

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

EDEN LUCAS SANTOS CAVALCANTE BARBOSA

**Desenvolvimento de Ferramenta Estatística para Predição de Dados METAR Aplicados à
Aeronáutica**

São João da Boa Vista
2024

Eden Lucas Santos Cavalcante Barbosa

**Desenvolvimento de Ferramenta Estatística para Predição de Dados METAR Aplicados à
Aeronáutica**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de
Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica
do Campus de São João da Boa Vista, Universidade
Estatual Paulista, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em Engenharia
Aeronáutica .

Orientador: Profº Dr. Denilson Paulo Souza dos
Santos

São João da Boa Vista

2024

B238d

Barbosa, Eden Lucas

Desenvolvimento de Ferramenta Estatística para Predição de Dados METAR Aplicados à Aeronáutica / Eden Lucas Barbosa. -- São João da Boa Vista, 2024

46 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Denilson Paulo Souza dos Santos

1. Aeronáutica. 2. Estimativas. 3. Aeroportos. 4. Meteorologia. 5. Software. I. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA ESTATÍSTICA PARA PREDIÇÃO DE
DADOS METAR APLICADOS A AERONÁUTICA**

Aluno: Eden Lucas Santos Cavalcante Barbosa
Orientador: Prof. Dr. Denilson Paulo Souza dos Santos

Banca Examinadora:

- Denilson Paulo Souza dos Santos (Orientador)
- Éder Luiz Oliveira (Examinador)
- Lucas Daniel Del Rosso Calache (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 19 de novembro de 2024

DADOS CURRICULARES

EDEN LUCAS SANTOS CAVALCANTE BARBOSA

NASCIMENTO 09/05/2001 - Salvador / BA

FILIAÇÃO Eden Stephane Cavalcante Barbosa
Sandra Patricia Santos Cavalcante Barbosa

2023 / 2024 Estágio em Engenharia de Vendas
Embraer S.A

2020 / ATUAL Engenharia Aeronáutica
UNESP

Dedico este trabalho aos meus queridos avós, Walter Lopes e Maria Lopes, que sempre estiveram ao meu lado, transmitindo amor, força e sabedoria. Onde quer que estejam hoje, carrego suas memórias e ensinamentos como inspiração ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Denilson Paulo e Lucas Calache, pela orientação dedicada e constante ao longo do desenvolvimento acadêmico deste trabalho. Sou profundamente grato pelo desprendimento em compartilhar conhecimentos, pela disponibilidade em oferecer apoio nas etapas mais desafiadoras e pela amizade sincera que tornou essa jornada ainda mais enriquecedora.

“Sorrir é a melhor maneira de lidar com situações difíceis.”
(Masashi Kishimoto)

RESUMO

Nos estudos de desempenho no setor aeronáutico, é uma prática comum que os clientes que solicitam análises e forneçam seus dados meteorológicos. No entanto, é crucial ressaltar que muitos dos sensores utilizados para coletar esses dados estão suscetíveis a diversas fontes de ruído, que vão desde manutenções inadequadas até problemas nos equipamentos. Essas interferências podem resultar na geração de informações irreais, comprometendo a fidedignidade das simulações em relação ao contexto local. Além disso, há a possibilidade de os solicitantes disponibilizarem informações que não correspondam com precisão à realidade vigente. A concepção de um software destinado a estimar e mostrar os dados meteorológicos ao longo de um determinado período surge como uma solução viável para verificar a integridade dos dados recebidos. O principal objetivo desta pesquisa centra-se no desenvolvimento de um software destinado à estimativa de dados meteorológicos em aeroportos, com a finalidade de avaliar e melhorar as simulações de desempenho, e seus impactos nos testes de desempenho e na análise de *payload*.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho, Aeronáutico, Meteorologia, Simulação, Estimativa, Software, Aeroporto

ABSTRACT

In performance studies within the aeronautical sector, it is a common practice for clients requesting analyses to provide their meteorological data. However, it is crucial to highlight that many of the sensors used to collect this data are susceptible to various sources of noise, ranging from inadequate maintenance to equipment issues. These interferences can lead to the generation of unrealistic information, compromising the reliability of simulations concerning the local context. Additionally, there is a possibility that the data provided by clients may not accurately reflect current conditions. The development of software designed to estimate and display meteorological data over a given period emerges as a viable solution to verify the integrity of the received data. The primary objective of this research focuses on the development of software aimed at estimating meteorological data at airports to evaluate and improve performance simulations and their impacts on performance testing and payload analysis.

KEYWORDS: Performance, Aeronautical, Meteorology, Simulation, Estimation, Software, Airport.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Exemplificação de QNH.	15
Figura 2	Interface inicial do VBA com trecho do código.	19
Figura 3	Representação de como a temperatura afeta a decolagem.	21
Figura 4	Situação de decolagem.	22
Figura 5	Estações METAR no Brasil.	24
Figura 6	São João da Boa Vista, São Paulo, Brasil: Exemplo de local sem estação METAR	
	ativa.	25
Figura 7	Estrutura de Pastas para Armazenamento de Dados METAR	26
Figura 8	Menu Seletor de Análise.	28
Figura 9	Módulo de Análise Rápida.	29
Figura 10	Tela Inicial do Módulo de Análise Completa.	29
Figura 11	Conjunto de Interfaces Gráficas da Ferramenta.	30
Figura 12	Planilha utilizada para determinar o Polo.	31
Figura 13	Planilha utilizada para encontrar a estação mais próxima.	31
Figura 14	Estação mais próxima calculada.	32
Figura 15	Trecho inicial do código da ferramenta.	33
Figura 16	Trecho do código principal da ferramenta - Tratamento de Temperatura.	34
Figura 17	Primeira Tela de Instalação.	35
Figura 18	Segunda Tela de Instalação.	36
Figura 19	Tela de loading da Instalação.	36
Figura 20	Atalho da planilha após instalação.	37
Figura 21	Premissas utilizadas no software.	38
Figura 22	Saída do software após rodar.	38
Figura 23	Resultado do software de simulação.	39
Figura 24	Comparativo de resultados (SKBO).	39
Figura 25	Comparativo de resultados (LPB).	40
Figura 26	Módulo de Visibilidade do LOPS.	40
Figura 27	Slide com análise de visibilidade.	41
Figura 28	Módulo de relatório do LOPS.	41
Figura 29	Saída do software para o mês de novembro no aeroporto de Brasília.	42
Figura 30	Valores reais do METAR para o mês de novembro no aeroporto de Brasília.	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	METAR	13
2.2	Introdução à Atmosfera Padrão Internacional (ISA)	13
2.2.1	Condições Padrão em Nível do Mar	13
2.2.2	Importância da ISA na Aviação e suas Limitações	14
2.3	QNH e Pressão Atmosférica	14
2.3.1	Cálculo do QNH	15
2.3.2	Aplicações e Importância	15
2.3.3	Diferença entre QNH, QFE e QNE	15
2.4	RVR, Visibilidade e Categorias CAT para Pouso	16
2.4.1	Introdução ao RVR (Runway Visual Range)	16
2.4.2	Métodos de Medição do RVR	16
2.4.3	Visibilidade Operacional	16
2.4.4	Categorias de Aproximação e Pouso (CAT I, CAT II, CAT III)	16
2.5	Distribuições Estatísticas e Observações na Natureza	17
2.5.1	Introdução às Distribuições Estatísticas	17
2.5.2	Distribuições Comuns na Natureza	17
2.5.2.1	Distribuições Circulares	17
2.5.2.1.1	<i>Distribuição de von Mises</i>	18
2.5.2.1.2	<i>Distribuição Circular Uniforme</i>	18
2.5.2.2	Distribuição Normal	18
2.5.2.3	Distribuição Exponencial	18
2.5.3	Aplicações e Relevância	18
2.6	Visual Basic for Applications (VBA) no Excel	19
2.6.1	Benefícios do VBA	19
2.6.2	Arquitetura do Desenvolvimento	20
2.6.3	Aplicações e Relevância	20
2.7	Os efeitos do estado da atmosfera no desempenho de decolagem das aeronaves	21
3	DESENVOLVIMENTO	23
3.1	Objetivos do Sistema	23
3.2	Conceitos Fundamentais e Justificativa - METAR	23
3.2.1	Fonte dos Dados METAR	24
3.2.2	Limitações na Aquisição de Dados	24
3.2.3	Soluções para Limitações na Aquisição de Dados	25

3.3	Desenvolvimento da Ferramenta	25
3.3.1	Estruturação de Pastas	25
3.3.2	Desenvolvimento da Interface Gráfica	27
3.3.2.1	Menu Seletor de Análise	27
3.3.2.2	Módulo de Análise Rápida	28
3.3.2.3	Módulo de Análise Completa	29
3.3.2.4	Outras Interfaces Gráficas	29
3.3.2.5	Integração e Resultados Futuros	30
3.3.3	Desenvolvimento das Planilhas Auxiliares	30
3.3.3.1	Planilha para Determinação de Polo	30
3.3.3.2	Planilha para Triangulação de Estações METAR	31
3.3.3.3	Planilhas para Tratamento de Dados RVR	32
3.3.3.4	Importância das Planilhas Auxiliares	32
3.3.4	Desenvolvimento do Código	33
3.3.4.1	Aplicação de Distribuições Estatísticas	34
3.3.4.2	Conversão de Horários METAR	35
3.3.4.3	Estrutura do Código	35
3.3.4.4	Código de Instalação	35
4	RESULTADOS ALCANÇADOS	38
4.0.1	Casos Reais de Uso	38
4.0.1.1	<i>Range Circle</i> a partir do aeroporto de SKBO (Bogotá, Colômbia)	38
4.0.1.2	<i>Range Circle</i> a partir do aeroporto de LPB (La Paz, Bolívia)	39
4.0.1.3	<i>Case</i> de Visibilidade	40
4.0.2	Funcionalidades Adicionais	41
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Nas análises de performance no setor aeronáutico, é comum que as companhias aéreas solicitem simulações preliminares para verificar se uma aeronave atende aos requisitos mínimos de operação em uma rota específica. Essas análises consideram variáveis fundamentais, como os códigos ICAO/IATA dos aeroportos de origem e destino, condições da pista (comprimento, inclinação e coeficiente de atrito), tipo de motor, modelo da aeronave, peso máximo de decolagem (*MTOW*) e a quantidade de passageiros. No entanto, muitas vezes, variáveis ambientais essenciais, como temperatura, pressão atmosférica, direção e intensidade dos ventos, e condições meteorológicas (*METAR*), não são fornecidas detalhadamente pelo cliente. Nesses casos, valores padrão são assumidos, como ISA +0 para temperatura e pressão e ventos calmos, o que pode não representar a realidade operacional.

A precisão dessas simulações depende diretamente da qualidade e da consistência dos dados utilizados, especialmente para as fases críticas de voo, como *Take-off*, *Cruise* e *Landing*. Dados inconsistentes ou irreais podem levar a estimativas errôneas de desempenho, como consumo de combustível, alcance da aeronave e distâncias necessárias para decolagem e pouso, impactando negativamente o planejamento operacional e a viabilidade econômica. Por exemplo, alterações nas condições atmosféricas, como ventos de proa ou cauda, afetam significativamente o consumo de combustível e a capacidade de carga útil.

Nesse contexto, torna-se imprescindível o desenvolvimento de um software para predição e preenchimento automático de dados *METAR*, com base em modelagem estatística e aprendizado de máquina. Um sistema como esse seria capaz de combinar informações históricas, modelos atmosféricos globais e tendências climáticas para gerar condições realistas de operação, garantindo maior confiabilidade nos cálculos de performance. Além disso, essa ferramenta pode ser integrada a bancos de dados aeronáuticos e sistemas de planejamento de voo, otimizando o fluxo de informações e reduzindo a dependência de valores assumidos, que frequentemente levam a decisões conservadoras e menos eficientes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 METAR

As informações METAR (*Meteorological Aerodrome Report*) são textos padronizados, amplamente empregados globalmente para a disseminação de dados meteorológicos essenciais para a aviação. Normalmente, aeroportos e aeródromos emitem esses relatórios em intervalos, fornecendo dados sobre as condições do tempo, tais como vento, visibilidade, fenômenos meteorológicos, nuvens e temperatura do ar (ICAO, 2018b).

Estas mensagens seguem o formato codificado estabelecido pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), possibilitando sua compreensão e leitura em todo o mundo. O exemplo a seguir ilustra uma mensagem METAR:

```
SBGR 121200Z 18005KT 9895 FEW025 25/17 Q1013
```

Com base nas informações acima, podemos identificar o aeroporto de origem (SBGR - Aeroporto Internacional de Guarulhos), o horário da emissão (121200Z), a direção e a intensidade do vento (18005KT), a visibilidade horizontal (9895 metros), a ausência de nuvens a 2.500 pés (FEW025), a temperatura e o ponto de orvalho (25°C e 17°C, respectivamente), além da pressão atmosférica no nível do mar (Q1013).

As informações do METAR são frequentemente empregadas em sistemas de planejamento de voos, navegação aérea e operações. A normalização permite uma interação eficiente entre vários participantes, tais como empresas aéreas, serviços de controle de tráfego aéreo e meteorologistas (FAA, 2020). Ademais, há sites que armazenam os dados METAR obtidos por estações meteorológicas.

2.2 INTRODUÇÃO À ATMOSFERA PADRÃO INTERNACIONAL (ISA)

Todas as informações apresentadas nesta seção foram extraídas do "Manual do Padrão Atmosférico ICAO (Doc 7488)" (ICAO, 1993). O modelo teórico conhecido como Atmosfera Padrão Internacional (ISA), também conhecido como Atmosfera Padrão Internacional (*International Standard Atmosphere*), foi desenvolvido para uniformizar cálculos e medições relacionados às condições atmosféricas, sendo amplamente utilizado no ramo aeronáutico. A Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO), por meio da ISA, estabelece valores médios de pressão, temperatura, densidade e velocidade do som em várias altitudes, levando em conta condições padrão ao nível do mar e uma diminuição esperada à medida que se sobe de altitude. Esta normalização é comumente utilizada em simulações de performance de aviões, ajuste de instrumentos e planejamento de voo.

2.2.1 Condições Padrão em Nível do Mar

As condições padrão definidas pela ISA em nível do mar são:

- Pressão atmosférica: 1013,25 hPa (ou 29,92 inHg);
- Temperatura: 15°C;
- Densidade do ar: 1,225 kg/m³;
- Aceleração da gravidade: 9,80665 m/s²;
- Velocidade do som: 340,3 m/s.

Esses valores assumem uma atmosfera seca, sem influência de umidade ou outras variáveis atmosféricas e são comumente utilizados quando a companhia aérea não fornece os dados relativos ao aeroporto.

2.2.2 Importância da ISA na Aviação e suas Limitações

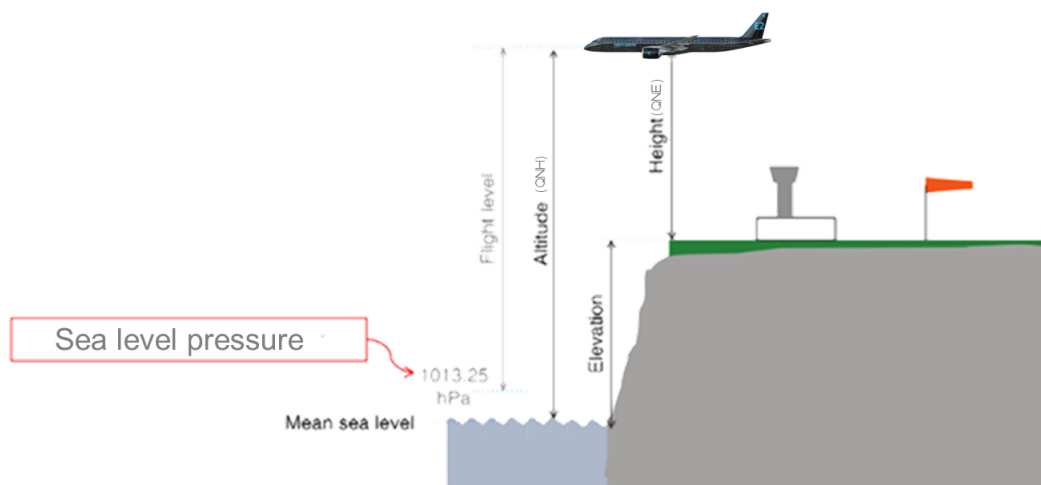
A ISA é crucial na aviação por estabelecer um padrão comum para a avaliação do desempenho das aeronaves, incluindo o consumo de combustível (*Block Fuel*), as velocidades críticas (*V-speeds*) e as distâncias de decolagem (*TODA*, *TORA*) e pouso (*LDA*). Sistemas de orientação e programação de voos também se baseiam nos dados ISA para fazer estimativas de altitude e pressão, quando não empregam técnicas estatísticas que envolvem dados históricos.

No entanto, embora seja eficaz, a ISA é uma simplificação e não espelha as condições meteorológicas autênticas. Por exemplo, elementos como ventos, umidade e variações sazonais podem gerar variações consideráveis que requerem ajustes por meio de sistemas operacionais e previsões mais sofisticadas, como os dados METAR.

2.3 QNH E PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Todas as informações apresentadas nesta seção foram extraídas do livro "Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge." ((FAA), 2016), o QNH é um valor ajustado de pressão atmosférica utilizado no setor aeronáutico para assegurar a segurança e a exatidão da navegação. Normalmente, a pressão atmosférica ao nível do mar é representada ajustada para o local exato onde o avião está, levando em conta as condições climáticas no instante da medição. Pilotos empregam o valor de QNH na configuração dos altímetros, assegurando que os aparelhos revelem a altitude de forma precisa em relação ao nível médio do mar.

Figura 1 – Exemplificação de QNH.



fonte: Produção do próprio autor.

2.3.1 Cálculo do QNH

O QNH é derivado da pressão atmosférica medida no aeródromo (pressão QFE, no caso da imagem concide com o QNE) e ajustado com base na altitude do aeródromo acima do nível do mar. A relação pode ser expressa pela fórmula:

$$QNH = QFE + \left(\frac{\Delta h}{8,7}\right) \quad (1)$$

Onde:

QFE: Pressão atmosférica no nível do aeródromo (em hPa);

Δh : Altitude do aeródromo em pés.

2.3.2 Aplicações e Importância

O ajuste correto do valor de QNH é crucial para a separação vertical entre aeronaves, especialmente em aproximações e pousos. Quando todos os pilotos na região utilizam o mesmo QNH, os altímetros de todas as aeronaves indicam alturas relativas coerentes, além de ser um indicativo crucial para as simulações de performance.

2.3.3 Diferença entre QNH, QFE e QNE

- QNH: Pressão ao nível do mar ajustada para o aeródromo.
- QFE: Pressão real no ponto de medição (normalmente a cabeceira da pista).
- QNE: Pressão padrão ISA (1013,25 hPa), utilizada acima da Altitude de Transição.

2.4 RVR, VISIBILIDADE E CATEGORIAS CAT PARA POUSO

2.4.1 Introdução ao RVR (Runway Visual Range)

O **Range Visual da Pista (RVR)** é um indicador que estabelece a máxima distância que um piloto pode ver as luzes ou sinais da pista em situações de pouca visibilidade. Esta ação é crucial para assegurar a segurança nas operações de pouso e decolagem, particularmente em situações de neblina, chuva forte ou neve (ICAO, 2018a). O RVR é medido em metros e determinado por sensores de tempo automáticos posicionados de forma estratégica ao longo da pista (ADMINISTRATION, 2017).

2.4.2 Métodos de Medição do RVR

A mensuração do RVR é realizada através de transmissômetros ou sistemas de processamento de imagem, que medem a intensidade da luz dispersa no ar. As avaliações ocorrem em três locais específicos da pista (ICAO, 2018a):

- **Touchdown Zone:** Perto do local onde as rodas são tocadas pela primeira vez.
- **MID (Middle Zone):** Área de transição na pista.
- **END (Zona de Rolagem):** Perto do término da pista.

Para propósitos operacionais, o valor mais baixo obtido nessas três medições é usado como padrão.

2.4.3 Visibilidade Operacional

Visibilidade é o parâmetro que especifica a maior distância que um objeto pode ser visualmente reconhecido sob determinadas condições climáticas (JEPPESEN, 2021). Pode ser categorizada como:

- **Visão Horizontal:** Extensão avaliada ao longo da superfície do planeta.
- **Visão Vertical:** Distância até a superfície das nuvens.

Apesar da importância da visibilidade geral, o RVR é mais crucial para as operações de aeroporto, uma vez que espelha diretamente as condições na pista (ICAO, 2018a).

2.4.4 Categorias de Aproximação e Pouso (CAT I, CAT II, CAT III)

As categorias de aproximação baseadas no *Instrument Landing System* (ILS) definem os mínimos operacionais para pouso em condições de baixa visibilidade (ADMINISTRATION, 2017):

- **CAT I:**
 - Altura de decisão (DH): 200 pés (60 metros).
 - RVR mínimo: 550 metros.
- **CAT II:**

- Altura de decisão: 100 pés (30 metros).
- RVR mínimo: 300 metros.
- **CAT III:**
 - CAT IIIA: DH menor que 100 pés, RVR mínimo de 200 metros.
 - CAT IIIB: DH menor que 50 pés, RVR mínimo de 75 metros.
 - CAT IIIC: Sem DH e sem limite mínimo de RVR.

Essas categorias garantem a segurança operacional em condições adversas e são indispensáveis em aeroportos de alta complexidade (ICAO, 2018a).

2.5 DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS E OBSERVAÇÕES NA NATUREZA

2.5.1 Introdução às Distribuições Estatísticas

As distribuições estatísticas são representações algébricas que ilustram a variação dos dados em fenômenos naturais e científicos. Elas possibilitam a modelagem da variabilidade e a previsão da ocorrência de eventos com base em padrões probabilísticos (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

Matematicamente, uma distribuição estatística é definida por uma função densidade de probabilidade $f(x)$, que satisfaz as seguintes propriedades fundamentais:

$$f(x) \geq 0, \quad \text{para todo } x \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (3)$$

Estas condições garantem que $f(x)$ não seja negativa e que a área total sob a curva seja igual a 1, simbolizando a totalidade das probabilidades (RICE, 2006).

2.5.2 Distribuições Comuns na Natureza

São frequentemente usadas várias distribuições para modelar fenômenos naturais. Dentre as mais comuns, merecem destaque:

2.5.2.1 Distribuições Circulares

As distribuições circulares são essenciais para modelar dados com periodicidade ou orientação, tais como a direção do vento, a duração do dia (em horas) ou os ângulos de fenômenos físicos, (MARDIA; JUPP, 2000). Ao contrário das distribuições lineares, as não lineares são estabelecidas em um intervalo finito e cíclico, normalmente $[0, 2\pi)$ ou $[0, 360^\circ)$.

A função densidade de probabilidade (PDF) de uma variável circular θ deve satisfazer:

$$f(\theta) \geq 0, \quad \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta = 1 \quad (4)$$

Entre as distribuições circulares mais comuns estão:

2.5.2.1.1 Distribuição de von Mises

A distribuição de von Mises, também conhecida como a "normal circular", é amplamente usada para modelar direções. Sua densidade é:

$$f(\theta|\mu, \kappa) = \frac{e^{\kappa \cos(\theta - \mu)}}{2\pi I_0(\kappa)}, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad (5)$$

onde: - μ é a direção média, - $\kappa \geq 0$ é o parâmetro de concentração (quanto maior, mais concentrada a distribuição em torno de μ), - $I_0(\kappa)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero.

Quando $\kappa = 0$, a distribuição se torna uniforme no círculo. Para $\kappa > 0$, a concentração ao redor de μ aumenta (MARDIA; JUPP, 2000).

2.5.2.1.2 Distribuição Circular Uniforme

É usada quando não há preferências por nenhuma direção. Sua PDF é:

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad (6)$$

2.5.2.2 Distribuição Normal

A **distribuição normal**, ou Gaussiana, é descrita pela função:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

onde μ é a média e σ o desvio padrão (RICE, 2006).

2.5.2.3 Distribuição Exponencial

Modela o tempo entre eventos sucessivos, como descargas elétricas:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0 \quad (8)$$

onde $\lambda > 0$ é a taxa de ocorrência do evento (MONTGOMERY; RUNGER, 2018).

2.5.3 Aplicações e Relevância

Na aviação, as estatísticas, incluindo as circulares, possuem impacto direto na segurança operacional:

- **Padrões de vento predominante:** Utilização de distribuições circulares (como von Mises) para modelar direções de vento em aeroportos.
- **Previsão de gelo:** Utilização da distribuição normal para prever temperaturas críticas.

- **Modelagem de tempestades:** Uso da distribuição exponencial para modelar intervalos de tempo entre raios.

Por exemplo, ao modelar a direção do vento utilizando a distribuição de Von Mises, a chance de o vento se situar em um intervalo $[a, b]$ é calculada pela seguinte fórmula:

$$P(a \leq \theta \leq b) = \int_a^b \frac{e^{\kappa \cos(\theta - \mu)}}{2\pi I_0(\kappa)} d\theta \quad (9)$$

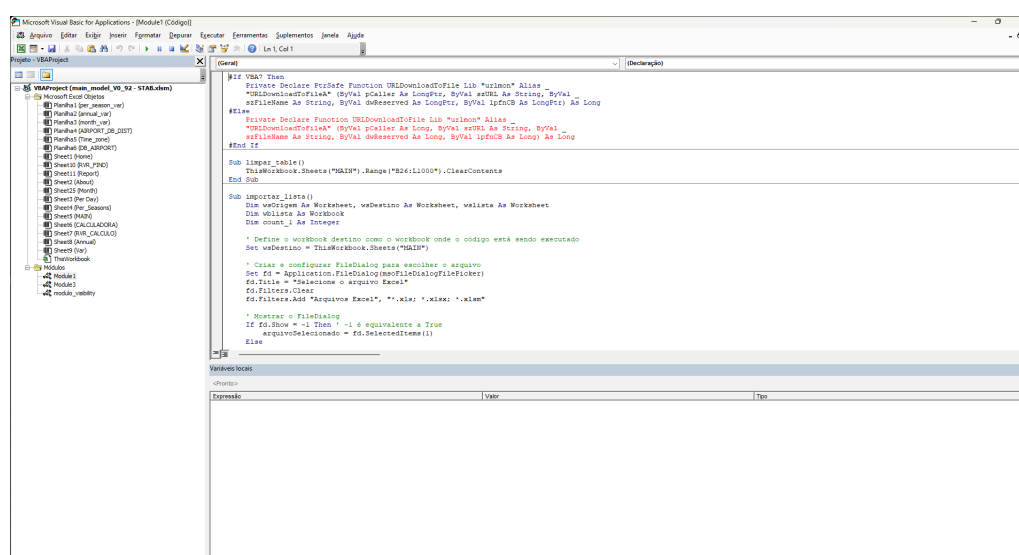
Essas avaliações melhoram a segurança e eficácia, oferecendo instrumentos preditivos para eventos críticos.

2.6 VISUAL BASIC FOR APPLICATIONS (VBA) NO EXCEL

O Microsoft Excel é um instrumento frequentemente usado para manipular dados, realizar cálculos e automatizar tarefas em vários cenários. A sua interface intuitiva facilita o acesso a usuários de todas as habilidades, desde os mais novos até os mais experientes. Ademais, os estudantes da UNESP possuem acesso gratuito ao Excel, o que o torna uma opção prática e acessível para a criação de ferramentas e programas personalizados.

Uma das funcionalidades mais poderosas do Excel é a sua integração com o *Visual Basic for Applications (VBA)*, uma linguagem de programação incorporada que possibilita a automação de tarefas repetitivas, a elaboração de formulários interativos e a customização de funções particulares. O VBA oferece um ambiente sólido para a criação de macros, que podem ser ativadas diretamente nas planilhas ou através de botões interativos, conforme demonstrado na Figura [Figura 2](#).

Figura 2 – Interface inicial do VBA com trecho do código.



fonte: Produção do próprio autor.

2.6.1 Benefícios do VBA

O VBA é uma linguagem de programação orientada a eventos, permitindo a resposta a ações do usuário, como toques em botões ou modificações em células. Os principais benefícios de utilizar VBA

no Excel incluem:

- **Automação de tarefas repetitivas:** Reduzindo o tempo e os erros associados à manipulação manual de dados (WALKENBACH, 2013).
- **Personalização de funcionalidades:** Permite criar funções específicas que não estão disponíveis no Excel padrão.
- **Interatividade:** Possibilita a criação de interfaces gráficas para melhorar a experiência do usuário.
- **Integração com outras ferramentas:** O VBA pode interagir com outros programas do pacote Office, como Word e Access, aumentando a versatilidade (BULLEN; GREEN, 2009).

2.6.2 Arquitetura do Desenvolvimento

O desenvolvimento desta ferramenta ocorreu totalmente no contexto do Excel, empregando a linguagem VBA como principal. O código foi organizado em módulos, cada um focado em funções particulares, tais como validação de dados, realização de cálculos e produção de relatórios.

- **Módulos de Função:** Contêm as funções principais utilizadas para cálculos e manipulação de dados.
- **Macros Globais:** Automatizam tarefas comuns, como consolidação de dados e formatação de relatórios.

2.6.3 Aplicações e Relevância

A decisão de utilizar o VBA como linguagem principal neste projeto foi impulsionada pela sua compatibilidade nativa com o Excel e pela vasta documentação disponível, simplificando o aprendizado e a execução (PASSEY, 2017). Este ambiente mostrou-se apropriado para solucionar questões específicas que necessitam de automação, tais como:

- Análise de grandes volumes de dados com cálculos complexos.
- Geração de relatórios dinâmicos em formatos customizados.
- Validação e correção automática de inconsistências em planilhas.

O emprego do VBA no Excel provou ser uma alternativa eficaz e prática, particularmente em ambientes acadêmicos e corporativos onde a facilidade de uso e a automação são fundamentais e por isso foi amplamente utilizado nesse trabalho.

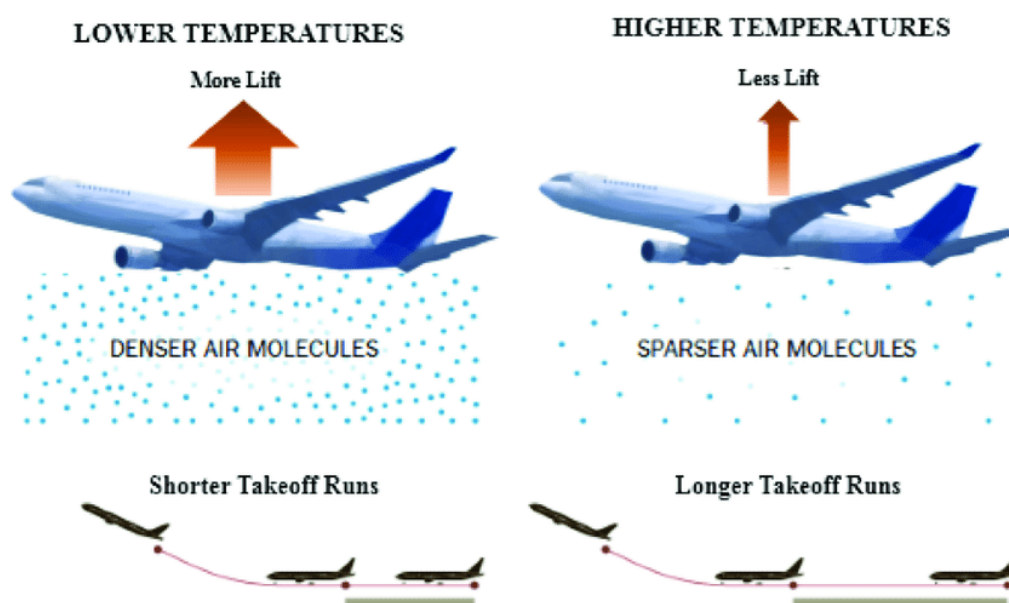
2.7 OS EFEITOS DO ESTADO DA ATMOSFERA NO DESEMPENHO DE DECOLAGEM DAS AERONAVES

Esse trabalho tem como foco melhorar as análises de performance de aeronaves, focando na decolagem. O *Take-off* é conduzido com base na velocidade indicada (*Indicated Airspeed - IAS*) exibida no indicador de velocidade. Na ausência de erros no sistema Pitot-estático, a IAS será equivalente à velocidade equivalente (*Equivalent Airspeed - EAS*), uma vez que a decolagem ocorre em baixas velocidades e altitudes, onde a correção de altitude na escala é insignificante (ANDERSON, 1999). No entanto, as distâncias de decolagem dependem da velocidade verdadeira (*True Airspeed - TAS*), já que são determinadas pelo movimento da aeronave em relação ao solo. A distância percorrida no solo é proporcional à TAS, que, por sua vez, é inversamente proporcional à densidade relativa do ar. Isso implica que, em condições de altas temperaturas ou altitudes elevadas (baixa pressão relativa), a distância de rolagem no solo aumentará, pois a TAS necessária para atingir uma determinada EAS, determinada pelo peso da aeronave, será maior (RAYMER, 2018).

O desempenho do grupo motopropulsor (*powerplant*) é aproximadamente proporcional à densidade relativa, pois a performance do motor depende do fluxo de massa de ar. Consequentemente, a tração líquida (*net thrust*) diminui em condições de altas temperaturas ou altitudes elevadas, aumentando ainda mais a distância de decolagem. A magnitude desse efeito varia de acordo com as características específicas do motor utilizado (SOBIECZKY, 1998).

Para mitigar o aumento na distância de decolagem em condições de calor ou alta altitude, uma solução comum é reduzir significativamente a carga útil da aeronave. Ao diminuir o peso total, a velocidade e a distância necessárias para a decolagem podem ser reduzidas, melhorando a capacidade da aeronave de decolar dentro do comprimento disponível da pista. Esse comprometimento é frequentemente necessário para garantir operações seguras em rotas caracterizadas por altas temperaturas ou altitudes elevadas (ROSKAM, 2000).

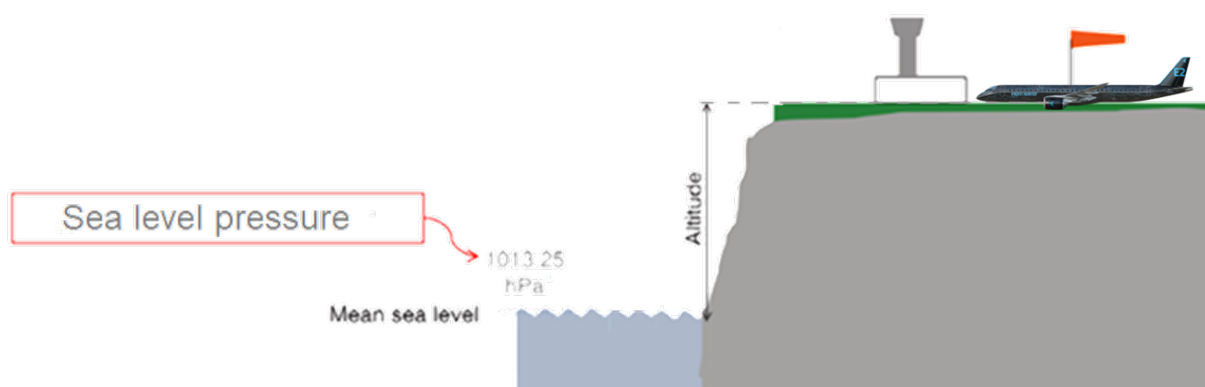
Figura 3 – Representação de como a temperatura afeta a decolagem.



fonte: (THE...)

Softwares para simulação de performance utilizados pelas fabricantes de aeronaves costumam utilizar 1013 hPa como valor de QNH padrão e temperatura em ISA 0, caso não seja feito um estudo antes sobre o aeroporto utilizado, conforme ilustrado na imagem a abaixo, a situação para o valor de QNH igual a 1013 hPa não costuma corresponder a realidade, pois ela desconsidera a altitude do aeroporto.

Figura 4 – Situação de decolagem.



fonte: Produção do próprio autor.

3 DESENVOLVIMENTO

A principal meta do desenvolvimento da ferramenta sugerida foi desenvolver um sistema sólido para a recolha e avaliação de dados históricos METAR, abrangendo os últimos cinco anos. O sistema foi projetado para utilizar distribuições estatísticas na previsão de intervalos de probabilidade das condições meteorológicas, fornecendo subsídios essenciais para avaliações de desempenho na aviação. A base do projeto se fundamenta em princípios estatísticos robustos e na utilização de dados climáticos fiáveis, assegurando resultados exatos e pertinentes.

Ao longo do desenvolvimento, surgiu a necessidade de nomear a ferramenta, que recebeu o nome de **Long-term Observational and Predictive Statistics (LOPS)**. O nome espelha a principal ênfase do sistema: monitoramento a longo prazo e estatísticas preditivas para apoiar operações e decisões no setor aeronáutico. Para atingir as metas definidas, foram estabelecidos os requisitos definidos na próxima seção.

3.1 OBJETIVOS DO SISTEMA

O desenvolvimento do LOPS seguiu as orientações a seguir, visando satisfazer as necessidades particulares de análise meteorológica no ambiente aeronáutico:

- **Facilidade de uso:** Desenvolver uma interface intuitiva e acessível, permitindo que usuários de diferentes níveis de experiência possam utilizar a ferramenta de forma eficaz.
- **Aquisição de dados global:** Garantir a capacidade de adquirir dados METAR referentes aos últimos cinco anos de qualquer localidade do mundo, possibilitando análises abrangentes e confiáveis.
- **Armazenamento eficiente:** Implementar métodos eficientes de armazenamento dos dados adquiridos, garantindo acesso rápido e organização clara para futuras consultas e análises.
- **Tratamento estatístico avançado:** Desenvolver algoritmos capazes de processar os dados históricos utilizando métodos estatísticos robustos, fornecendo *outputs* que reflitam condições meteorológicas próximas à realidade. Esses resultados são essenciais para cálculos precisos de performance de aeronaves.
- **Modularidade para expansões futuras:** Estruturar o sistema de forma modular, permitindo a adição de novas funcionalidades e a integração com outros sistemas no futuro, sem comprometer a arquitetura existente.

3.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS E JUSTIFICATIVA - METAR

A implementação do LOPS está em sintonia com as demandas crescentes do setor aeronáutico, onde a exatidão na previsão do tempo e a compreensão das condições passadas são elementos cruciais

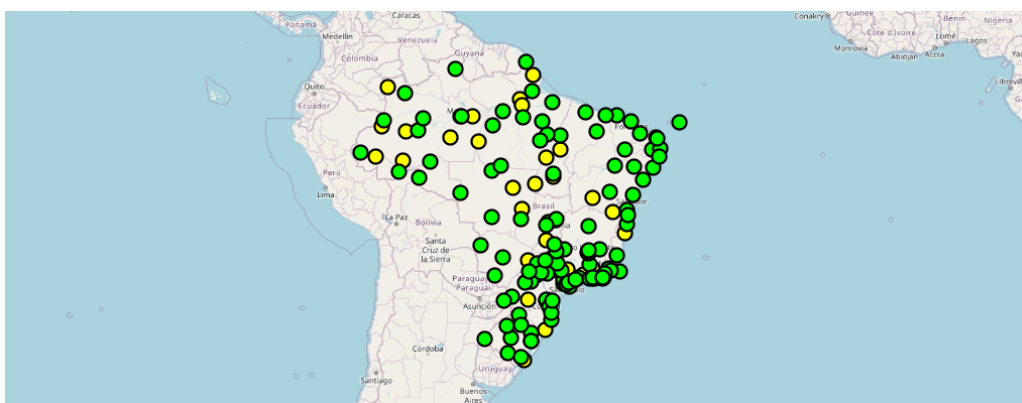
para a segurança e eficácia operacional. A escolha de dados METAR como alicerce do sistema é justificada pela sua normalização internacional, confiabilidade e alcance mundial.

3.2.1 Fonte dos Dados METAR

Para assegurar a precisão e a extensão dos dados empregados, optou-se por fontes de confiança, como os registros de várias estações meteorológicas fornecidos pela *Iowa State University* ([WEB-SITE...](#)). Esta plataforma permite o acesso a dados METAR de praticamente todas as partes do mundo, contendo informações minuciosas sobre variáveis meteorológicas, tais como temperatura, pressão, visibilidade e direção do vento, fundamentais para a modelagem estatística e previsão.

A Figura [Figura 5](#) apresenta a localização das estações METAR no Brasil, ressaltando a extensa abrangência geográfica. Esses dados são frequentemente empregados em estudos científicos, previsão do tempo e operações de aviação, graças à sua uniformidade e regularidade, seguindo as orientações da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) ([ICAO, 2018b](#)).

Figura 5 – Estações METAR no Brasil.

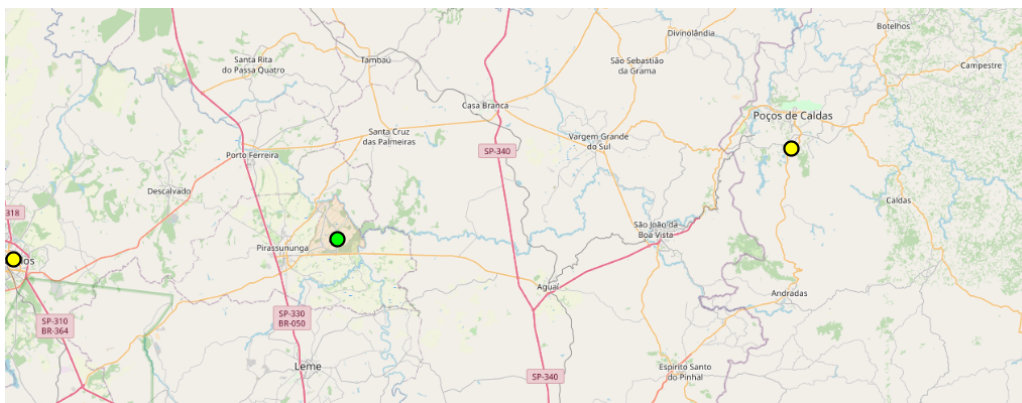


fonte: *Iowa State University*.

3.2.2 Limitações na Aquisição de Dados

Apesar da ampla cobertura dos dados METAR, algumas restrições são claras, particularmente em áreas menores ou isoladas. Por exemplo, ao analisar o aeroporto de São João da Boa Vista, localizado em São Paulo, Brasil, nota-se que não existe uma estação METAR em funcionamento nessa localidade (Figura [Figura 6](#)). Esta falta de informações pode prejudicar a avaliação minuciosa de regiões específicas, particularmente em regiões com grande variabilidade climática.

Figura 6 – São João da Boa Vista, São Paulo, Brasil: Exemplo de local sem estação METAR ativa.



fonte: Iowa State University.

Ademais, as estações destacadas em amarelo no mapa simbolizam estações METAR que não estão mais recolhendo dados desde um período específico. Este fenômeno pode ser ligado a aspectos econômicos, alterações na infraestrutura dos aeroportos ou transições para tecnologias alternativas (FAA, 2020).

3.2.3 Soluções para Limitações na Aquisição de Dados

Para mitigar as limitações observadas, foi implementada uma metodologia baseada na triangulação geográfica. Essa abordagem consiste em:

- **Triangulação de Estações Próximas:** Identificar estações METAR ativas mais próximas de uma localidade de interesse, utilizando suas coordenadas geográficas.
- **Interpolação de Dados:** Quando possível, combinar os dados das estações mais próximas para estimar as condições meteorológicas no local alvo.
- **Planilhas Auxiliares:** Desenvolvimento de planilhas que calculam automaticamente as distâncias entre as estações disponíveis e o local de interesse, classificando-as em ordem de proximidade.

Esta tática não só possibilita ultrapassar a falta de estações em certas áreas, como também aumenta a confiabilidade dos dados usados em análises futuras. Nos capítulos subsequentes, a metodologia será aprofundada, porém não será possível entrar em detalhes, pois infelizmente os detalhes dos algoritmos e cálculos associados à triangulação e interpolação de posição, por terem sido desenvolvido durante o meu estágio na Embraer, são de uso restrito da empresa.

3.3 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

3.3.1 Estruturação de Pastas

Foi estabelecida uma estrutura de pastas no computador local para o armazenamento e organização dos dados METAR. Esta estrutura foi concebida para aprimorar o acesso aos dados e assegurar sua disponibilidade para estudos futuros, mesmo em circunstâncias onde os dados originais sejam

eliminados da fonte online. Ademais, o armazenamento local possibilita uma execução mais eficaz da ferramenta, eliminando a necessidade de baixar os mesmos dados novamente, diminuindo o tempo e o uso de recursos.

A Figura **Figura 7** ilustra a estrutura hierárquica das pastas utilizadas.

Figura 7 – Estrutura de Pastas para Armazenamento de Dados METAR

 Assumptions	15/11/2024 22:24	Pasta de arquivos	
 Documentation	15/11/2024 22:24	Pasta de arquivos	
 Station	15/11/2024 21:16	Pasta de arquivos	
 temp	15/11/2024 21:16	Pasta de arquivos	
 Fast Analysis LOPS	11/11/2024 15:47	Planilha Habilidad...	14,160 KB
 LOPS Launcher	07/11/2024 12:43	Planilha Habilidad...	20 KB
 LOPS	11/11/2024 10:57	Planilha Habilidad...	36,801 KB

fonte: Produção do próprio autor.

Cada pasta possui uma função específica e armazena um tipo determinado de arquivo, conforme descrito a seguir:

- **Assumptions:** Pasta dedicada ao armazenamento dos *outputs* gerados pela ferramenta. Esses arquivos são utilizados em simulações de performance realizadas em software proprietário da Embraer. A integridade desses dados é essencial para garantir análises precisas nas etapas subsequentes.
- **Documentation:** Contém a documentação da ferramenta, incluindo um guia detalhado de uso e explicações sobre sua aplicação e relevância. Essa pasta é essencial para garantir que novos usuários compreendam o propósito e a funcionalidade do sistema.
- **Station:** Armazena os dados das estações METAR. Inicialmente, foi identificado que o armazenamento dos dados de todos os aeroportos do mundo poderia ocupar até 1 TB de espaço. Esse problema foi resolvido com a implementação de um código eficiente de filtragem e seleção de dados relevantes, o qual será detalhado nos capítulos subsequentes.
- **temp:** Armazena os dados das estações METAR temporariamente.

Além da organização das pastas, os arquivos mais importantes usados pela ferramenta foram classificados de acordo com suas funções particulares. Segue a descrição dos principais arquivos e suas finalidades:

- **FAST Analysis LOPS:** Arquivo do Excel responsável por realizar uma análise rápida dos dados METAR. É especialmente útil para simulações de performance que demandam agilidade, utilizando *outputs* previamente gerados.

- ***LOPS Launcher***: Arquivo que funciona como um menu seletor, permitindo que o usuário escolha entre realizar uma análise rápida ou uma análise completa. Essa interface facilita a navegação e a operação da ferramenta, mesmo para usuários com pouca experiência.
- ***LOPS***: Arquivo principal para análise completa dos dados METAR. Ele é projetado para realizar cálculos mais detalhados, fornecendo resultados robustos e abrangentes para as simulações.

A organização de pastas e arquivos mencionada anteriormente não só simplifica a gestão e o acesso aos dados, como também assegura a continuidade do funcionamento do software em circunstâncias de indisponibilidade da fonte online. A estruturação clara e eficaz diminui a chance de perda de informações e aumenta consideravelmente a produtividade dos utilizadores.

Este mecanismo assegura que o instrumento cumpra os critérios de confiabilidade, escalabilidade e acessibilidade, componentes cruciais para usos no setor aeronáutico.

3.3.2 Desenvolvimento da Interface Gráfica

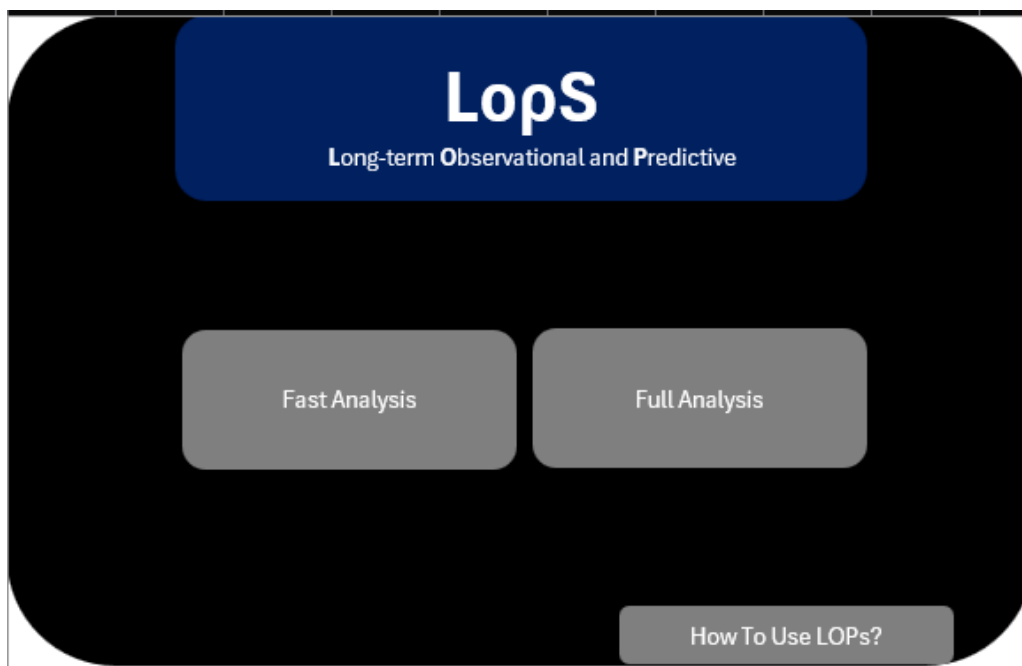
O trabalho de criação da interface gráfica do usuário (GUI) foi conduzido com a finalidade de proporcionar uma experiência intuitiva e útil. Para alcançar isso, foram adotadas medidas específicas no design, como a aplicação de tons de cinza em campos editáveis e áreas interativas, com o objetivo de realçar as funções acessíveis sem prejudicar a usabilidade. Esta estratégia reduz falhas do usuário ao interagir com a ferramenta, mantendo intacta a lógica de funcionamento do sistema.

As interfaces visuais foram criadas com base em uma lógica programável bem organizada, possibilitando que os usuários se movam com facilidade entre os módulos e executem análises de forma eficaz. Seguem abaixo as principais interfaces e suas funcionalidades, dispostas na sequência lógica de utilização.

3.3.2.1 Menu Seletor de Análise

A ferramenta inicia com o Menu Seletor de Análise, conforme mostrado na Figura **Figura 8**. Nesta página, o usuário tem a opção de selecionar entre as diversas análises disponíveis ou consultar a documentação do software, chamada "LOPS". Esta funcionalidade organiza o acesso às operações essenciais, tornando o uso mais fácil até para usuários com experiência limitada.

Figura 8 – Menu Seletor de Análise.



fonte: Produção do próprio autor.

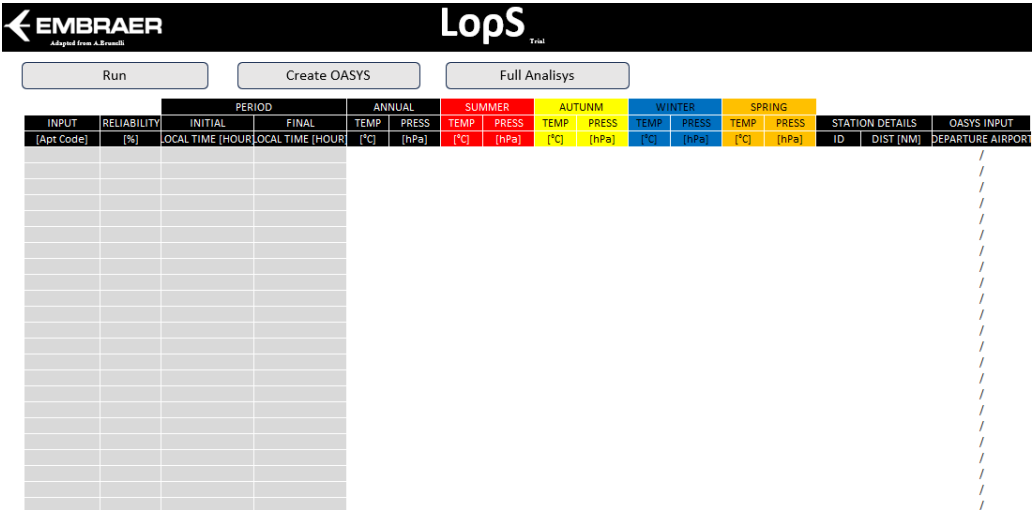
3.3.2.2 Módulo de Análise Rápida

A Figura Figura 9 ilustra o Módulo de Análise Rápida, uma modificação de uma planilha já existente na organização, voltada para a inclusão de dados meteorológicos em programas de simulação de desempenho. Este módulo foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar rapidez na produção de resultados, possuindo as seguintes funcionalidades principais:

- **Botão "Create OASYS"**: Gera uma *assumption* no formato XML, que pode ser importada diretamente no software de simulação.
- **Botão "Run"**: Executa a análise rápida com os parâmetros fornecidos.
- **Botão "Full Analysis"**: Redireciona o usuário para o módulo de análise completa.

As células brancas representam *outputs* (resultados gerados pela ferramenta), enquanto as células cinza indicam *inputs* que devem ser preenchidos antes de iniciar a execução da análise.

Figura 9 – Módulo de Análise Rápida.

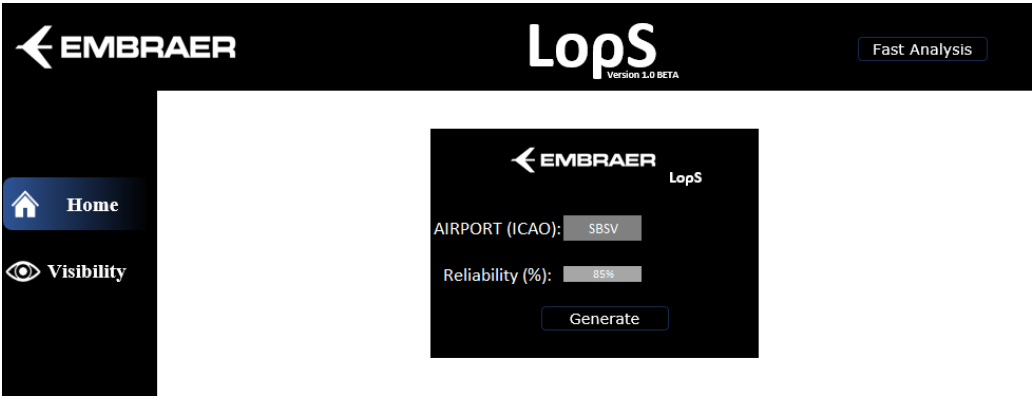


fonte: Produção do próprio autor.

3.3.2.3 Módulo de Análise Completa

A análise completa pode ser acessada através do Módulo de Análise Rápida, oferecendo uma avaliação minuciosa dos dados METAR. A Figura Figura 10 mostra a interface inicial deste módulo, permitindo ao usuário ajustar parâmetros avançados e analisar os resultados de forma detalhada.

Figura 10 – Tela Inicial do Módulo de Análise Completa.

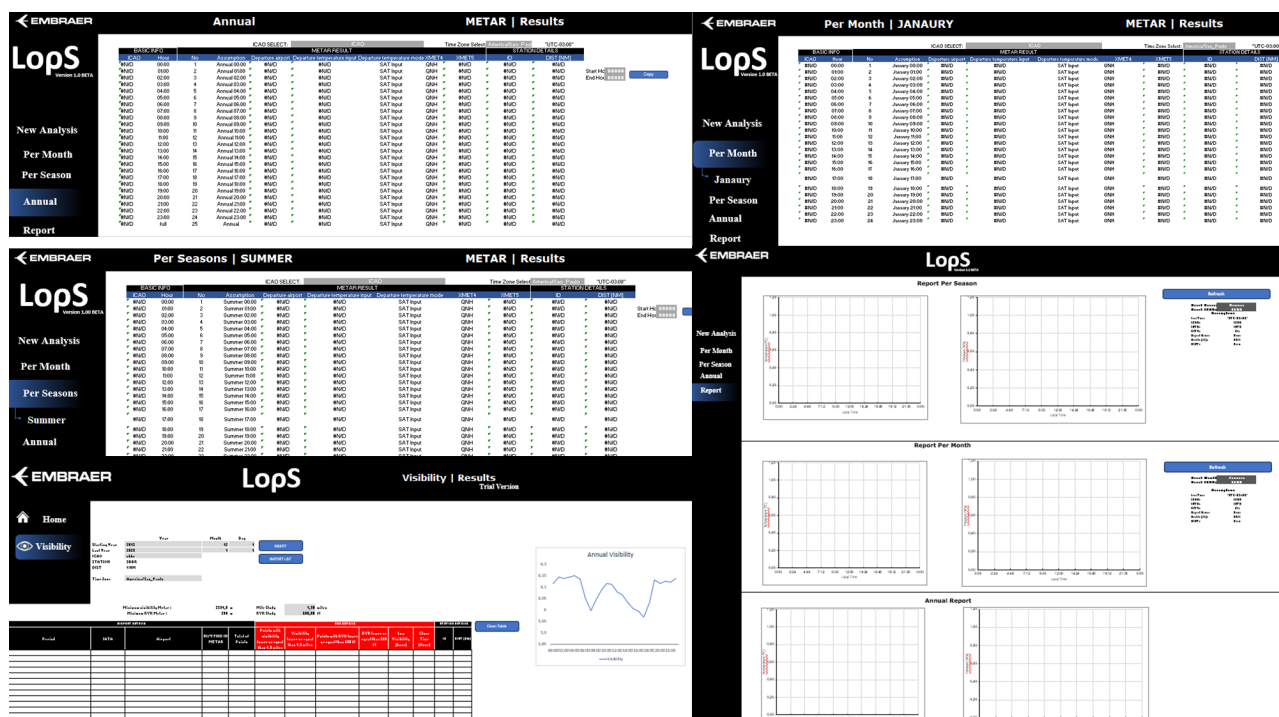


fonte: Produção do próprio autor.

3.3.2.4 Outras Interfaces Gráficas

A ferramenta também possui diversas interfaces voltadas para a produção de relatórios e a avaliação da visibilidade. Essas interfaces são desenvolvidas para satisfazer requisitos específicos, tais como a visualização de gráficos, tabelas de resultados e dados pertinentes para a tomada de decisões. A Figura Figura 11 mostra a totalidade das interfaces gráficas, incluindo o módulo de avaliação de visibilidade.

Figura 11 – Conjunto de Interfaces Gráficas da Ferramenta.



fonte: Produção do próprio autor.

3.3.2.5 Integração e Resultados Futuros

Os exemplos de resultados produzidos pela ferramenta serão apresentados nas próximas seções. A combinação das interfaces gráficas com a lógica programável básica possibilita uma avaliação fluida e eficaz dos dados METAR.

Seguindo as melhores práticas de design de interfaces gráficas (NIELSEN, 2010), estas Interfaces Gráficas de Usuário foram criadas para equilibrar simplicidade e funcionalidade, assegurando uma experiência de usuário intuitiva e eficiente.

3.3.3 Desenvolvimento das Planilhas Auxiliares

O processamento integral dos dados através do VBA resultaria em uma grande carga computacional, prejudicando a eficácia da ferramenta. Para minimizar essa questão, planilhas auxiliares foram criadas para desempenhar funções específicas na organização e no pré-processamento dos dados. Nesta seção, as principais planilhas e suas funções serão detalhadas.

3.3.3.1 Planilha para Determinação de Polo

A classificação adequada dos aeródromos com base no hemisfério (norte ou sul) é crucial para a determinação dos valores meteorológicos conforme as estações do ano. Para tal, elaborou-se uma planilha que atua como um banco de dados, contendo dados sobre todos os aeródromos globais, abrangendo:

- Códigos ICAO e IATA;

- Coordenadas de latitude e longitude;
- *Timezones* associados.

A Figura **Figura 12** ilustra a organização da planilha empregada para esse propósito. Esta base de dados habilita o sistema a reconhecer rapidamente o hemisfério de cada aeródromo e a ajustar os cálculos sazonais de forma exata.

Figura 12 – Planilha utilizada para determinar o Polo.

gps_code lata_code	lata_code gps_code	IATA	ICAO	AIRPORT	gps_code	North	SUL	latitude_deg	timeZone	UTC offset	val
20A	00A	B5B	sbbz	PRES JUSC South	00A	North		40,07299	Africa/Algiers	"UTC+01:00"	+01
20AA	00AA				00AA	North		38,70402	Africa/Cairo	"UTC+02:00"	+02
20AK	00AK				00AK	North		59,94773	Africa/Casablanca	"UTC+01:00"	+01
20AL	00AL				00AL	North		34,8648	Africa/Harare	"UTC+02:00"	+02
20AN	00AN				00AN	North		59,09329	Africa/Monrovia	"UTC+00:00"	+00
20AR	00AR				00AR	North		35,6087	Africa/Nairobi	"UTC+03:00"	+03
20AS	00AS				00AS	North		34,9428	Africa/Tripoli	"UTC+02:00"	+02
20AZ	00AZ				00AZ	North		34,3056	Africa/Windhoek	"UTC+02:00"	+02
20CA	00CA				00CA	North		35,35474	America/Anchorage	"UTC-08:00"	-08
20CL	00CL				00CL	North		39,42719	America/Asuncion	"UTC-03:00"	-03
20CN	00CN				00CN	North		32,72737	America/Bahia	"UTC-03:00"	-03
20CO	00CO				00CO	North		40,6222	America/Belize	"UTC-06:00"	-06
20FA	00FA				00FA	North		28,6455	America/Bogota	"UTC-05:00"	-05
20FD	00FD				00FD	North		28,8466	America/Buenos_Aires	"UTC-03:00"	-03
20FL	00FL				00FL	North		27,2309	America/Caracas	"UTC-04:30"	-04
20GA	00GA				00GA	North		33,7675	America/Cayenne	"UTC-03:00"	-03
20GE	00GE				00GE	North		33,80798	America/Chicago	"UTC-05:00"	-05
20HI	00HI				00HI	North		19,83288	America/Chihuahua	"UTC-06:00"	-06
20ID	00ID				00ID	North		48,1453	America/Cuiaba	"UTC-04:00"	-04
20IG	00IG				00IG	North		39,72403	America/Denver	"UTC-06:00"	-06
20II	00II				00II	North		41,6445	America/Godthab	"UTC-02:00"	-02
20IL	00IL				00IL	North		41,9784	America/Halifax	"UTC-03:00"	-03
20IN	00IN				00IN	North		41,5114	America/Indiana/Indianapolis	"UTC-04:00"	-04
20IS	00IS				00IS	North		40,0256	America/Jamaica	"UTC-05:00"	-05
20KS	00KS				00KS	North		38,7278	America/Los_Angeles	"UTC-07:00"	-07
20KY	00KY				00KY	North		37,4094	America/Manaus	"UTC-04:00"	-04
20LA	00LA				00LA	North		30,19194	America/Mexico_City	"UTC-05:00"	-05
20LL	00LL				00LL	North		39,6653	America/Montevideo	"UTC-03:00"	-03
20LS	00LS				00LS	North		30,1363	America/New_York	"UTC-04:00"	-04
20MD	00MD				00MD	North		38,7571	America/Noronha	"UTC-02:00"	-02
20MI	00MI				00MI	North		43,9494	America/Phoenix	"UTC-07:00"	-07
20MN	00MN				00MN	North		46,3	America/Regina	"UTC-06:00"	-06

fonte: Produção do próprio autor.

3.3.3.2 Planilha para Triangulação de Estações METAR

Como mencionado na seção anterior, a falta de estações meteorológicas em certos aeródromos requer um cálculo para determinar a estação mais próxima ainda em operação. Para essa atividade, elaborou-se uma planilha que inclui:

- Base de dados de todas as estações meteorológicas fornecidas pela *Iowa State University*;
- Coordenadas de localização de todos os aeroportos e aeródromos do mundo.

A Figura **Figura 13** demonstra a organização desta planilha. O sistema emprega essas informações para determinar as distâncias entre aeródromos e estações meteorológicas, determinando a estação mais próxima.

Figura 13 – Planilha utilizada para encontrar a estação mais próxima.

DATABASE - STATIONS											
https://mesonet.agron.iastate.edu/sites/networks.php?network= ALL &format=csv&nohtml=on											
ID	Station Name	Latitude [m]	Longitude [m]	Elevation [m]	Archive Start	Archive Ends	ICM Network	Station ID	Airport	sbbz	lata_code
C0126	8135015 RIO BLANCO	39,6956	-107,59	2217	16/ago/17		CO_RWIS	4727,416			00A
C0150	0.15 mi N of Alameda	39,71298	-105,00041	1594,4	19/dez/18		CO_RWIS	4634,385			00AA
C0188	0.1 mi S of 84th Ave	39,84075	-104,98337	1604	19/dez/18		CO_RWIS	4618,301			00AK
H0944	0.2 MI E OF HARRISON P.O. PASSIAK RVR	40,75	-74,1133	1	06/ago/10		NL_COOP	809,9			00AL
C0183	0.2 mi W of I-225	39,64095	-104,91108	1706,2	19/ago/18		CO_RWIS	4608,544			00AN
C0134	0.3 mi E of 112th Ave	39,89768	-105,07941	1645	19/dez/18		CO_RWIS	4623,604			00AR
C0144	0.3 MI E OF FALL RIVER RD.	39,74918	-105,5482	2330,4	19/ago/18		CO_RWIS	4636,615			00AS
C0127	050E290 PENROSE	38,41867	-105,03862	1595,1	19/ago/18		CO_RWIS	4572,486			00AZ
C0111	050E290 PENROSE	38,4187	-105,036	1600	16/ago/17		CO_RWIS	4572,481			00CA
C0182	0.5 mi E of Vail - RTR	39,62126	-106,2785	2893	19/ago/18		CO_RWIS	4660,597			00CL
C0155	0.6 mi E of CO-51 Copper Mtn	39,53498	-106,24547	2944,4	19/ago/18		CO_RWIS	4651,955			00CN
C0145	0.6 MI W of E IDAHO SPRGS	39,74024	-105,49955	2293,9	19/ago/18		CO_RWIS	4634,463			00CO
C0120	070E210 I-70 @ E OF LOWER TRUCK RAMP	39,6566	-105,996	3043	16/ago/17		CO_RWIS	4650,819			00FA
C0117	070E214 E71 WEST PORTAL	39,6777	-105,938	3396	19/ago/17		CO_RWIS	4649,273			00FD
C0118	070E217 US KLOVGLAND PASS	39,6879	-105,883	3345	16/ago/17		CO_RWIS	4647,486			00FL
C0189	070W218 HERMANS GULCH	39,7018	-105,86119	3153	19/ago/18		CO_RWIS	4647,102			00GA
C0119	070W221 BAKERVILLE	39,6922	-105,808	2990	16/ago/17		CO_RWIS	4644,733			00GE
C0148	0.7 mi E of Spilling St	39,78393	-105,09575	1628,7	19/ago/18		CO_RWIS	4630,415			00HI
C0149	0.7 mi E of US-40	39,76239	-105,64431	2506,8	19/ago/18		CO_RWIS	4640,75			00ID
FA472	0.7MI N. OF PO AT FORT MCKAVETT, TX	30,8275	-100,111	657	04/ago/10		TX_COOP	4113,699			00IG
C0180	0.7 mi S of Northwest Hwy	39,97193	-104,98832	2188	19/ago/18		CO_RWIS	4622,42			00IN
C0157	0.7 mi W of CO-9 Silverthorne	39,61979	-106,07284	2722,3	19/ago/18		CO_RWIS	4652,581			00IL
C0125	082W038 PHILLIPS RIVER VIEW	39,312	-106,937	2156	16/ago/17		CO_RWIS	4676,215			00IS
C0184	0.85 mi E of Woodard St Georgetown	39,7218	-105,69412	2581	19/ago/18		CO_RWIS	4643,5			00IR
C0130	080S309 WYOMING BORGER	40,96997	-104,77134	1877,8	19/ago/18		CO_RWIS	4649,116			00IW
MRTW2	0.8MI W OF P.O (WINTH CITY)	39,3908	-77,9797	161	08/ago/10		WV_COOP	3720,927			00KY
C0123	0915011 FREMONT PASS	39,5673	-106,188	3459	16/ago/17		CO_RWIS	4648,768			00LA

fonte: Produção do próprio autor.

Por exemplo, ao digitar o código ICAO do aeródromo de São João da Boa Vista, em São Paulo, Brasil, o resultado apresentado aponta para a estação meteorológica mais próxima, conforme ilustrado na Figura [Figura 14](#).

Figura 14 – Estação mais próxima calculada.

Airport	SDJV
ICAO	SDJV
Latitude	-22,0172
Longitude	-46,8408
Closest Station Dist	27,56592
Station ID	SBYS

fonte: Produção do próprio autor.

Neste cenário, a estação meteorológica identificada foi Pirassununga, como mencionado anteriormente na Figura [Figura 6](#), confirmando a análise feita no mapa. Esta triangulação é crucial para assegurar a persistência das avaliações meteorológicas em áreas sem acesso direto a estações METAR.

3.3.3.3 Planilhas para Tratamento de Dados RVR

Para o tratamento de dados relacionados ao *Runway Visual Range* (RVR), foram desenvolvidas planilhas auxiliares com as seguintes funções principais:

- Localizar e organizar os dados de RVR presentes nos relatórios METAR;
- Estabelecer o local onde os dados processados serão colocados, usando expressões regulares (*regex*) para reconhecer padrões particulares nos relatórios METAR.

Estas planilhas possibilitam um pré-processamento eficaz dos dados de RVR, assegurando sua integração adequada nas análises futuras conduzidas pela ferramenta.

3.3.3.4 Importância das Planilhas Auxiliares

As planilhas auxiliares desempenham um papel crucial na arquitetura do sistema, contribuindo para:

- Redução da carga computacional sobre o VBA, otimizando o tempo de execução da ferramenta;
- Organização estruturada dos dados, facilitando a integração com diferentes módulos;
- Maior precisão nas análises, com base em dados bem organizados e pré-processados.

Ao dividir eficazmente o processamento entre o VBA e as planilhas de suporte, o sistema é capaz de satisfazer as exigências de desempenho e escalabilidade, fundamentais para usos.

3.3.4 Desenvolvimento do Código

A estruturação do código foi feita para satisfazer as principais necessidades de coleta, armazenamento e análise dos dados METAR, assegurando eficácia e capacidade de expansão. A primeira fase envolveu o desenvolvimento de um procedimento para fazer o download automático dos dados METAR fornecidos pela *Iowa State University (IOWA)*, bem como a implementação de métodos para compressão e armazenamento seguro desses dados.

Como o código foi desenvolvido em um estágio, não é viável disponibilizar o conteúdo integral ou fornecer informações detalhadas. Contudo, vou mostrar trechos escolhidos e explicações gerais sobre as principais fases.

Figura 15 – Trecho inicial do código da ferramenta.

```
'Código para baixar, comprimir ou abrir os dados e chamar a função para calcular os dados METAR
'Criado por: Lucas Santos (lucas.cavalcante@unesp.br)
'Ano: 2023

#If VBA7 Then
Private Declare PtrSafe Function URLDownloadToFile Lib "urlmon" Alias _
    "URLDownloadToFile" (ByVal pCaller As LongPtr, ByVal szURL As String, ByVal _
    szFileName As String, ByVal dwReserved As LongPtr, ByVal lpfnCB As LongPtr) As Long
#Else
Private Declare Function URLDownloadToFile Lib "urlmon" Alias _
    "URLDownloadToFile" (ByVal pCaller As Long, ByVal szURL As String, ByVal _
    szFileName As String, ByVal dwReserved As Long, ByVal lpfnCB As Long) As Long
#End If

Public Sub calculando_dados()
    Dim Station As String, ICAO_SELECT As String
    Dim wbDestino As Workbook, wsMain As Worksheet
    Dim strFileName As String, strZipFile As String
    Dim Dist As String

    ' Define o workbook destino como o workbook onde o código está sendo executado
    Set wbDestino = ThisWorkbook
    Set wsMain = wbDestino.Sheets("Home")

    ' Verifica se o valor na célula O17 não está vazio
    If wsMain.Range("O17").Value = "" Then
        MsgBox "O valor da célula O17 está vazio.", vbExclamation
        Exit Sub
    End If

    ICAO_SELECT = wsMain.Range("O17").Value

    'PROCURA ESTAÇÃO MAIS PRÓXIMA
    With wbDestino.Sheets("AIRPORT_DB_DIST")
        .Range("MS").Value = ICAO_SELECT
        Station = .Range("M10").Value
        If Station <> .Range("R6").Value Then
            Dist = Format(.Range("MS").Value, "0") & " KM"
        Else
            MsgBox "Nenhuma estação próxima encontrada.", vbExclamation
            Exit Sub
        End If
    End With
End Sub
```

fonte: Produção do próprio autor.

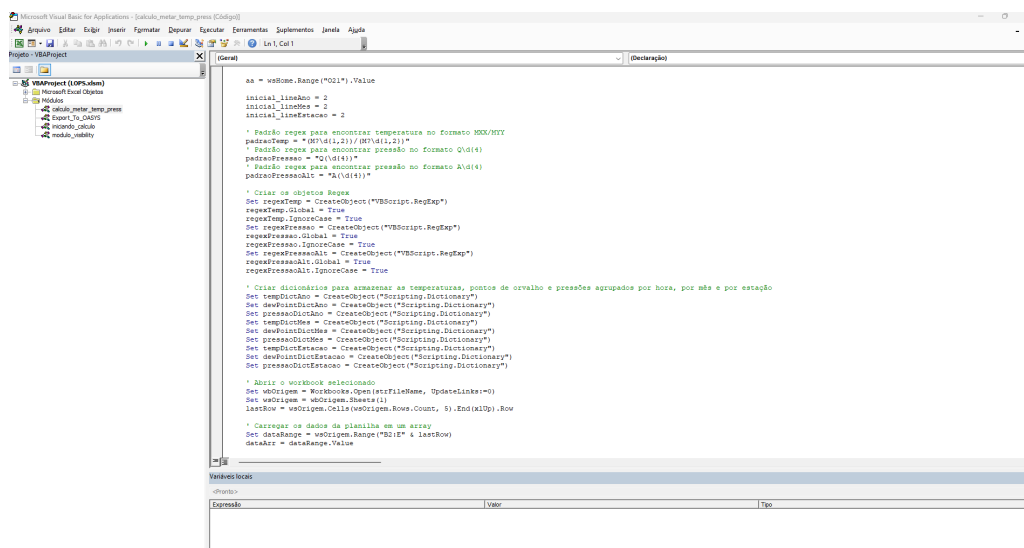
O código inicial se conecta ao banco de dados da *IOWA*, faz o download dos dados METAR dos últimos cinco anos, utiliza um protocolo de compressão que diminui o tamanho dos arquivos em até 90%, e armazena os dados de maneira compacta no computador. Depois, executa cálculos iniciais utilizando a temperatura do ar e à pressão (QNH) para melhor agrupamento. Depois dessa fase, o programa chama uma função que agrupa os dados METAR em 16 conjuntos, categorizados de acordo com as estações do ano, meses e ano. Os subconjuntos desses conjuntos seriam as horas.

Cada conjunto de dados é tratado de acordo com o módulo escolhido. Exemplo:

- **Módulo de Temperatura** Elimina informações desnecessárias e preserva somente os dados de temperatura.
- **Módulo de Temperatura e Pressão** Filtra as informações para levar em conta somente essas variáveis.

Frequentemente, as informações METAR mostram inconsistências referentes a ruídos, falta de manutenção nos sensores ou não seguem um padrão consistente. Para resolver essa questão, utilizamos expressões regulares (*regex*), que conseguem reconhecer diversos padrões e reorganizá-los de forma consistente e apropriada.

Figura 16 – Trecho do código principal da ferramenta - Tratamento de Temperatura.



fonte: Produção do próprio autor.

3.3.4.1 Aplicação de Distribuições Estatísticas

Depois de serem pré-processados, os dados passam por distribuições estatísticas para serem analisados. Cada subconjunto com variável climática é abordada de maneira particular, empregando distribuições adequadas baseadas em pesquisas anteriores:

Temperatura : A distribuição normal, frequentemente usada em variáveis contínuas por sua simetria e características estatísticas, foi aplicada. A densidade de probabilidade pode ser determinada pela Equação Normal (ARAÚJO et al., 2010):

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

onde μ representa a média e σ o desvio padrão da variável.

Vento : Dada a natureza vetorial do vento, que engloba módulo, direção e sentido, optou-se por uma distribuição circular. Escolheu-se o procedimento inverso da distribuição de *Von Mises*, cuja densidade de probabilidade é demonstrada pela Equação 2 (CAMILLO; GRAFFUNDER, 2021):

$$p(x) = \frac{e^{\kappa \cos(x-\mu)}}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (2)$$

onde μ é a direção média, κ é o parâmetro de concentração, e $I_0(\kappa)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero.

Essas distribuições foram escolhidas por sua habilidade em modelar as tendências observadas nos dados meteorológicos.

3.3.4.2 Conversão de Horários METAR

A conversão entre os horários indicados nos relatórios METAR (em UTC) e os horários locais da cidade em análise representou um desafio adicional. O código faz uso das planilhas auxiliares criadas, as quais contêm dados sobre *timezones* e correções sazonais, assegurando a exatidão temporal requerida para as análises, porém essa conversão só é feita após todos os demais cálculos para garantir a consistência nos dados.

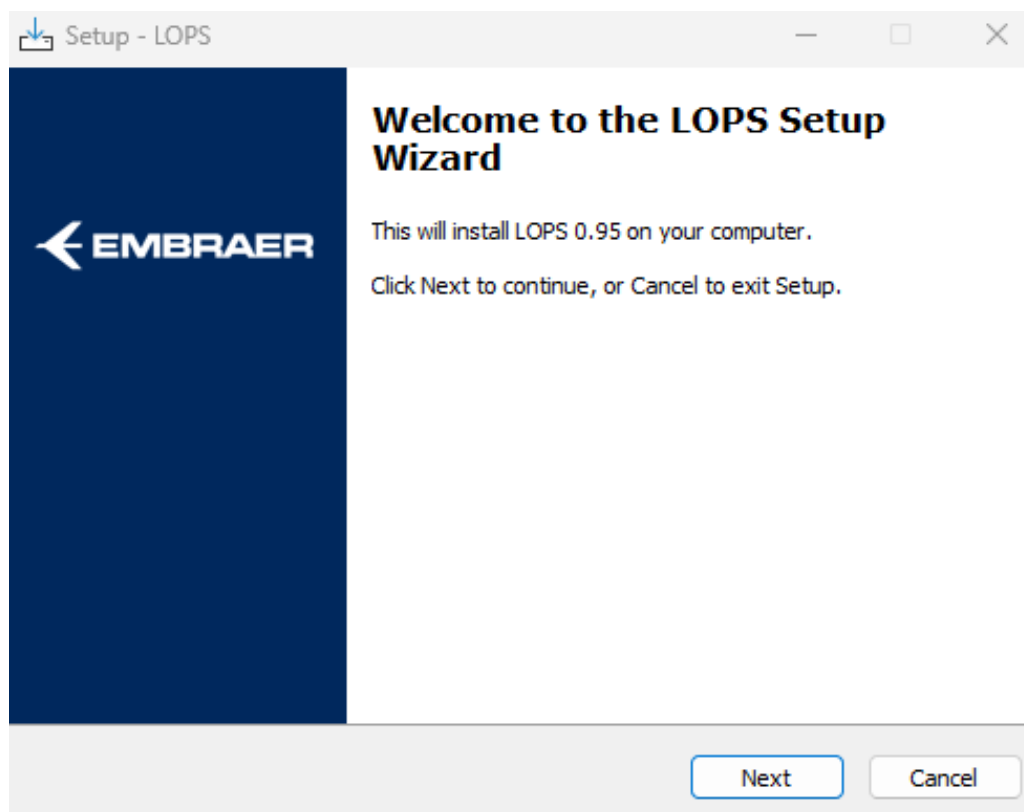
3.3.4.3 Estrutura do Código

O LOPS possui mais de 2.000 linhas de código, estruturadas em módulos distintos para diversas funcionalidades. Esta modularidade simplifica a manutenção e a inclusão de novos recursos futuramente. Cada módulo foi desenvolvido para funcionar de maneira autônoma, porém integrado ao sistema como um todo para proporcionar resultados consistentes e sólidos.

3.3.4.4 Código de Instalação

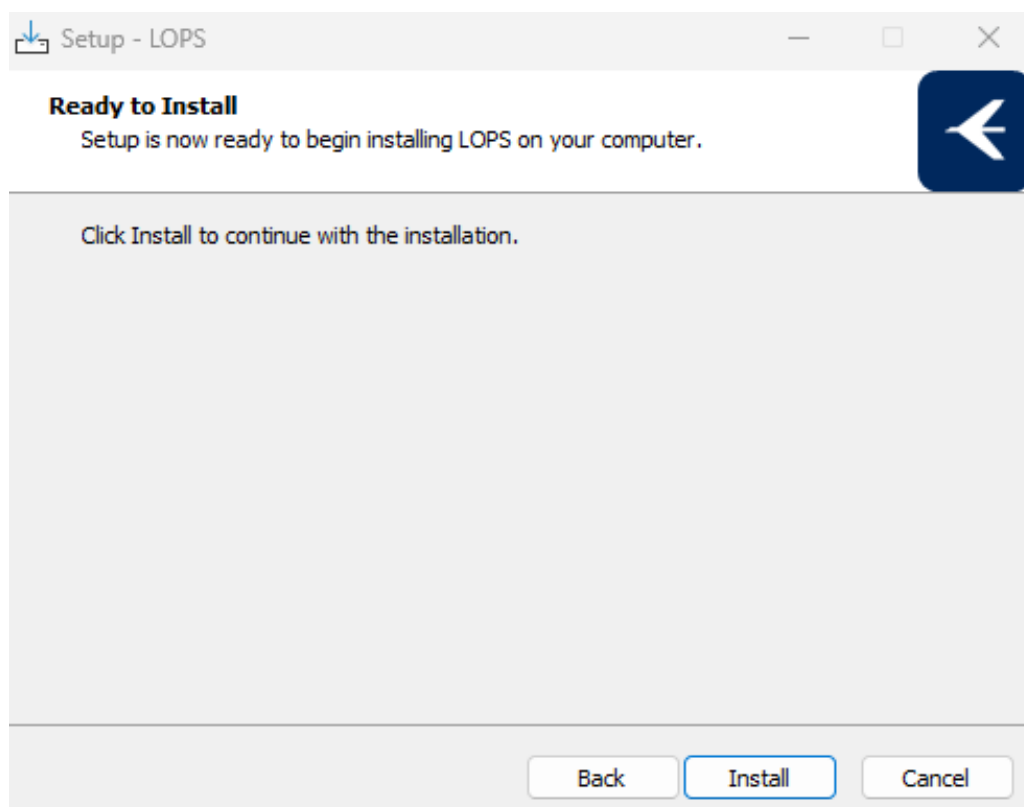
Após finalizada a ferramenta, foi criado um código, fazendo uso de licenças internas da Embraer S.A para desenvolvimento de um instalador utilizando a linguagem de programação Pascal. Esse instalador está no formato *.exe* e com apenas alguns cliques cria as pastas necessárias para utilizar a ferramenta no seu computador.

Figura 17 – Primeira Tela de Instalação.



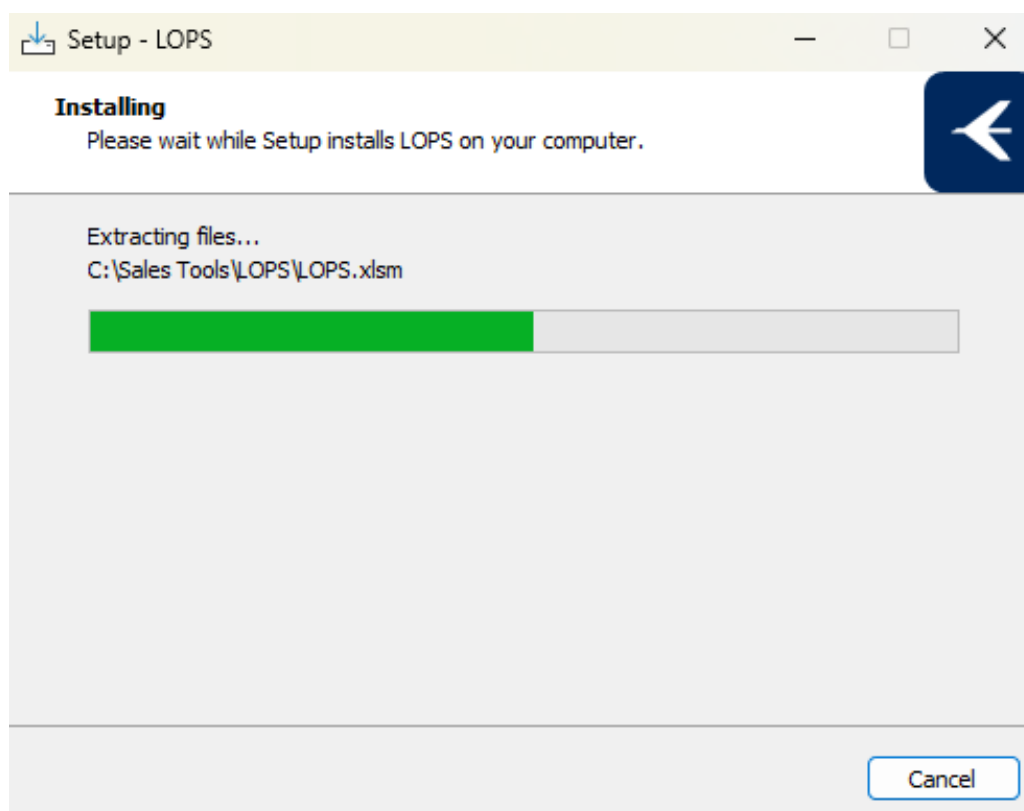
fonte: Produção do próprio autor.

Figura 18 – Segunda Tela de Instalação.



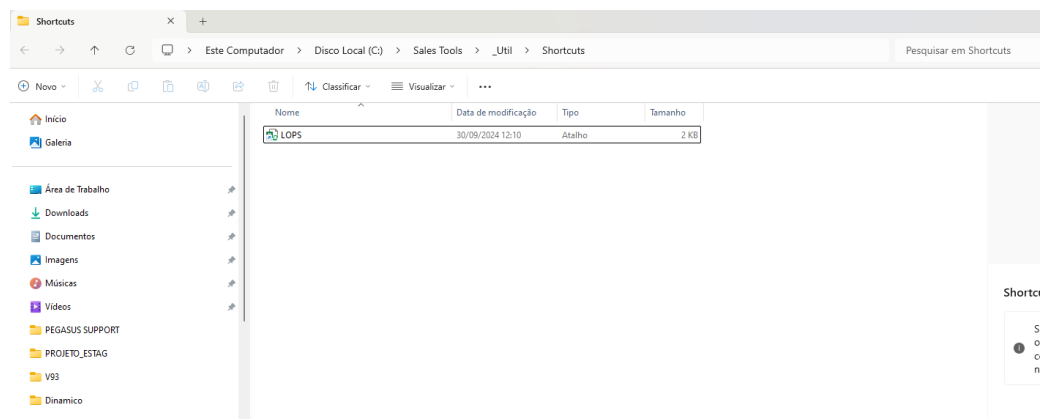
fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Tela de loading da Instalação.



fonte: Produção do próprio autor.

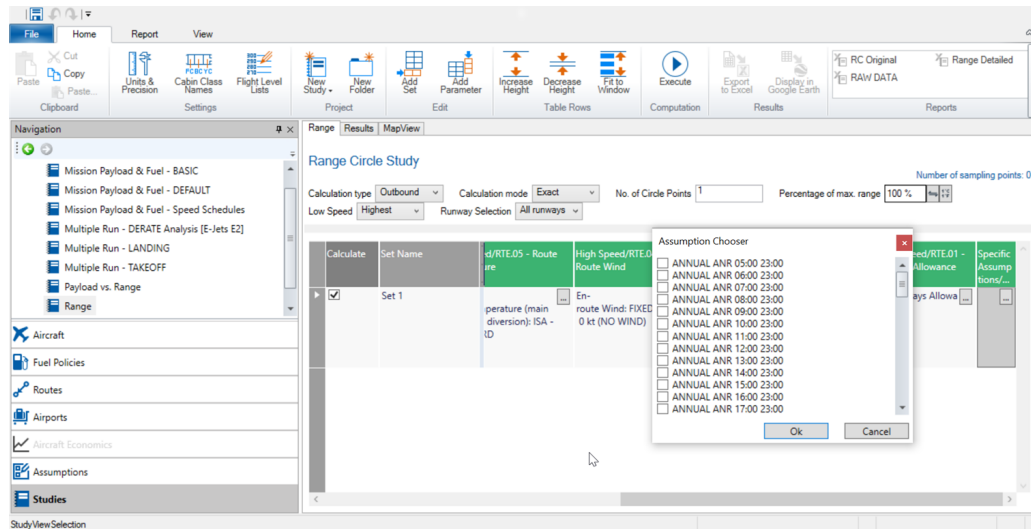
Figura 20 – Atalho da planilha após instalação.



fonte: Produção do próprio autor.

Todos os programas foram organizados para atender aos critérios de confiabilidade e escalabilidade. As etapas mencionadas, que abrangem desde a coleta e compressão de dados até a análise estatística e a conversão temporal, garantem que a ferramenta seja eficiente, precisa e preparada para atualizações futuras.

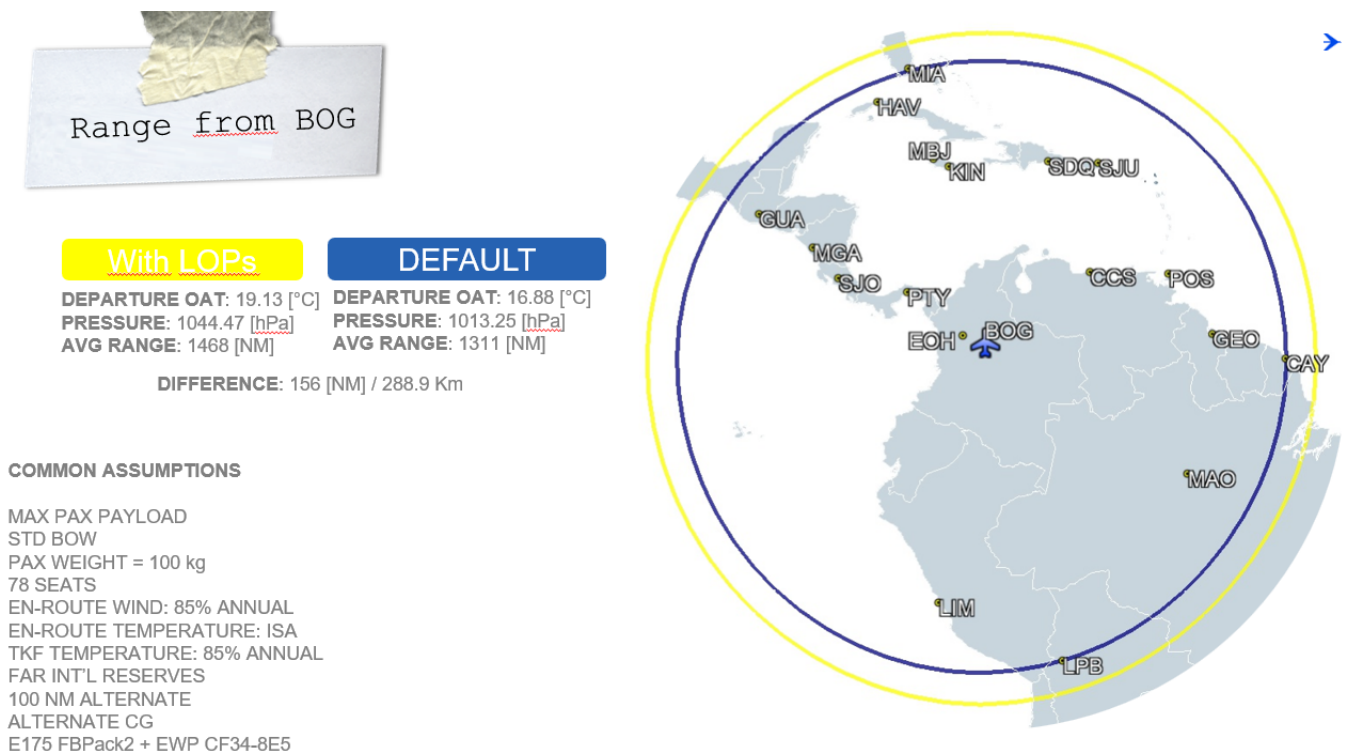
Figura 23 – Resultado do software de simulação.



Fonte: Produção do próprio autor.

A comparação entre os valores originais do software de simulação e os valores corrigidos pelo LOPS demonstrou uma melhoria significativa no alcance da aeronave:

Figura 24 – Comparativo de resultados (SKBO).

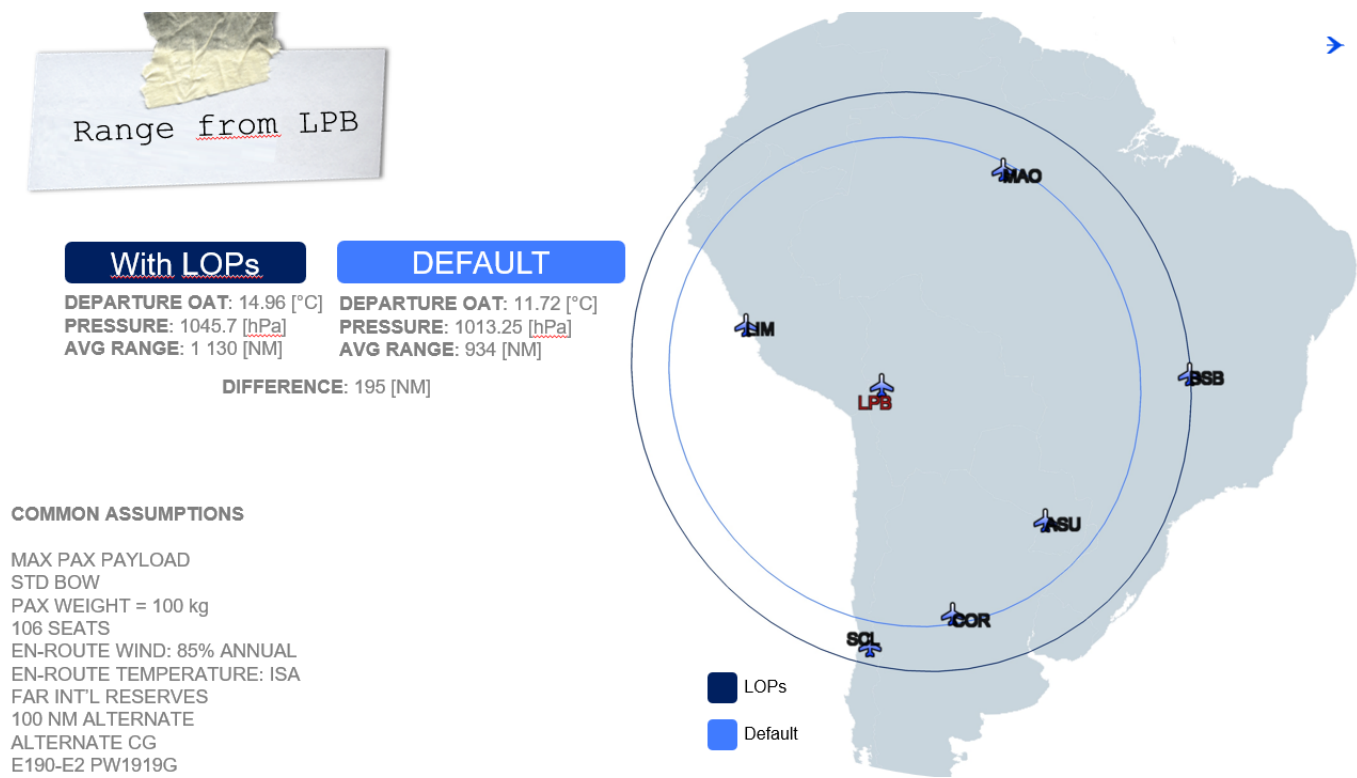


Fonte: Produção do próprio autor.

4.0.1.2 Range Circle a partir do aeroporto de LPB (La Paz, Bolívia)

Seguindo os mesmos passos descritos anteriormente, foi realizada uma análise para o aeroporto de La Paz (LPB). O comparativo entre os resultados corrigidos e os valores padrão demonstrou a eficácia do LOPS:

Figura 25 – Comparativo de resultados (LPB).

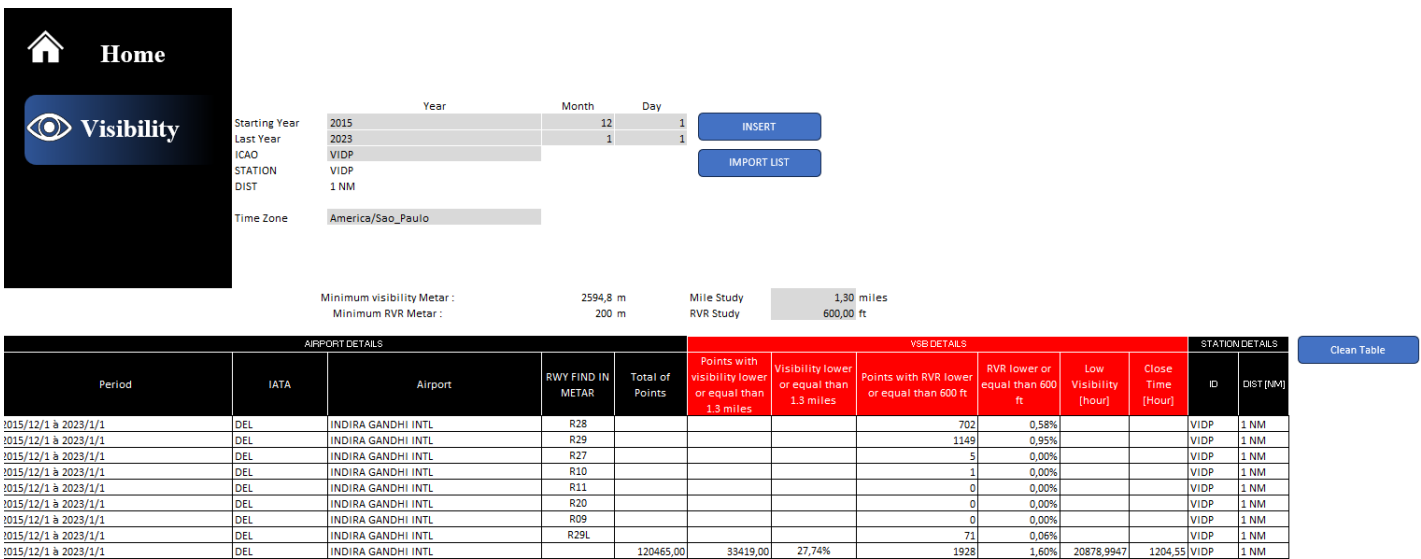


Fonte: Produção do próprio autor.

4.0.1.3 Case de Visibilidade

Um cliente solicitou uma análise para determinar a necessidade de operar nos níveis CAT III-A e CAT III-B em diferentes aeroportos. Utilizando o módulo de visibilidade do LOPS, foi possível calcular o tempo que os aeroportos ficariam fechados caso não operassem nos níveis solicitados.

Figura 26 – Módulo de Visibilidade do LOPS.



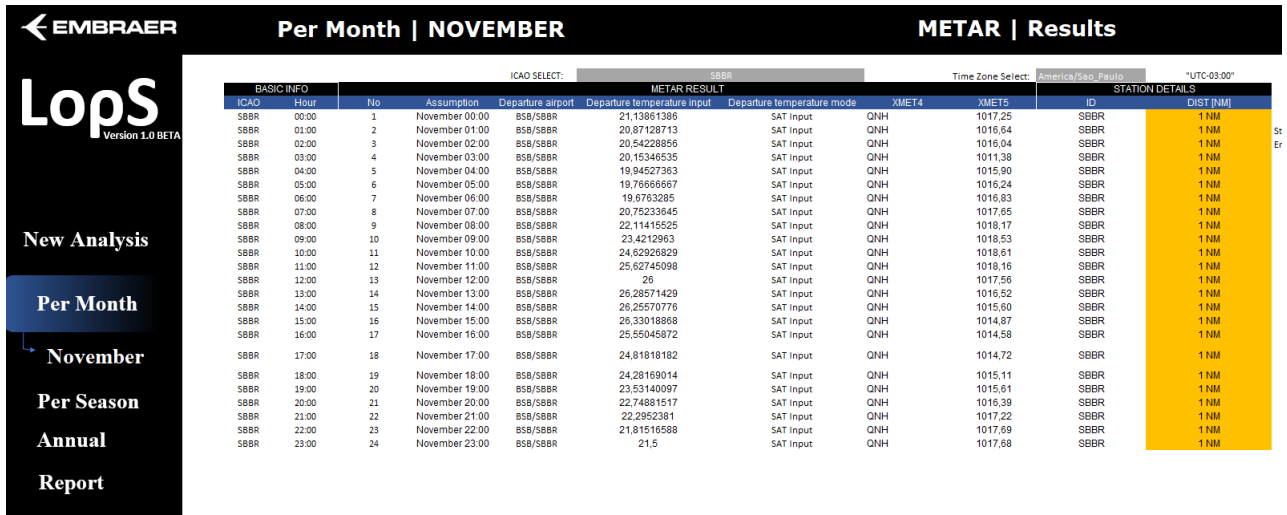
Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado foi apresentado ao cliente em um slide que sintetizava as informações:

eventos de chuva, e picos de temperatura após as 12h.

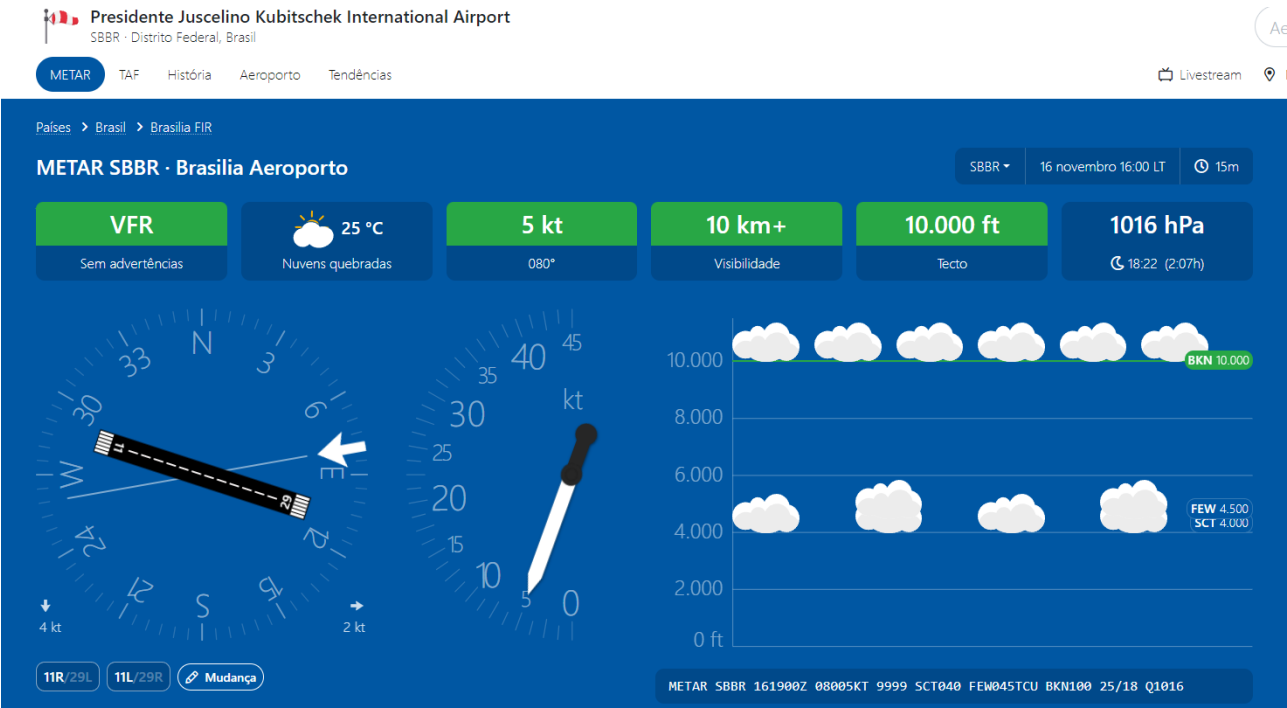
Além disso, a ferramenta demonstrou grande proximidade entre os valores simulados de temperatura e os valores reais obtidos em bases de dados meteorológicas, como ilustrado na comparação abaixo:

Figura 29 – Saída do software para o mês de novembro no aeroporto de Brasília.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Valores reais do METAR para o mês de novembro no aeroporto de Brasília.



Fonte: (METAR...).

A ferramenta, embora possa ser aprimorada com a inclusão de faixas de valores como *output*, já se mostrou eficaz para suas finalidades iniciais que são a aplicação em simulações de performance, com potencial para futuras expansões devido à sua modularidade.

5 CONCLUSÃO

O principal propósito deste trabalho de conclusão de curso foi a criação de um instrumento estatístico para a análise de dados METAR, voltado para aplicações na performance aeronáutica. Durante o projeto, diversos obstáculos importantes foram superados, desde a coleta e armazenamento de grandes quantidades de dados meteorológicos até a utilização de distribuições estatísticas complexas para assegurar resultados precisos e confiáveis. A realização deste trabalho levou à criação do LOPS (Long-term Observational and Predictive Statistics), um instrumento sólido, modular e integrado aos procedimentos da Embraer, atualmente empregado na área de engenharia de vendas da companhia.

O LOPS demonstrou ser eficaz na resolução de questões práticas, conforme evidenciado nos exemplos reais de aplicação. Estudos como os círculos de intervalo para os aeroportos de BOG e LPB mostraram a habilidade do instrumento em aprimorar a confiabilidade das simulações de desempenho ao ajustar parâmetros meteorológicos, elevando consideravelmente a exatidão dos resultados. Adicionalmente, o componente de visibilidade evidenciou a importância do LOPS em cenários operacionais críticos, ajudando os clientes a entenderem a exigência de operar em variadas categorias de aproximação.

CONTRIBUIÇÕES E IMPACTO PRÁTICO

A ferramenta desenvolvida apresenta uma série de contribuições importantes:

- **Precisão Meteorológica:** Ao combinar informações históricas e estatísticas, o LOPS oferece simulações fundamentadas em condições meteorológicas verídicas, minimizando a necessidade de suposições conservadoras.
- **Eficiência Operacional:** A estrutura modular possibilita análises rápidas e exatas, com interfaces intuitivas que simplificam a utilização por profissionais de variados graus de experiência.
- **Adaptação a Condições Locais:** A interpolação de dados e a triangulação de estações METAR permitem análises mesmo em locais sem estações operacionais, permitindo uma cobertura mundial.
- **Expansibilidade:** A arquitetura da ferramenta permite futuras melhorias e integrações, assegurando sua relevância a longo prazo.

LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos resultados obtidos serem relevantes, algumas restrições foram detectadas. Por exemplo, a falta de faixas de valores como *output* restringe a ferramenta a oferecer estimativas precisas, o que pode não ser apropriado em situações que requerem uma maior variabilidade nas análises. Além disso, o LOPS ainda não inclui informações sobre fenômenos extremos, como tempestades intensas, que poderiam ser incluídas em versões futuras.

Futuras expansões incluem:

- Desenvolvimento de módulos para análise de fenômenos meteorológicos extremos.
- Integração com sistemas de aprendizado de máquina para previsão de tendências climáticas.
- Melhoria na interface gráfica, adicionando visualizações mais interativas e personalizáveis.
- Expansão para contemplar dados aeronáuticos além do METAR, como TAF e SIGMET.
- Módulo de previsão de temperatura exibindo faixa de temperatura provável e seu erro e tipo de erro estatístico associado.

REFLEXÕES FINAIS

Este estudo enfatiza o valor da colaboração entre a ciência de dados e a engenharia aeronáutica. O LOPS exemplifica o uso prático de ferramentas estatísticas para solucionar questões reais. Com todas as metas iniciais cumpridas, prevê-se que o instrumento terá um efeito duradouro no local de atuação atual, principalmente na melhoria dos processos de venda e no planejamento operacional. O êxito do LOPS não só demonstra o empenho empregado, mas também a habilidade de converter dados em percepções relevantes para a tomada de decisões estratégicas.

REFERÊNCIAS

- ADMINISTRATION, F. A. **Instrument Procedures Handbook**. Washington, DC: FAA, 2017.
- ANDERSON, J. D. **Aircraft Performance and Design**. New York, NY: McGraw-Hill, 1999.
- ARAÚJO, E. M. et al. Aplicação de seis distribuições de probabilidade a séries de temperatura máxima em iguatu - ce. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 36–45, January–March 2010. ISSN 1806-6690. Disponível em: <http://www.ccarevista.ufc.br>.
- BULLEN, R. B. S.; GREEN, J. **Professional Excel Development: The Definitive Guide to Developing Applications Using Microsoft Excel, VBA, and .NET**. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 2009.
- CAMILLO, C. M.; GRAFFUNDER, K. G. Modelagem da direção do vento utilizando a distribuição de probabilidade de von mises. **Salão do Conhecimento**, v. 7, October 2021. Accessed November 2024. Disponível em: <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/20709>.
- FAA. **Aeronautical Information Manual**. Washington, D.C., USA: Federal Aviation Administration, 2020.
- (FAA), F. A. A. **Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge**. United States: FAA-H-8083-25B, 2016.
- ICAO. **Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes**. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2018.
- ICAO. **Manual on Codes - International Codes**. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2018.
- (ICAO)., I. C. A. O. **Manual of the ICAO Standard Atmosphere (Doc 7488)**. 1993. Disponível em: <https://aiac.ma/wp-content/uploads/2018/01/Manuel-de-l%E2%80%99atmosph%C3%A8re-Type-OACI-Doc7488-1.pdf>.
- JEPPESEN. **Aviation Weather Services Handbook**. Englewood, CO, USA: Jeppesen Sanderson, Inc., 2021.
- MARDIA, K. V.; JUPP, P. E. **Directional Statistics**. Chichester, UK: Wiley, 2000.
- METAR & TAF. Disponível em: <https://metar-taf.com/pt/SKBO>.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- NIELSEN, J. **Designing Web Usability: The Practice of Simplicity**. Berkeley, CA: New Riders Publishing, 2010.
- PASSEY, D. Programming and data manipulation: A guide for beginners. **Educational Technology Research and Development**, v. 65, n. 3, p. 423–435, 2017.
- RAYMER, D. P. **Aircraft Design: A Conceptual Approach**. 6th. ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2018.
- RICE, J. A. **Mathematical Statistics and Data Analysis**. Boston, MA: Cengage Learning, 2006.

ROSKAM, J. **Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls**. Lawrence, KS: DARcorporation, 2000. v. 1.

SOBIECZKY, H. **Aerodynamic Design of Transport Aircraft**. Berlin, Germany: Springer, 1998.

THE influence of temperature on aircraft. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/The-influence-of-temperature-on-aircraft-Retrieved-from-https-wwwnytimescom-2017-06_fig1_346043992.

WALKENBACH, J. **Excel VBA Programming for Dummies**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.

WEBSITE of the University of Iowa. Disponível em: <https://www.iastate.edu/>.