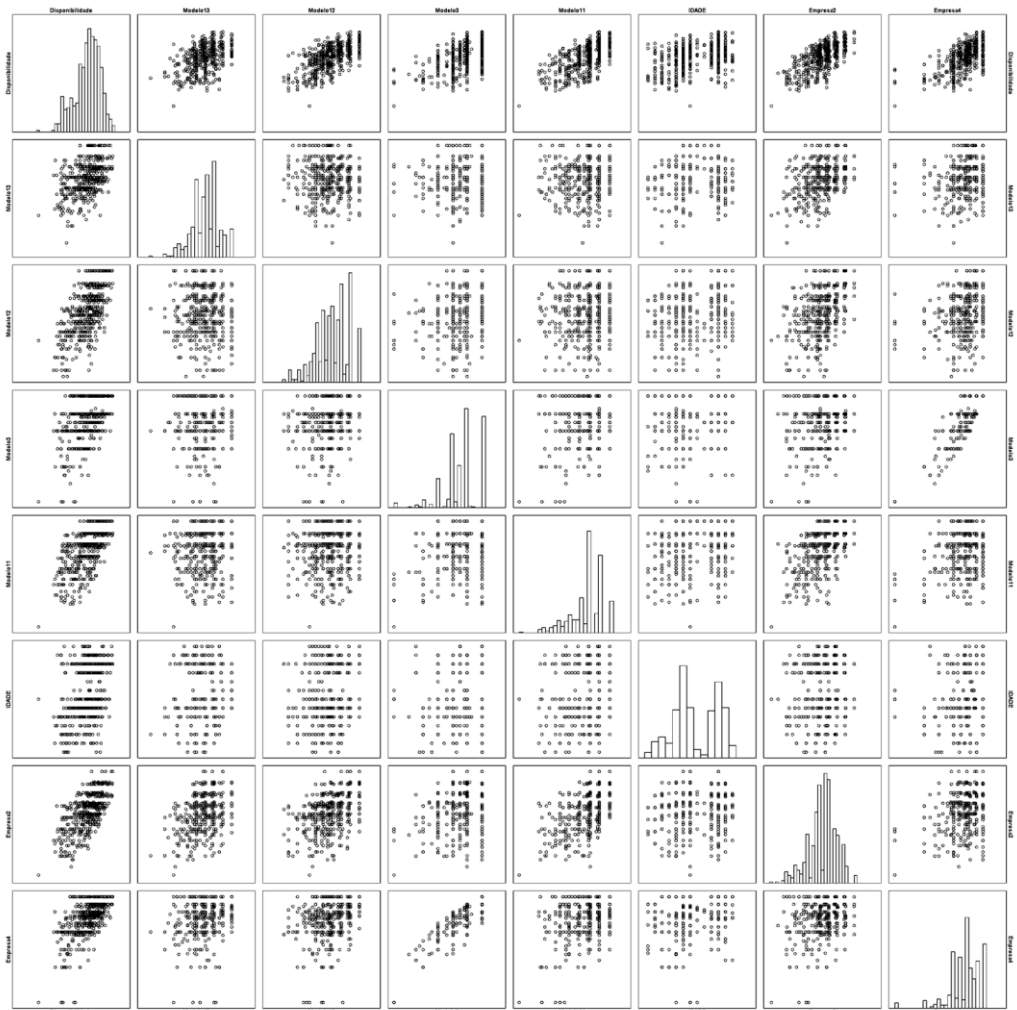


FIG 4.21 Diagrama de dispersão para as variáveis estudadas.

- (b) **Variância constante dos termos de erro:** conforme observado nos gráficos de correlação da Figura 4.21, não se identificou relações heterocedástica em níveis preocupantes, isto é, que apresentam nível diferente de variância ao longo do domínio das variáveis.
- (c) **Independência dos termos de erro:** o gráfico de resíduos da Figura 4.22 indica dependência entre os termos de erro, onde os mesmos aparecem alinhados a padrões verticais. Além da análise gráfica, foi realizado o teste de Durbin-Watson, que apresentou um valor de 1,427. O valor da estatística deste teste varia de 0 a 4. Como uma regra geral, os resíduos são não-correlacionados quando o valor do teste é próximo de 2. Um valor próximo de 0 indica uma forte correlação positiva, enquanto um valor próximo de 4 indica uma forte correlação negativa. O SPSS® não indica o nível de

significância estatística da estatística do teste, porém, segundo Savin e White (1977), para um nível de 5% de significância, uma amostra de cerca de $n = 750$ observações e um número de $k = 14$ variáveis independentes, o valor crítico inferior da estatística é $d_L = 1,845$. Como o valor obtido no teste é inferior ao valor crítico mínimo ($0 \leq 1,427 \leq 1,845$), indica que os dados são positivamente correlacionados. Os níveis apresentados foram considerados não excessivos, e apresentam um ponto de melhoria para futuros trabalhos.

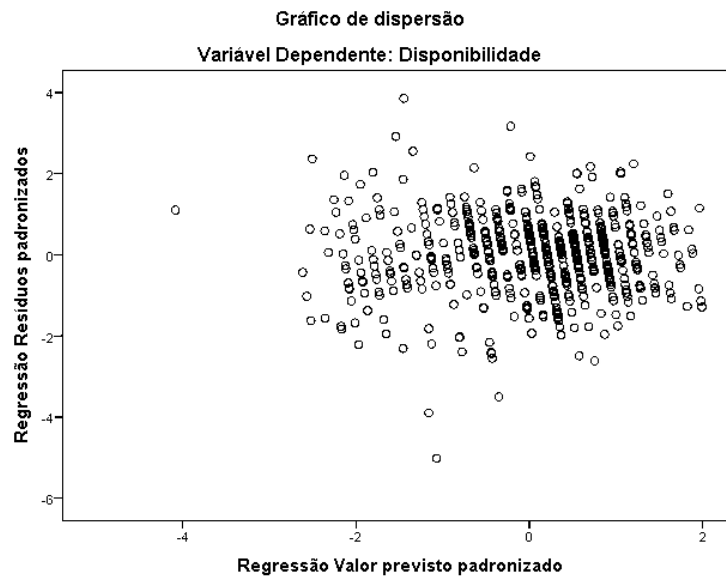


FIG 4.22 Gráfico de resíduos padronizados.

- (d) **Normalidade da distribuição dos termos de erro:** o histograma dos termos de erro padronizados indica aderência à distribuição normal, conforme pode ser verificado na Figura 4.23.

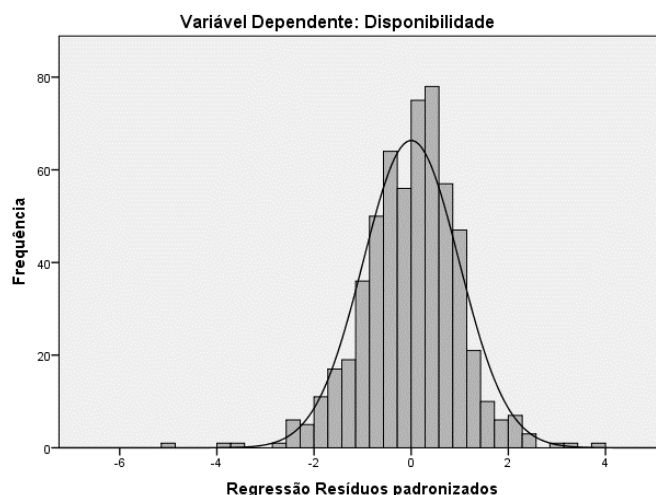


FIG 4.23 Histograma dos termos de erro.

4.2.1.4. ESTIMAÇÃO DO MODELO E AJUSTE GERAL

O resultado da análise, para um nível de confiança de 95%, utilizando-se o método de seleção de variáveis *Stepwise* (ver seção 2.5.2), pode ser observado a seguir. A Tabela 4.8 mostra o resumo no modelo e as 9 iterações realizadas pelo método. Verifica-se que a forma final, após 9 passos, indicou um coeficiente de determinação (quadrado do coeficiente de correlação) de 0,982. Esse valor indica que 98,2% da variação da Disponibilidade (variável dependente) é explicado pelo modelo.

TAB 4.8 Resumo do modelo.

Passo	R ²	R ² Ajustado	Erro padrão da estimativa	Estatísticas de mudança				
				Alteração de R quadrado	Alteração F	df1	df2	Sig. Alteração F
1	0,529	0,528	0,040966	0,529	644,440	1	573	0,000
2	0,838	0,843	0,024056	0,309	1089,665	1	572	0,000
3	0,937	0,939	0,015059	0,099	888,716	1	571	0,000
4	0,942	0,944	0,014396	0,006	54,788	1	570	0,000
5	0,948	0,950	0,013664	0,006	63,759	1	569	0,000
6	0,963	0,965	0,011605	0,015	220,773	1	568	0,000
7	0,980	0,981	0,008539	0,017	482,133	1	567	0,000
8	0,980	0,981	0,008538	0,000	,878	1	567	0,349
9	0,983	0,983	0,008159	0,002	54,929	1	567	0,000

O erro padrão da estimativa é outra medida de precisão utilizada, indicando o desvio padrão dos erros de previsão. Também pode ser usado para estimar o tamanho do intervalo de confiança para as previsões. Um erro padrão menor indica uma previsão mais confiável.

As variáveis incluídas pela técnica de seleção e os coeficientes finais do modelo podem ser verificados na Tabela 4.9. Das 11 variáveis independentes disponíveis, foram incluídas apenas 7 no modelo.

TAB 4.9 Resultado do modelo de regressão após o passo final da técnica *Stepwise*. Variáveis incluídas.

Variáveis Incluídas	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	Significância Estatística		Correlações			Estatísticas de Colinearidade	
	B	Erro Padrão	Beta (β)	t	Sig.	Zero	Parcial	Parte	Tolerância	VIF
(Constante)	-,019	,008		-2,525	,012					
Empresa2	-,032	,007	-,036	-4,404	,000	,644	-,182	-,025	,498	2,009
Empresa4	-,042	,005	-,119	-8,074	,000	,569	-,321	-,046	,149	6,706
Modelo12	,316	,004	,571	79,434	,000	,664	,958	,453	,631	1,586
Modelo13	,344	,005	,435	65,849	,000	,468	,940	,376	,745	1,342
Modelo11	,272	,004	,486	69,562	,000	,625	,946	,397	,667	1,499
Modelo3	,108	,004	,353	25,038	,000	,478	,725	,143	,164	6,092
Idade	,009	,001	,046	7,411	,000	,375	,297	,042	,834	1,199

O coeficiente (B) e o coeficiente padronizado (β) refletem a mudança na variável dependente para cada unidade alterada na variável independente. Deste modo, a comparação entre os coeficientes permite avaliar relativamente a importância de cada preditor no modelo de regressão. O valor t mede a significância da correlação parcial no coeficiente de regressão. Por exemplo, o valor -4,404 para a variável Empresa 2 é estatisticamente significativo no nível 0,00, dando um elevado nível de segurança de que o coeficiente não é igual a 0.

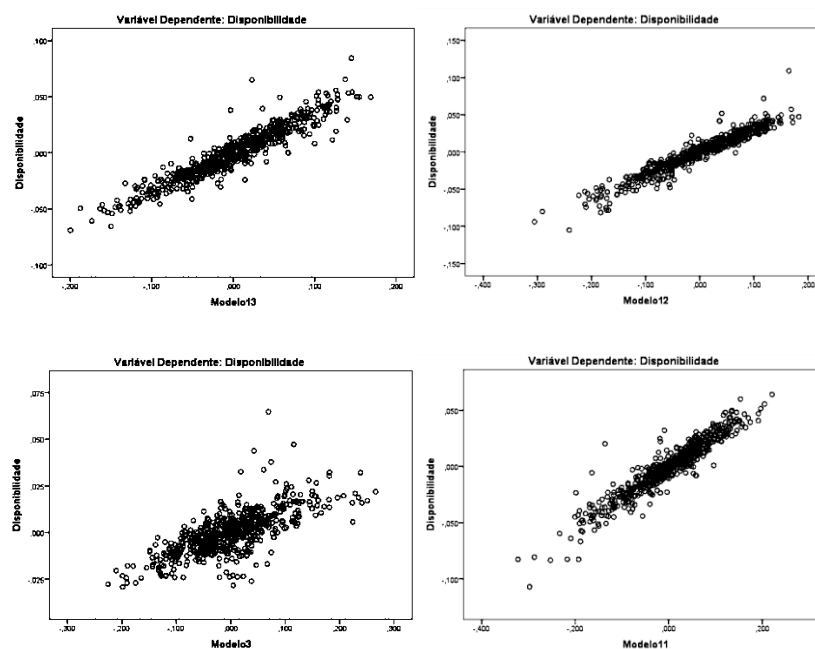
Nota-se que as variáveis Umidade, Temperatura, “Fixo Mensal” e Empresa 3 não foram adicionadas ao modelo pelo método *Stepwise*, por não agregarem maior explicação para a variância da variável dependente, apresentando um valor-p (“Sig.”) maior que 0,10. Deste modo, percebe-se que não se pode concluir que estas variáveis tenham uma relação estatística significativa com a Disponibilidade, como se imaginou inicialmente. No caso especial da Idade Média da Frota, verificou-se que a adição de aeronaves novas da frota manteve a média praticamente inalterada ao longo do período estudado, prejudicando a análise. Deste modo, sugere-se uma outra abordagem, em trabalhos futuros, para a análise da relação desta variável com a Disponibilidade.

O procedimento de estimação *Stepwise* resulta em um modelo com o menor número de variáveis independentes estatisticamente significantes e o máximo de precisão preditiva/explicativa.

4.2.1.4.1. AVALIAÇÃO DA VARIÁVEL ESTATÍSTICA

Além do exame das variáveis individuais para verificação de atendimento às suposições estatísticas, deve-se avaliar também a variável estatística para atendimento às suposições.

(a) Linearidade: Os gráficos de regressão parcial da Figura 4.24 mostram a relação de uma única variável independente com a dependente, controlando os efeitos das demais variáveis. A partir do exame dos gráficos verifica-se a relação linear entre as variáveis Modelo 11, Modelo 12 e Modelo 13 e a variável dependente. Para a variável Modelo 3 esta relação é menos evidente, embora ainda possa ser percebida. Já as variáveis Empresa 2, Empresa 4 e Idade apresentam baixa correlação, embora não seja evidenciada uma relação não-linear.



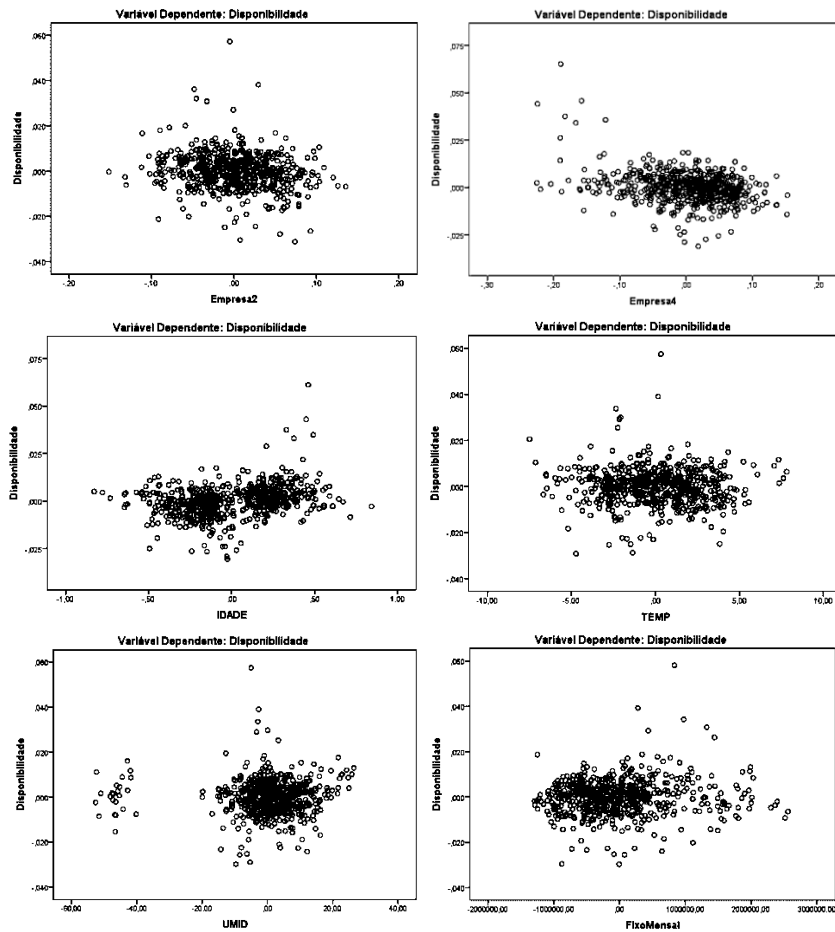


FIG 4.24 Gráficos de regressão parcial.

(b) Independência dos Resíduos e Homocedasticidade: A análise dos resíduos será feita pelo gráfico dos resíduos estudentizados versus valores previstos padronizados, conforme Figura 4.25. Conforme observado, os termos de erro não apresentam uma distribuição independente, embora não seja observada heterocedasticidade. Assim como já observado no exame das variáveis independentes, não se considerou excessiva esta violação, devendo ser tratada como um ponto de melhoria para trabalhos futuros.

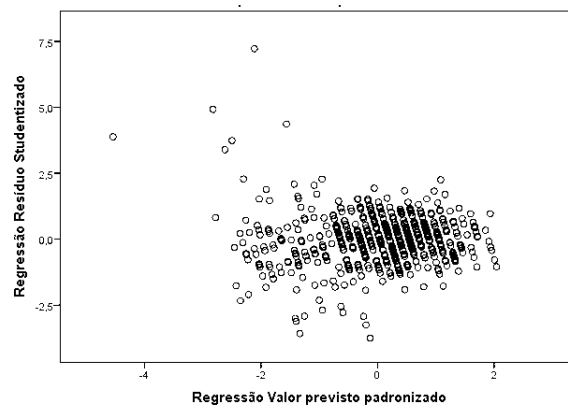


FIG 4.25 Análise dos resíduos padronizados.

(c) Normalidade: Como observado na Figura 4.26, os valores estão dispostos ao longo da diagonal sem desvios substanciais, podendo ser considerada uma distribuição normal.

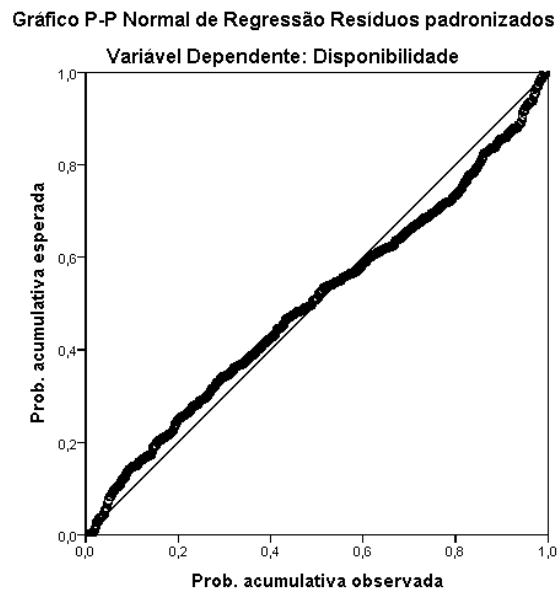


FIG 4.26 Gráfico de probabilidade normal.

(d) Correções de violações de suposições: como pôde ser verificado, houve violação da suposição de independência dos resíduos da variável estatística, problema comum em séries temporais. Transformações de dados, inclusão de variáveis indicadoras ou modelos de regressão especialmente formulados podem tratar desta violação. Tendo em vista o alto poder estatístico esperado pelo grande número de observações, indica-se o tratamento desta violação para trabalhos futuros.

4.2.1.5. INTERPRETAÇÃO DA VARIÁVEL ESTATÍSTICA

Após a estimação do modelo, pode-se interpretar o impacto de cada variável independente relativamente às demais variáveis. Tendo em vista o objetivo de Explicação, isto é, o foco na avaliação da natureza e impacto de cada variável independente, os coeficientes de regressão se tornam indicadores do impacto relativo e importância das variáveis independentes em sua relação com a variável dependente. A variável estatística obtida após a estimação, conforme Tabela 4.9, pode ser verificada a seguir:

$$\text{Disponibilidade} = -0,19 - 0,32x\text{Empresa2} - 0,42x\text{Empresa4} + 0,316x\text{Modelo12} + 0,344x\text{Modelo13} + 0,272x\text{Modelo11} + 0,108x\text{Modelo3} + 0,009x\text{Idade} \quad (5)$$

Com o objetivo de usar os coeficientes de regressão para fins de explicação, deve-se garantir que as variáveis estejam em escala e variabilidade comparáveis, uma vez que essa variação torna a comparação entre variáveis algo complexo. O uso dos coeficientes padronizados, chamados Beta (β) representa uma solução para essa questão. A variável estatística, utilizando-se os coeficientes padronizados β , também conforme Tabela 4.9, pode ser verificada na equação a seguir:

$$\text{Disponibilidade} = -0,19 - 0,36x\text{Empresa2} - 0,119x\text{Empresa4} + 0,571x\text{Modelo12} + 0,435x\text{Modelo13} + 0,486x\text{Modelo11} + 0,353x\text{Modelo3} + 0,046x\text{Idade} \quad (6)$$

4.2.1.5.1. ANÁLISE DA MULTICOLINEARIDADE

A utilização de coeficientes β deve ser avaliada com cuidado, uma vez que colinearidade pode distorcer as contribuições. Uma análise da matriz de correlações das variáveis independentes apresentada na Tabela 4.10 pode nos dar um primeiro indício de colinearidade entre variáveis.

TAB 4.10 Matriz de correlações das variáveis independentes.

	Modelo13	Modelo12	Modelo3	Modelo11	Empresa2	Empresa3	Empresa4	IDADE	TEMP	UMID	FixoMensal
Modelo13	1,00	0,00	0,01	0,11	0,33	0,38	0,15	0,05	-0,19	0,05	0,14
Modelo12	0,00	1,00	0,23	0,11	0,45	0,47	0,31	0,24	0,07	0,02	0,29
Modelo3	0,01	0,23	1,00	0,18	0,20	0,12	0,90	0,28	0,26	0,02	0,13
Modelo11	0,11	0,11	0,18	1,00	0,48	0,55	0,25	0,24	0,07	0,18	0,20
Empresa2	0,33	0,45	0,20	0,48	1,00	0,13	0,23	0,11	0,07	0,01	0,22
Empresa3	0,38	0,47	0,12	0,55	0,13	1,00	0,21	0,26	-0,06	0,11	0,36
Empresa4	0,15	0,31	0,90	0,25	0,23	0,21	1,00	0,32	0,15	0,06	0,23
Idade	0,05	0,24	0,28	0,24	0,11	0,26	0,32	1,00	0,32	0,30	-0,01
Temp.	-0,19	0,07	0,26	0,07	0,07	-0,06	0,15	0,32	1,00	-0,14	-0,08
Umid.	0,05	0,02	0,02	0,18	0,01	0,11	0,06	0,30	-0,14	1,00	-0,20
FixoMensal	0,14	0,29	0,13	0,20	0,22	0,36	0,23	-0,01	-0,08	-0,20	1,00

Verifica-se que apenas as variáveis Modelo3 e Empresa4 possuem um alto grau de correlação (0,90). As demais possuem correlações baixas e algumas médias (0,55, por exemplo).

A matriz de correlações indica apenas a correlação bivariada entre as variáveis. Não é possível por esta análise identificar efeitos de multicolinearidade, que é o efeito combinado de duas ou mais variáveis independentes. Neste caso a análise da Tolerância, isto é, a quantia de variabilidade da variável independente não explicada pelas outras variáveis, e a medida do *Variance Inflation Factor* (VIF), que representa o inverso do fator de Tolerância.

Segundo Hair et al. (2009) uma referência de corte muito comum é um valor de tolerância de 0,10, que corresponde a um VIF de 10. Conforme pode ser observado na Tabela 4.9, as variáveis não apresentam multicolinearidade excessiva, sendo o maior VIF de 6,706. Percebe-se ainda que os maiores valores de VIF referem-se às variáveis Empresa4 e Modelo3, conforme poderia ser esperado em função da alta correlação entre estas variáveis observada na Tabela 4.10.

A multicolinearidade também impacta o processo de estimação do modelo, em especial a composição da variável estatística e os coeficientes de regressão estimados. Um efeito possível é a inversão de sinal do coeficiente de regressão entre variáveis correlacionadas. Isto pode ser verificado entre as variáveis Modelo3 e Empresa4. Neste caso, a variável Empresa4, que possui uma correlação bivariada positiva com a variável independente, foi estimada no modelo com coeficiente negativo, o que na prática não faz sentido, uma vez que o aumento da disponibilidade do Modelo3 deveria aumentar a Disponibilidade geral da frota, e não o contrário. O mesmo ocorre com a variável Empresa2 em relação à correlação combinada com as variáveis Modelo11 e Modelo12. Tendo em vista que os sinais não terão importância para a explicação e interpretação das variáveis pretendidas, este efeito não será tratado neste trabalho.

4.2.1.5.2. INTERPRETAÇÃO DOS COEFICIENTES DE REGRESSÃO

Com a equação padronizada, a disponibilidade geral da frota pode ser calculada conhecendo-se a disponibilidade da Empresa2, Empresa4, Modelo12, Modelo13, Modelo11, Modelo3 e a idade média da frota. A constante (-0,19), embora seja estatisticamente significativa (valor-p = 0,012, 95% de confiança), não fornece uma grande contribuição para a interpretação. A mesma meramente participa do processo de previsão.

Os coeficientes padronizados β representam a importância relativa de cada variável. Deste modo, pode-se realizar comparações diretas entre as variáveis. Uma forma de realizar as comparações é a normalização das importâncias relativas de forma que a soma das mesmas seja igual a 1 (100%). Deste modo, a Figura 4.27 mostra a importância de cada preditor para o

modelo, ranqueados em ordem de importância, isto é, a soma residual dos quadrados com o preditor removido do modelo, normalizados de forma que os valores somem 1.

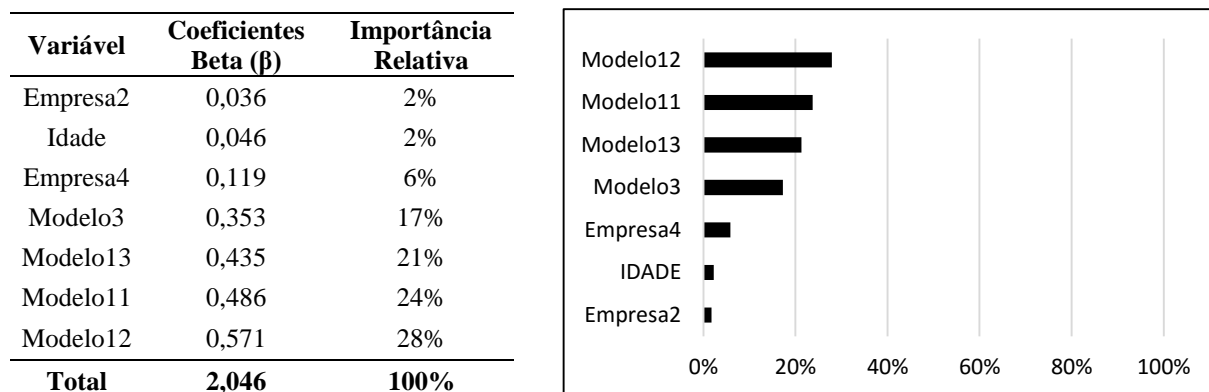


FIG 4.27 Importância do Preditor para o modelo.

Com base nos resultados, pode-se verificar a maior importância relativa das variáveis Modelo_i em relação às outras variáveis do modelo. A importância relativa entre os modelos não será objeto de análise no pretende estudo, embora seja de suma importância a partir das conclusões que se pretende chegar.

A observação da magnitude ou importância relativa nos revela que, na média, o Modelo é 4 vezes mais importante do que a empresa com maior importância inserida no modelo (Empresa4). Este resultado nos permite inferir, com base na significância estatística apresentada, que, para a obtenção de uma maior disponibilidade da frota, deve-se focar na escolha dos melhores modelos, sendo a escolha da empresa, para este quesito, menos importante (mantidas inalteradas as outras características).

Cabe ressaltar que existem outras variáveis para a seleção de uma aeronave ou empresa além da disponibilidade para o voo. Fatores primordiais como segurança devem ser avaliados, além de conforto, autonomia de voo e capacidade de carga/passageiros.

As empresas de aviação consideradas no modelo possuem avaliações de sistema de gestão similares, o que é evidenciado pelos resultados de robustas e compreensivas auditorias realizadas pela empresa contratante. Suas notas nestas avaliações, que envolvem análise do sistema de gestão, operação e segurança, são similares, apresentando variação máxima de 4%. Deste modo, pode-se inferir que as empresas, sob esta perspectiva, são equivalentes e atendem a todos aos requisitos mínimos.

4.2.1.6. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação tem o objetivo de garantir que o modelo de regressão definido represente a população geral e possa ser generalizado. De um modo geral, o modelo pode ser validado aplicando-o a novas amostras ou à uma partição da amostra existente.

A forma ideal de validação dos resultados é a obtenção de uma nova amostra. No entanto, tendo em vista as restrições de recursos e tempo, a validação será realizada com base na avaliação do R^2 ajustado, disposto na Tabela 4.8. O exame desta métrica revela pouca ou nenhuma perda no poder preditivo quando comparado ao valor R^2 .

Outra forma de validação dos resultados é aplicar a regressão a subamostras, comparando-se os resultados. Para isso, a amostra foi dividida em duas, onde a seleção das observações foi realizada de forma aleatória. Os resultados podem ser verificados a seguir nas tabelas 4.11 e 4.12.

TAB 4.11 Resumo dos modelos.

Amostra	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa
Subamostra 1	,992	,984	,983	,007953
Subamostra 2	,991	,983	,982	,007654

TAB 4.12 Variáveis inseridas no modelo de regressão *stepwise*.

Variável no Modelo	Subamostra 1					Subamostra 2				
	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados Beta (β)	t	Sig.	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados Beta (β)	t	Sig.
	B	Erro Padrão				B	Erro Padrão			
(Constante)	-,012	,010		-1,176	,241	-,026	,010		-2,511	,013
Empresa2	-,017	,010	-,019	-1,709	,089	-,031	,010	-,037	-3,248	,001
Empresa4	-,042	,007	-,119	-6,159	,000	-,043	,007	-,122	-5,710	,000
Modelo12	,312	,005	,568	58,060	,000	,315	,005	,570	57,935	,000
Modelo13	,347	,007	,429	49,238	,000	,345	,007	,452	48,106	,000
Modelo11	,268	,005	,479	49,586	,000	,272	,005	,492	51,991	,000
Modelo3	,109	,006	,356	19,224	,000	,105	,006	,345	16,935	,000
Idade	,006	,002	,031	3,650	,000	,010	,002	,057	6,471	,000

As comparações entre as duas subamostras demonstram um elevado grau de similaridade entre os resultados, tanto do R^2 quanto dos coeficientes de regressão. As mesmas variáveis são inseridas no modelo pela estimação *Stepwise*, além da ordem de importância

relativa, verificada pelos coeficientes (β) se manteve inalterada. Deste modo, pode-se verificar a consistência da análise e o poder de generalização da mesma.

4.2.2. ANÁLISE DAS CAUSAS DE INDISPONIBILIDADE

Foi realizada o levantamento das causas de indisponibilidade, conforme definido na metodologia. Tendo em vista a não estruturação dos dados quando da coleta, isto é, as informações eram fornecidas pelas empresas de uma forma não padronizada, a análise se mostrou complexa e demorada.

A partir das mais de 5000 causas apontadas pelas empresas, pôde-se elencar os principais componentes causadores de indisponibilidade e o percentual de manutenções programadas e não programadas, com o uso de técnicas de mineração de texto e contagem de frequências de termos, além do tratamento e classificação manual das observações.

Verificou-se que as manutenções programadas representaram cerca de 21% do total de dias indisponíveis por manutenção. Mitchell e Amadi-Echendu (2007) e Wireman (2004) indicam que as melhores práticas levam a um percentual de manutenção programada de 80%-85% ou mais em relação à manutenção total, o que demonstra uma grande oportunidade de melhoria neste quesito analisado. As manutenções não programadas requerem um esforço maior da equipe de manutenção e geralmente representam um custo maior em função da improdutividade inerente à detecção e correção da falha e volta do equipamento à condição de disponível.

Problemas variados com os Motores e a “Main Gear Box” representaram cerca de 16% do total de causas de indisponibilidade. Itens como CVR (*Cockpit Voice Recorder*) e HMU (*Helicopter Maintenance Unit*) também apresentaram uma representatividade considerável, de 2% cada. Dos tipos de falha, vibração e vazamento representaram 5% e 4%, respectivamente, das causas de indisponibilidade.

Dos itens não técnicos, a categoria “Atrasos administrativos” representou cerca de 4% do total da indisponibilidade. Esta categoria abrange itens como demora em vistoriar a aeronave para volta à operação entre outros problemas não técnicos com o equipamento.

Outra questão a ser observada é a padronização da frota e sua relação com os tempos de manutenção e índices de disponibilidade. Como pode ser verificado na Tabela 4.13, as empresas 2, 3 e 4, objetos do estudo, operam 5, 4 e 7 diferentes modelos de aeronaves, respectivamente.

Pan e Espírito Santo Jr (2004), conforme apresentado na revisão de literatura, indicam que a padronização deve ser avaliada não somente com relação a um número igual de aeronaves do mesmo modelo e fabricante, mas levar em conta a padronização de motores, aviônica, equipamentos, ferramentas e outros. O IPF (Índice de Padronização da Frota), proposto pelos autores, é composto do Índice de Padronização da Célula (IPC) e Índice de Padronização do Motor (IPM), com base nas premissas de que quanto maior o número de diferentes fabricantes de aeronaves, modelos e motores, menor o nível de padronização.

Com base nas premissas e na fórmula proposta pelos autores, calculou-se o IPC para as empresas 2, 3, 4, como forma de se ter uma ideia numérica da padronização da frota das mesmas. O IPM, embora também importante, não pôde ser calculado em função da indisponibilidade de informações sobre os motores de cada aeronave. O resultado pode ser verificado na Tabela 4.13.

TAB 4.13 Cálculo do índice de padronização da célula (IPC).

Quantidade de Modelos Diferentes	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4
Fabricante A			1
Fabricante B	1		4
Fabricante C	4	4	2
Total	5	4	7
Quantidade de Aeronaves			
Fabricante A			7
Fabricante B	6		8
Fabricante C	26	45	7
Total	32	45	22
IPC (Índice de Padronização da Célula)	0,195	0,230	0,189

Com base na análise da tabela, verifica-se que a empresa 3 apresenta a maior padronização em termos de modelos de aeronaves. Possui 45 aeronaves de um mesmo fabricante, divididos em 4 diferentes modelos. O resultado da padronização pode ser uma das explicações para que o Tempo Médio para o Reparo (MTTR - *Mean Time to Repair*) da empresa seja o menor entre as 3 empresas analisadas, conforme verificado pela Figura 4.28. Embora não seja o foco deste estudo, verifica-se aqui um indício de correlação entre a padronização da frota e o tempo médio para reparo, o que pode ser aprofundado em estudos futuros. A relação parece ocorrer de forma lógica, tendo em vista que ter aeronaves de um mesmo modelo implica em pessoal de manutenção extremamente especializado, maior disponibilidade de peças em

estoque e maior conhecimento da frota, além de maior poder de negociação e tratamento diferenciado perante o fabricante da aeronave.

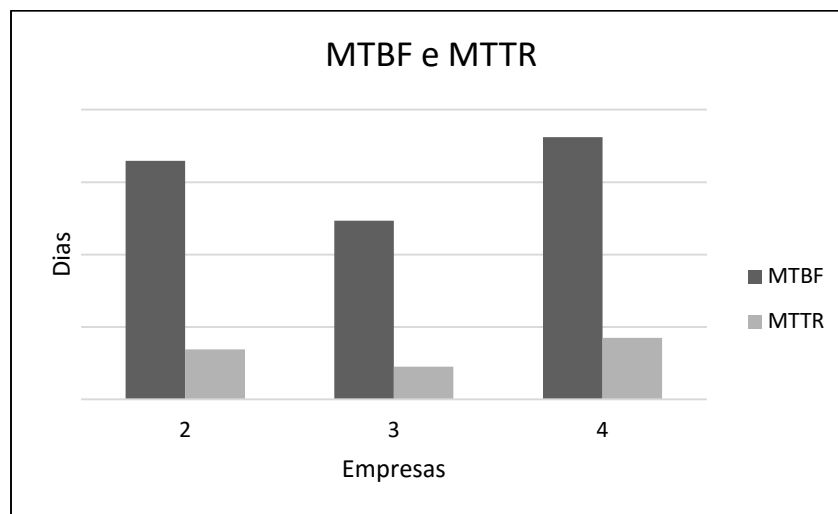


FIG 4.28 Mean Time Between Failures (MTBF) e Mean Time to Repair (MTTR).

O menor Tempo Médio entre Falhas (MTBF), apresentado também pela empresa 3, não indica uma menor disponibilidade da mesma, tendo em vista que esta métrica é obtida a partir da relação desses dois índices, conforme Ireson et al. (1995):

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (7)$$

De fato, mesmo tendo um menor MTBF, a empresa 3 apresenta um nível de disponibilidade muito próximo ao da empresa 4 (83,5% vs. 83,7%), conforme já apresentado na Tabela 4.1, o que só foi possível com o significativamente menor MTTR apresentado.

Outra questão observada, conforme apresentado na revisão de literatura por meio dos autores Kilpi (2007) e Zou et al. (2015), foi a relação entre a padronização da frota e o resultado financeiro das empresas. As comparações mostraram que a empresa que apresenta a maior margem líquida também é a empresa com a maior padronização. Tendo em vista o número reduzido de empresas, é prematuro afirmar uma correlação entre estas variáveis, porém este ponto apresenta-se como uma oportunidade de estudo e avaliação.

4.3. PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA AUMENTO DA DISPONIBILIDADE

A análise estatística dos dados da disponibilidade permitiu identificar algumas oportunidades de melhoria para a elevação desta importante métrica:

1. **Concentração da frota em modelos com alta disponibilidade:** Com base na Análise de Regressão Múltipla, apresentada na seção 4.2.1, percebeu-se a importância relativa da escolha do modelo para a disponibilidade. De maneira lógica, ter modelos que apresentam alta disponibilidade em sua frota, aumentará a disponibilidade da mesma. No entanto, o resultado mais importante é que, alguns modelos, mesmo operados por diferentes empresas, parecem sempre apresentar disponibilidade maior que outros. Embora a concentração da frota em poucos modelos apresente também desvantagens, como por exemplo o risco de ter toda a frota paralisada por algum problema não conhecido, para fins de disponibilidade, a concentração da frota em poucos e altamente disponíveis modelos parece ser a solução para o aumento da disponibilidade geral. A concentração terá ainda um efeito colateral positivo, que é a padronização da frota. Deste modo, espera-se que concentrar a frota em modelos de alta disponibilidade aliado a todas as vantagens da padronização terá um impacto considerável na elevação da disponibilidade.
2. **Manutenção preventiva:** tendo em vista o alto índice de manutenções não programadas verificado, recomenda-se um estudo mais detalhado de ações para o aumento do número de manutenções programadas (preventivas e preditivas), fazendo um melhor uso de sistemas robustos de detecção de falhas como o HUMS (ver seção 2.4.4), presente em quase todas as aeronaves.
3. **Redução de problemas relacionados a “atrasos administrativos”:** verificou-se que cerca de 4% da indisponibilidade foram relacionados à demora para a realização de auditorias ou análise documental da aeronave para retorno à operação, depois que a falha já havia sido resolvida. Este número nos parece ser elevado e merece atenção, tendo em vista que a indisponibilidade da aeronave representa um fator de custo elevado e certamente justifica um maior

investimento na contratação de pessoas ou melhorias dos processos de verificação documental e auditorias. Conforme estimativa apresentada na seção 1.1, a redução deste número e consequente aumento da disponibilidade poderia resultar em ganhos estimados em até US\$ 8,8 milhões por ano, considerando uma frota de 100 aeronaves de médio porte.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos diversos autores estudados pôde-se perceber as dificuldades enfrentadas pela indústria aeronáutica e de aviação, em especial pelo transporte aéreo por helicópteros. Os riscos inerentes à atividade de voar (como é dito comumente no setor: “não há acostamento para aeronave”) somados às condições severas de operação sobre o mar (vento, umidade, corrosão, abrasão, indisponibilidade de terra firme para pousos de emergência, etc.), tornam a atividade ainda mais desafiadora.

A revisão de literatura mostrou diferenças conceituais entre a aviação civil e militar, mas que fundamentalmente são equivalentes. Enquanto a aviação civil é focada na satisfação do cliente final (usuário do serviço), utilizando-se maciçamente de métricas como a Taxa de Atraso e a Confiabilidade de Despacho, a aviação militar possui um foco maior em prontidão, isto é, a quantidade de aeronaves disponíveis em um determinado momento.

Ao realizar a revisão de literatura pôde-se perceber também a escassez de artigos, teses e dissertações relacionadas ao transporte aéreo *offshore* por helicópteros. Enquanto que para a aviação civil de asa fixa e para a aviação militar de um modo geral existe uma vasta gama de publicações sobre manutenção, confiabilidade e disponibilidade, a aviação civil de helicópteros ainda carece de mais estudos sobre as formas de atuação das empresas e métricas utilizadas neste segmento. Essa diferença pode ser explicada em parte pelo volume e importância financeira entre os dois setores. Em toda a indústria *offshore* são realizadas cerca de 1,2 milhão de horas de voo por ano, em cerca de 2000 helicópteros. Esses números parecem, se olhados isoladamente, significativos, mas em comparação à indústria de aviação civil de asa fixa (aviões) são muito pequenos. Para se ter uma ideia, estima-se que a frota mundial de aviões em serviço seja superior a 25.000 unidades²⁴ ou cerca de 12 vezes toda a frota de helicópteros servindo a indústria de óleo e gás *offshore*. Se considerarmos o número de passageiros transportados ou pax^{25} x km voados, a diferença é ainda maior, tendo em vista que tanto o tamanho das aeronaves quanto as distâncias percorridas são muito superiores.

Deste modo, o presente trabalho vem a contribuir com a comunidade acadêmica e para a indústria para um maior conhecimento da dinâmica da aviação civil de helicópteros atuando para a indústria *offshore*, em especial quanto a métricas e detalhes sobre a disponibilidade da frota.

²⁴ World Airline Census. Flight Global. 2014.

²⁵ Pax = passageiro.

Os resultados das análises estatísticas mostraram que a escolha do modelo da aeronave possui um papel mais importante do que a própria escolha da empresa, mantidas todas as outras condições inalteradas. Em outras palavras, alguns modelos possuem inerentemente maior disponibilidade que seus pares mesmo sendo operado por companhias distintas. É importante ressaltar, no entanto, que esta comparação parte do princípio de que as empresas são minimamente equivalentes em termos de gestão do processo, gestão da operação e gestão da segurança e atendem aos mínimos exigidos pela legislação. Também não foram estudadas condições comerciais entre as empresas de transporte aéreo e seus fornecedores de aeronaves e peças nem a estruturas destes no país, que pode ter influência na análise. Recomenda-se que esta análise seja aprofundada em trabalhos futuros.

Com base neste resultado, caso o objetivo seja aumentar a disponibilidade da frota, indica-se que os modelos de aeronaves sejam escolhidos diretamente pelas empresas tomadoras de serviço, privilegiando aquelas notadamente mais disponíveis. Ainda, caso os modelos sejam objeto de escolha das empresas aéreas, recomenda-se que no critério de avaliação das propostas comerciais seja sopesado objetivamente o fator Disponibilidade juntamente a outros como segurança, conforto, autonomia, etc.

Os resultados das análises estatísticas não demonstraram violações aos pressupostos da Regressão Múltipla. No entanto indica-se que em trabalhos futuros sejam abordadas técnicas para mitigação dos efeitos da dependência dos termos de erro, em função do caráter da série temporal utilizada.

Na análise da Idade Média da Frota, verificou-se que a adição de aeronaves novas da frota manteve a média praticamente inalterada ao longo do período estudado, prejudicando a análise. Deste modo, sugere-se uma outra abordagem, em trabalhos futuros, para a análise da relação desta variável com a Disponibilidade, considerando um período maior de análise. Nesta mesma linha, a análise da relação da Temperatura e Umidade com a disponibilidade não se mostrou conclusivas. Sugere-se a adoção da análise de sazonalidade e correlações defasadas dessas variáveis (por exemplo, 1 mês ou mais) e seus efeitos na disponibilidade da frota.

A validação dos resultados, conforme item 4.2.1.6, aplicada às subamostras aleatórias, mostrou o poder de generalização do trabalho e corroborou a aplicabilidade do modelo aos dados estudados. Porém, é preciso a extensão do estudo em frotas de outras empresas, de modo a se verificar e comprovar, com um poder estatístico maior, as conclusões tiradas neste trabalho. Cabe ressaltar que embora o estudo tenha sido realizado em uma frota de helicópteros operando para a indústria de óleo e gás, os conceitos podem ser aplicados a qualquer aeronave ou mesmo

a equipamentos diversos. A disponibilidade de equipamentos intensivos em capital deve ser estudada e tratada, uma vez que pode trazer ganhos financeiros significativos para as empresas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1994) NBR 5462 – **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 1994.
- ABNT (2011) NBR ISO 14.224 – **Indústrias de petróleo e gás natural - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. 2011.
- AIKEN, Leona S.; WEST, Stephen G. **Multiple regression: Testing and interpreting interactions**. Sage, 1991.
- AOGHS (American Oil & Gas Historical Society). **Offshore Oil History**. <<http://aoghs.org/offshore-exploration/offshore-oil-history/>>, Acesso em 19/04/2015.
- AVIZIENIS, A., LAPRIE, J. C., RANDELL, B., & LANDWEHR, C. **Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing**. Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on, v. 1, n. 1, p. 11-33, 2004.
- BALABAN, H. S., BRIGANTIC, R. T., WRIGHT, S. A., & PAPATYI, A. F. **A simulation approach to estimating aircraft mission capable rates for the United States Air Force**. In: Simulation Conference, 2000. Proceedings. Winter. IEEE, 2000. p. 1035-1042.
- BARTHOL, Derrick R. **An Analysis into the Effectiveness of Aircraft Maintenance under the Combat Wing Structure**. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT, 2005.
- BAZARGAN, Massoud; MCGRATH, Robert N. **Discrete event simulation to improve aircraft availability and maintainability**. In: Reliability and Maintainability Symposium, 2003. Annual. IEEE, 2003. p. 63-67.
- BELCASTRO, C. M. et al. **Aviation safety program: integrated vehicle health management technical plan summary**. NASA Technology Report, p. 1-53, 2006.
- BYRD, T. A., MARKLAND, R. E., KARWAN, K. R., & PHILIPOOM, P. R.. **Keeping the Helicopters Flying—Using a Knowledge-Based Task Support System to Manage Maintenance**. Interfaces, v. 21, n. 4, p. 53-62, 1991.
- CAVEX (COMANDO DE AVIAÇÃO DO EXÉRCITO). **Histórico**. Site: <<http://www.cavex.eb.mil.br/historico.html>>. Acesso em 12/10/2014.
- CIARALLO, F. W., HILL, R. R., MAHADEVAN, S., CHOPRA, V., VINCENT, P. J., & ALLEN, C. S. **Building the mobility aircraft availability forecasting (MAAF) simulation model and decision support system**. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, v. 2, n. 2, p. 57-69, 2005.
- CNN Money. **The runway to the final four**. <<http://money.cnn.com/infographic/news/companies/airline-merger/>>, acesso em 20/11/2013.

- CRAWFORD, Gordon B. **Variability in the demands for aircraft spare parts**. AIR FORCE ACADEMY COLORADO SPRINGS CO HUMAN ENVIRONMENTAL RESEARCH CENTER, 1988.
- CASTRO, Wanderlan de. **Procedimento para avaliação de helicópteros para emprego militar**. 1987. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia (IME).
- DECKER, Bill de. **Measuring Reliability and Availability**. Conklin e de Decker. 2013. Site: <<https://www.conklindd.com/Page.aspx?hid=1074>> Acesso em 01/12/13.
- DOANE, David P., SEWARD, Lori E. **Estatística aplicada à administração e à economia**. McGraw Hill Brasil, 2008.
- EASA (European Aviation Safety Agency). **Annual Safety Review 2012**, pag. 13. 2013.
- FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION). **Helicopter Flying Handbook**, p. 57-59, 2013.
- FLANAGAN, Chris John. **Cultural shift at CHC helicopter corporation: Challenges and opportunities in an era of radical change**. 2007. Tese de Doutorado. Faculty of Business Administration-Simon Fraser University.
- FUKUSHIMA, M. **Aircraft maintenance and reliability**. Microelectronics Reliability, v. 11, n. 1, p. 41-46, 1972.
- GORSUCH, Richard, L. **Factor Analysis**, 2nd Edition. LEA. 1983.
- GALVÃO, Roberto D.; GUIMARÃES, Jesu. **The control of helicopter operations in the Brazilian oil industry: Issues in the design and implementation of a computerized system**. European Journal of Operational Research, v. 49, n. 2, p. 266-270, 1990.
- HAIR, Joseph F.; BLACK, William C.; BABIN, Barry J.; ANDERSON, Rolph E.; TATHAM, Ronald L. **Análise multivariada de dados – 6ª Edição**. Bookman, 2009.
- HAHN, R. A.; NEWMAN, Alexandra M. **Scheduling united states coast guard helicopter deployment and maintenance at Clearwater Air Station, Florida**. Computers & Operations Research, v. 35, n. 6, p. 1829-1843, 2008.
- HIRSCHBERG, Michael; DALEY, David K. **US and Russian Helicopter Development in the 20th Century**. American Helicopter Society International, 2000.
- HOKSTAD, Per; JERSIN, Erik; STEN, Terje. **A risk influence model applied to North Sea helicopter transport**. Reliability Engineering & System Safety, v. 74, n. 3, p. 311-322, 2001.
- HOSFORD, John E. **Measures of dependability**. Operations Research, v. 8, n. 1, p. 53-64, 1960.

- IRESON, William Grant; COOMBS, Clyde F; MOSS, Richard Y. **Handbook of reliability engineering and management. Second Edition.** New York: McGraw-Hill, 1995.
- JÚNIOR, Jaures C. Modelagem da Despachabilidade de uma Frota de Aeronaves. Simpósio Internacional de Confiabilidade. Florianópolis. 2008.
- KANTI, V. Mardia, KENT, J. T., Bibby, J. M. **Multivariate analysis (probability and mathematical statistics).** New York: Academic Press, 1980.
- KAPITZKE, Michael S. **An Investigation into Aircraft Availability.** AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF LOGISTICS AND ACQUISITION MANAGEMENT, 1995.
- KILPI, Jani. **Fleet composition of commercial jet aircraft 1952–2005: Developments in uniformity and scale.** Journal of Air Transport Management, v. 13, n. 2, p. 81-89, 2007.
- KRULAK, David C. **Human factors in maintenance: impact on aircraft mishap frequency and severity.** Aviation, space, and environmental medicine, v. 75, n. 5, p. 429-432, 2004.
- KIYAK, E. **The Effects of Aircraft Preventive Maintenance on Reliability.** International Journal Of Applied Mathematics And Informatics, Issue 1, Volume 6, 2012.
- LARMINIE, F. G., CLARK, R. B., RUDD, J. K., & TASKER, M. L. The History and Future of North Sea Oil and Gas: An Environmental Perspective [and Discussion]. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 316, n. 1181, p. 487-493, 1987.
- LEISHMAN, J. Gordon. **Principles of helicopter aerodynamics.** Cambridge University Press, 2006.
- LE ROY, Thierry. **L'hélicoptère : une invention prometteuse au XIX^e siècle.** *Pour la Science.* Les génies de la science, n° 31. 2007.
- LYRA DA SILVA, B. B. et al. **Helicopter offshore safety in the Brazilian oil and gas industry.** In: Systems and Information Engineering Design Symposium, 2005 IEEE. IEEE, 2005. p. 235-241.
- MAISEL, Martin D., GIULIANETTI, Demo J., DUGAN, Daniel C. **The History of The XV-15 Tilt Rotor Research Aircraft: From Concept to Flight.** NASA History Division. 2000.
- MITCHELL, John Steward; AMADI-ECHENDU, Joe E. **Physical asset management handbook.** Clarion technical publishers, 2007.
- MINGOTI, Sueli Aparecida. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada.** Editora UFMG, 2005.
- MAZOTTI, Marcos Antônio. **Planejamento de Transporte Militar por Helicópteros.** 1987. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia.

- OIL & GAS UK. **Uk Offshore Commercial Air Transport Helicopter Safety Record (1981 – 2010)**. The United Kingdom Offshore Oil and Gas Industry. 2011.
- OLIVER, Steven A. **Forecasting readiness: Using regression to predict the mission capability of Air Force F-16 fighter aircraft**. Air Force Inst. Of Tech Wright-Patterson Afb Oh School Of Engineering And Management, 2001.
- O'MALLEY, T. J. **The Aircraft Availability Model: Conceptual Framework and Mathematics**. Logistics Management Inst. Bethesda Md, 1983.
- O'MALLEY, T. J.; BACHMAN, Tovey C. **Depot Maintenance in the Air Force: How Requirements are Determined and How They Relate to Aircraft Readiness and Sustainability**. Logistics Management Inst. Bethesda Md, 1990.
- PAN, Alexis George de Borges; ESPIRITO SANTO JR, Respício A. **Developing a fleet standardization index for airline pricing**. Journal of Air Transportation, v. 9, n. 2, p. 97-110, 2004.
- PAPAKOSTAS, N., PAPACHATZAKIS, P., XANTHAKIS, V., MOURTZIS, D., & CHRYSSOLOURIS, G. **An approach to operational aircraft maintenance planning**. Decision Support Systems, v. 48, n. 4, p. 604-612, 2010.
- PATANKAR, Manoj S.; TAYLOR, James Chapman. **Risk management and error reduction in aviation maintenance**. Aldershot,, UK: Ashgate, 2004.
- PENDLEY, Scotty A. **Factors and Interactions That Affect Air Force C-17 Aircraft Mission Capable Rates**. Air Force Inst Of Tech Wright-Patterson Afb Oh School Of Engineering And Management, 2006.
- PETROBRAS. **Nossa História**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>> Acesso: 10 nov. 2013.
- PINTO, Allan Kardec; XAVIER, Julio Nascif. **Manutenção-Função Estratégica**. Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- PRATT, Joseph A.; PRIEST, Tyler; CASTANEDA, Christopher James. **Offshore Pioneers: Brown and Root and the History of Offshore Oil and Gas**. Access Online via Elsevier, 1997.
- QIAN, F., GRIBKOVSKAIA, I., LAPORTE, G., & HALSKAU sr, Ø.. **Passenger and pilot risk minimization in offshore helicopter transportation**. Omega, v. 40, n. 5, p. 584-593, 2012.
- RASHID, H. S. J.; PLACE, C. S.; BRAITHWAITE, G. R. **Helicopter maintenance error analysis: beyond the third order of the HFACS-ME**. International Journal of Industrial Ergonomics, v. 40, n. 6, p. 636-647, 2010.
- WANG, James CF. **Handbook on Ocean Politics & Law**. Greenwood Publishing Group, 1992.

- RANOUS, C.A. **Reliability**. Journal IEEE Transactions on Education, Volume 7 Issue 2, June 1964 Page 52-54.
- REXROAD, Frederick. **Aircraft Availability Research Model (AARM) Analyst's Manual**. HQ AFMC/XPS, Wright-Patterson AFB OH, 1992.
- SAVIN, Nathan E.; WHITE, Kenneth J. **The Durbin-Watson test for serial correlation with extreme sample sizes or many regressors**. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 1989-1996, 1977.
- SACHON, Marc; PATE-CORNELL, E. **Delays and safety in airline maintenance**. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 67, n. 3, p. 301-309, 2000.
- SCANFF, E., FELDMAN, K. L., GHELAM, S., SANDBORN, P., GLADE, M., & FOUCHER, B. **Life cycle cost impact of using prognostic health management (PHM) for helicopter avionics**. *Microelectronics Reliability*, v. 47, n. 12, p. 1857-1864, 2007.
- SIKORSKY. **Availability Rates for Sikorsky S-92® Offshore Fleet Top 90% for Three Years in a Row**. Disponível em: <<http://www.sikorsky.com/About+Sikorsky/News/Press>> Acesso em 10/11/2013.
- STAPELBERG, Rudolph Frederick. **Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design**. Springer Science & Business Media, 2009.
- TIASSOU, Kossi. **Aircraft operational reliability- A Model-based approach and case studies**. 2013a. Tese de Doutorado. INSA de Toulouse.
- TIASSOU, K., KANOUN, K., KAÂNICHE, M., SEGUIN, C., & PAPADOPOULOS, C. **Aircraft operational reliability - A model-based approach and a case study**. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 120, p. 163-176, 2013b.
- ULLEBERGE, T. et al. **Helicopter Safety Study**. In: SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference. 1991.
- U.S. DEPARTMENT OF DEFENCE (U.S. DoD), Site: <http://www.defense.gov/about/>, acesso em 12/10/2014.
- VIOTTI, Daniel Ferreira; ANDRADE, Donizeti de. **Estudo De Otimização Da Escolha De Aeronave Para Offshore**. Anais do XVI Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XVI ENCITA. 2010.
- YANG, Bo J. Z., WEI T., **A review of current prognostics and health management system related standards**. *Chemical Engineering Transactions*, 33, 277-282 DOI: 10.3303/CET1333047. 2013
- WEISBERG, Sanford. **Applied linear regression**. John Wiley & Sons, 2014.

WYLIE, A. et al. **IDS: Improving aircraft fleet maintenance**. In: Proceedings of the 14th national conference on artificial intelligence and innovative applications of AI (IAAI-97). RI: Providence; 1997. p. 27–31.

WIREMAN, Terry. **Benchmarking best practices in maintenance management**. 2004.

WYNDHAM, David. **Aircraft Reliability – You Can Only Manage What You Can Measure**. Site: < <http://dwyndham.wordpress.com/2013/06/03/aircraft-reliability-you-can-only-manage-what-you-can-measure/>>. Acesso em 15/11/2013.

WU, Cheng-Lung, CAVES, Robert E.. **Towards the optimisation of the schedule reliability of aircraft rotations**. Journal of Air Transport Management 8.6, p. 419-426. 2002.

ZOU, Li; YU, Chunyan; DRESNER, Martin. **Fleet Standardisation and Airline Performance**. Journal of Transport Economics and Policy (JTPEP), v. 49, n. 1, p. 149-166, 2015.