

Antenor Moreira de Barros Leal

**Aplicativo web de auxílio à
navegação aérea**

PROJETO FINAL

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
Programa de Graduação em Engenharia da
Computação

Rio de Janeiro
Junho de 2024

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Antenor Moreira de Barros Leal

Aplicativo web de auxílio à navegação aérea

Relatório de Projeto Final I

Relatório de Projeto Final, apresentado ao Programa de Engenharia da Computação, do Departamento de Informática da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Adriano Francisco Branco

Rio de Janeiro
Junho de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Antenor Moreira de Barros Leal

Graduando em Engenharia da Computação na PUC - Rio

Ficha Catalográfica

Leal, Antenor Moreira de Barros

Aplicativo web de auxílio à navegação aérea / Antenor Moreira de Barros Leal; orientador: Adriano Francisco Branco. – 2024.

38 f: il. color. ; 30 cm

Projeto Final - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática, 2024.

Inclui bibliografia

1. Informática – Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). 2. Aviação. 3. Navegação. 4. Aplicativo. 5. Algoritmo. 6. Web. 7. Internet. I. Branco, Adriano Francisco. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Resumo

Leal, Antenor Moreira de Barros; Branco, Adriano Francisco. **Aplicativo web de auxílio à navegação aérea**. Rio de Janeiro, 2024. 38p. Projeto Final – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

É um aplicativo web de código aberto com o objetivo de auxiliar usuários de simuladores de voo que não possuem acesso à ferramenta (Electronic Flight Bag) que um piloto de linha aérea teria. Ao acessar o aplicativo, o usuário se depara com a lista de aeroportos cadastrados e, após escolher um, são exibidas as informações da pista, frequências do aeroporto (torre, solo, ATIS, etc.), e frequências de navegação (ILS, VOR, etc.). Também são apresentadas as informações das condições meteorológicas atuais do aeródromo (vento, visibilidade, temperatura, etc.), tanto no formato oficial (.ETAR), obtidas a cada hora de uma API externa, como em um texto em linguagem natural para melhor entendimento do jogador iniciante. Um usuário com permissão de administrador pode adicionar e editar aeroportos. Módulos adicionais estão disponíveis como o cálculo da pista em uso (a partir de informações do vento) e do perfil de descida.

Palavras-chave

Aviação; Navegação; Aplicativo; Algoritmo; Web; Internet.

Abstract

Leal, Antenor Moreira de Barros; Branco, Adriano Francisco (Advisor). **Aerial navigation aid web application**. Rio de Janeiro, 2024. 38p. Projeto Final – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

It is an open source web application to auxialiate the flight simulator's users that don't have access to the tool (Electronic Flight Bag) that an airline pilot would have. When accessing the app, the users encounter the list of registered airports and, after choosing one, runway information, airport frequencies (tower, ground, ATIS etc) and navigation frequencies (ILS, VOR etc) are showed. Also provided are the current meteorological conditions of the aerodrome (wind, visibility, temperature, etc.), both in the official format (METAR), obtained hourly from an external API, and in natural language text for better understanding by novice players. An administrator user can add and edit airports. Based on the current wind information, the active runway is calculated. Additional modules are available such as calculation of the runway in use (from wind information) and the descent profile.

Keywords

Aviation; Navigation; Application; Algoritm; Web; Internet.

Sumário

1	Introdução	11
2	Sistemas Similares	12
3	A Proposta	15
4	Cronograma	16
5	Decodificação do METAR	18
5.1	Exemplo	18
5.2	Algoritmo	20
5.3	Complexidade Temporal	20
6	Modelo de Dados	22
6.1	Modelo Lógico	22
6.2	Tabelas	22
7	Arquitetura	31
7.1	Docker Network	31
7.2	Docker Secrets	31
7.3	Serviços	32
7.4	Flask/Gunicorn	32
7.5	Produção	33
7.6	Diagrama de sequência	33
8	Conclusão e Próximos Passos	36
9	Referências bibliográficas	37

Lista de figuras

Figura 2.1	Exemplo de um EFB no Flight Simulator 2020 na aeronave A320neo	12
Figura 2.2	AISWEB com informações de pista, frequências de comunicação e navegação para o Santos Dumont	13
Figura 2.3	METAR do Santos Dumont no AISWEB	14
Figura 2.4	Interface gráfica do METAR-TAF	14
Figura 4.1	Cronograma	16
Figura 6.1	Diagrama E/R	23
Figura 7.1	Modelo de Arquitetura	31
Figura 7.2	Uso do sistema em baixa demanda	33
Figura 7.3	Containers Docker em execução	34
Figura 7.4	Diagrama de sequência	34

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Milestones	16
Tabela 6.1	City	23
Tabela 6.2	Aerodrome	23
Tabela 6.3	METAR	24
Tabela 6.4	PavementType	25
Tabela 6.5	Runway	25
Tabela 6.6	CommunicationType	27
Tabela 6.7	Communication	27
Tabela 6.8	ILSCategory	28
Tabela 6.9	ILS	28
Tabela 6.10	VOR	29

Lista de Abreviaturas

METAR – *ME*Teorological Aerodrome Report (Informe Meteorológico de Aeródromo)

EFB – *Electronic Flight Bag* (Maleta Eletrônica de Voo)

ICAO – *International Civil Aviation Organization* (Organização Internacional da Aviação Civil)

IATA – *International Air Transport Association* (Associação Internacional de Transporte Aéreo)

ATIS – *Automatic Terminal Information Service* (Serviço Automático de Informação Terminal)

PK – *Public Key* (Chave Pública em banco de dados)

FK – *Foreign key* (Chave Estrangeira em banco de dados)

SSH – *Secure SHell* (Shell Segura)

VPS – *Virtual Private Server* (Sevidor Virtual Privado)

ISP – *Internet Service Provider* (Provedor de Serviços de Internet)

1

Introdução

Com o aumento da capacidade de passageiros e carga e a necessidade de uma maior segurança, começou a se fazer necessário trazer ao cockpit vários documentos como checklist de procedimentos; log book; cartas de navegação, de saída, de aproximação, do aeródromo; tabelas de performance da aeronave etc.

Para levar tudo isto costumava-se usar uma maleta (a Flight Bag), obviamente esta ficava muito pesada.

Com a miniaturização dos computadores e surgimentos dos tablets, começaram a ser desenvolvidos programas que substituíam partes ou todos estes documentos, é a chamada maleta de voo eletrônica, mais conhecida pela sigla em Inglês EFB (*Electronic Flight Bag*).

Atualmente existem hardware dedicados para esta função, mas é mais comum se usar um tablet com um aplicativo disponibilizado pela companhia aérea. Normalmente, o tablet escolhido é um iPad da Apple, mas algumas companhias optaram pelo Microsoft Surface. [1]

O uso do EFB trouxe uma série de benefícios para os pilotos e para as companhias aéreas. Além de reduzir o peso e o volume de documentos físicos a serem transportados, o EFB permite uma rápida atualização das informações, garantindo que os pilotos tenham sempre acesso às versões mais recentes das cartas de navegação. [2]

Além disso, a capacidade de armazenamento do EFB possibilita o acesso a uma vasta quantidade de informações adicionais, como manuais de operação da aeronave, regulamentações atualizadas e até mesmo dados meteorológicos em tempo real, o que contribui para uma tomada de decisão mais informada e segura durante o voo.

2

Sistemas Similares

Os EFBs possuem funções variadas como cálculo de combustível, de performance, etc. Para aeronaves mais novas, como o Airbus A320 é difícil realizar cálculos de performance, porque não é disponibilizado ao público como este cálculo é feito. Ferramentas encontradas na Internet [3] normalmente fazem engenharia reversa, e portanto, podem apresentar resultados diferentes de um cálculo oficial.

Nos simuladores de voo para computador pessoal, algumas aeronaves simulam este equipamento como o Airbus A320neo desenvolvido pela *FlyByWire Simulations*. Apesar de ser uma aeronave *freeware*, ela é bem sofisticada chegando ao nível de realismo da *Fenix Simulations* ou da *ToLiss Simulations*, duas produtoras com modelos pagos do A320.

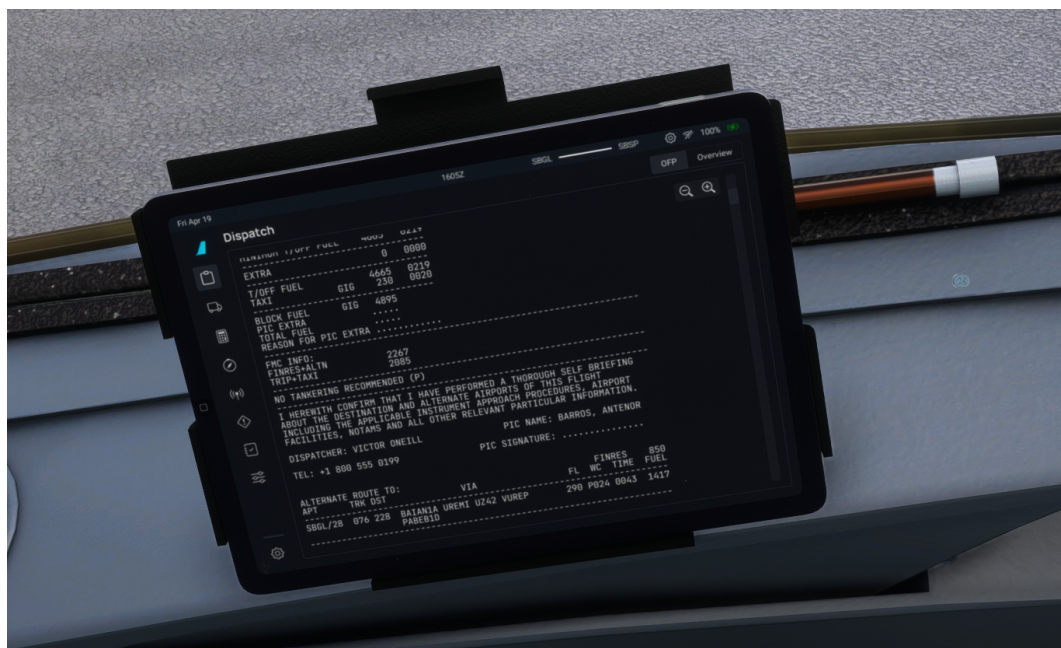


Figura 2.1: Exemplo de um EFB no Flight Simulator 2020 na aeronave A320neo

Contudo, o METAR do aeródromo não se encontra disponível no EFB. É possível usar o computador de bordo da aeronave (FMC) e conseguir esta informação. Também é possível sintonizar na frequência do ATIS, mas isto só funcionará se o avião já estiver perto do aeródromo.

O que muitos jogadores fazem é acessar o AISWEB (<https://aisweb.decea.mil.br/>), sistema oficial brasileiro de informações aeronáuticas.

É um site extremamente completo, podendo ser usado em operações reais, mas para o jogador iniciante seria de valia uma interface mais simples.



The screenshot shows the AISWEB website interface. At the top, there is a navigation bar with links for 'Abreviaturas', 'Central de Ajuda', and 'Portuguê'. Below this, there are tabs for 'INÍCIO', 'AERÓDROMOS', 'ESPAÇO AÉREO', and 'NOTAM'. The main heading is 'Santos Dumont (SBRJ)' with the location 'Rio de Janeiro/RJ' and the CIAD code 'RJ0002'. A horizontal menu below the heading includes 'ROTAER', 'NOTAM', 'Suplementos AIP', 'Cartas', 'Metar/TAF', and 'Rotas Preferenciais'. The 'ROTAER' section is active, displaying the following information:

- ROTAER** (D-AMDT 9/24) [Ver mudanças]
- Santos Dumont (SBRJ) /** RIO DE JANEIRO, RJ 22 54 36S/043 09 45W
- AD PUB/MIL INFRAERO 2E UTC-3 VFR IFR L21 , L23 , L26 3 (10)
- 02L** - L9(3.23) [1] [12] [14] , L12 - (1260x30 ASPH 39/F/B/X/T L14 , L15) - L9(3.12) SBCW (CRCEA-SE)
- [11] [14] , L12 - **20R**
- 02R** - L9(3.23) [1] [2] [14] , L12 - (1323x42 ASPH 65/F/B/X/T L14 , L15) - L9(3.12)
- [4] [14] , L12 - **20L**
- COM** -TORRE RIO [9] [14] 118.700 [10] 121.500 [3]
- SOLO RIO [10] [14] 121.700
- TRÁFEGO RIO [10] [14] 121.050
- ATIS RIO [8] [10] [14] 132.650
- CMB**- TF [5] **SER** - S1 **RFFS** - CAT CIVIL - 7

Figura 2.2: AISWEB com informações de pista, frequências de comunicação e navegação para o Santos Dumont

O AISWEB exibe o METAR no aeroporto, mas não explica para o que cada campo serve.

O site METAR-TAF (<https://metar- taf.com/>) é o decoder mais conhecido, possui uma interface gráfica bem construída e muito fácil de entender, mas não possui a lista de frequência dos aeroportos e de radionavegação.



METAR

192000Z 17006KT 9999 FEW030 BKN050 23/17
Q1018=

TAF

191500Z 1918/2006 23005KT 9999 FEW020
TX25/1918Z TN22/2006Z BECMG 2000/2002
27005KT FEW030 BECMG 2004/2006 32005KT
SCT017 SCT025 RMK PGY=

Figura 2.3: METAR do Santos Dumont no AISWEB

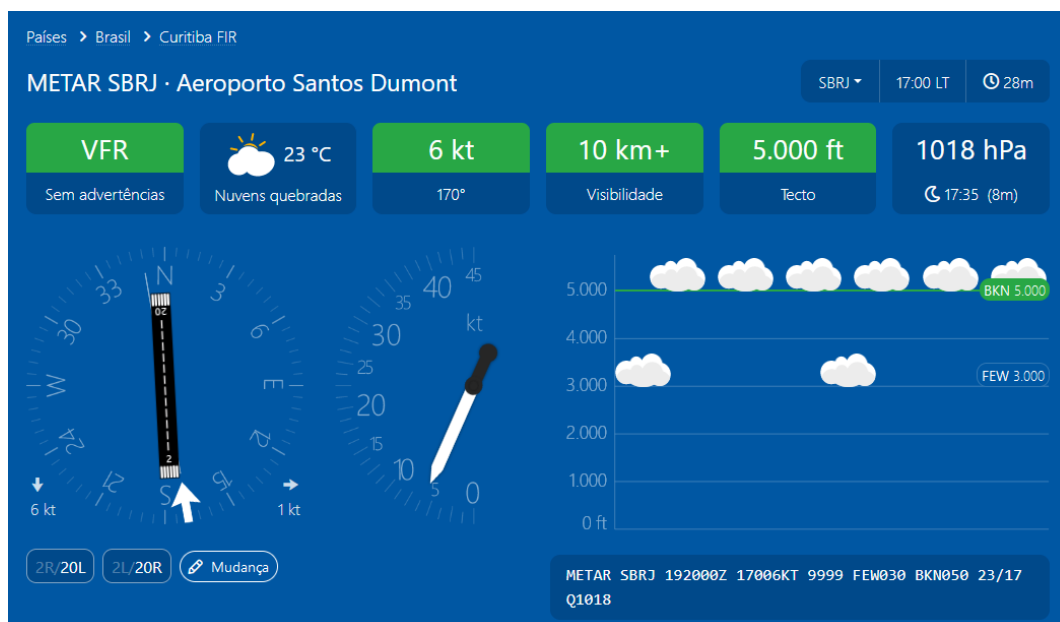


Figura 2.4: Interface gráfica do METAR-TAF

3

A Proposta

A ideia do trabalho seria unir as funcionalidades do METAR-TAF com o AISWEB em uma interface gráfica que o usuário iniciante consiga usar sem dificuldades.

Pelo fato de aviação necessitar ter um ambiente seguro e bastante regulado, considerando que meu projeto é apenas um protótipo, prefiro restringir o caso de uso apenas para jogadores de simuladores de voo que desejam que a simulação seja parecida com o real. Nas páginas do sistema conterà um aviso de que o sistema **não deve ser usado para um voo real**.

Dito isto, o sistema possui backend escrito na linguagem Python fazendo uso da biblioteca Flask. A renderização de página é server-side, usando a funcionalidades de templates do Flask junto com a biblioteca Jinja2.

No segundo semestre de 2023 comecei a fazer um projeto para uso próprio. O código está disponível em <https://github.com/antenor-z/aero>. Atualmente o projeto funciona, mas a arquitetura foi feita sem muito planejamento, as informações do aeroporto são hardcoded.

O usuário tem acesso a informações de frequência da torre, solo, tráfego, rampa e operações, bem como das frequências e dados para VOR (um sistema de radionavegação por antenas no solo), ILS (sistema de pouso por instrumentos) e informações de pista. Neste trabalho quero, armazenar estas em um banco de dados relacional com uma arquitetura bem planejada. Farei testes de desempenho simulando uma alta taxa de acesso e, dependendo dos resultados, fazer uso de um banco em memória como intermediário.

Os aeródromos podem, ao longo do tempo, mudarem alguma frequência e outras informações, como o número da pista, que muda a depender da variação do norte magnético, uma ampliação da pista, etc. Atualmente, o código precisa ser alterado para atualizar estas informações. Desejo implementar um sistema diretamente no site, com uma autenticação por senha e TOTP, para que seja possível mudar qualquer informação no banco.

Através de uma API do serviço americano National Weather Service, são coletadas as informações atuais de meteorologia. Estas informações (que vêm em um formato chamado METAR) são processadas pelo backend e mostradas ao usuário de uma forma fácil de entender. Esta parte em específico possui um código de difícil manutenção. Desejo refatorar esta parte e adicionar suporte para a maior parte de códigos da especificação do METAR.

4

Cronograma

Com o fim de se ter uma direção para o projeto e medição da evolução do projeto, ele foi dividido em várias tarefas com início e duração esquematizados abaixo.

O que está em laranja são grupos de tarefas, em preto são as tarefas em si, as células com fundo em azul são a(s) semana(s) planejadas para realizar cada tarefa. O símbolo de losango mostra quando a tarefa foi de fato feita.

Em vermelho, temos tarefas que não estavam no planejamento.

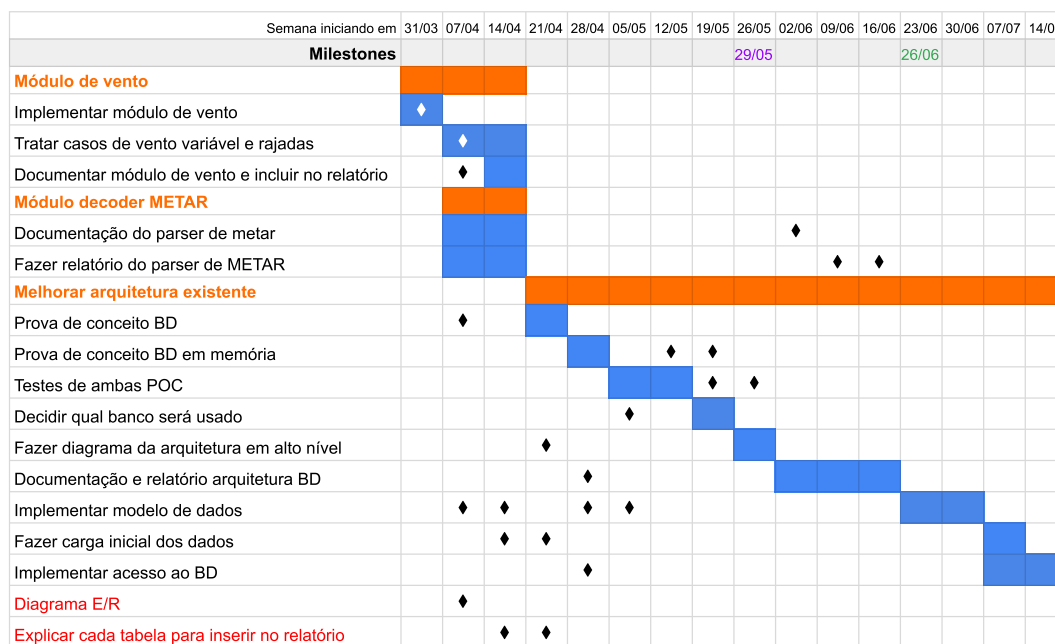


Figura 4.1: Cronograma

Os dias 29/05 e 26/06 são milestones onde ocorrem as entregas.

Tabela 4.1: Milestones

Data	Milestone
29/05	Entrega da proposta de Projeto Final I
26/06	Entrega do relatório de Projeto Final I

Por ter sido meu primeiro grande projeto autogerido, tive um pouco de dificuldade em estimar o tempo real de implementação de cada tarefa. Portanto, há uma grande diferença entre quando uma tarefa foi estimada para ser feita e quando ela realmente o foi.

As seguintes tarefas são propostas para a segunda parte do projeto.

- Usuários autenticados alterarem informações de um aeroporto;
- Cálculo da pista ativa a partir da direção do vento;
- Cálculo do perfil de descida;
- Consulta de dados históricos do METAR;
- Obtenção de estatísticas históricas para um aeroporto.

5

Decodificação do METAR

O METAR é um protocolo de transmissão de dados meteorológicos de um aeroporto ou aeródromo. Não se trata de uma previsão do tempo, mas sim de uma visualização atual. O METAR é formado por itens separados por espaço. Cada item corresponde a uma unidade mínima de informação meteorológica. Com os dados de sensores instalados no aeródromo [4], a cada hora é publicado um novo METAR que é válido para aquela hora. Em casos excepcionais, quando as condições de tempo estiverem mudando repentinamente, um METAR pode ser atualizado a cada meia hora [5]. Nas próximas seções será apresentado um exemplo de METAR e sua decodificação bem como uma descrição e complexidade temporal do algoritmo.

5.1

Exemplo

O METAR no aeroporto de Fortaleza [6], no dia 17 de abril de 2024 às 10:54 foi 171300Z 15010KT 9999 BKN019 SCT025 FEW030TCU BKN100 30/25 Q1011.

"SBFZ" se refere ao código ICAO (International Civil Aviation Organization) do aeroporto, não confundir com o código IATA (International Air Transport Association) que é formado por três letras. O aeroporto Pinto Martins possui o código IATA FOR, o Santos Dumont SDU e o Galeão GIG. O público geral parece conhecer mais este código, mas na aviação costuma-se usar mais o código ICAO, pois *todos* os aeródromos possuem um, enquanto o IATA só é presente em aeroportos onde há processamento de bagagem [7] [8].

O ICAO é formado por quatro letras em que a primeira é o prefixo da região. A América do Sul possui o prefixo "S", o Brasil possui o prefixo "SB", por isso que os aeroportos de Fortaleza, Santos Dumont e Galeão possuem os códigos SBFZ, SBRJ e SBGL, respectivamente. Países com muitos aeroportos, apenas uma letra, logo as três últimas letras ficam livres, podendo assim ter mais códigos para uso.

171300Z significa que este METAR se refere ao dia 17 às 13 horas e zero minuto zulu. Horário zulu é simplesmente o fuso horário da longitude de zero grau, chamado de hora UTC ou Coordinated Universal Time [9]. Para que não haja confusão com os horários, a aviação internacionalmente usa o horário UTC. Este METAR será válido até às 13:59, quando será substituído pelo METAR iniciando com "SBFZ 171400Z".

Note que a seguinte expressão regular com três grupos de captura consegue extrair o dia, a hora e o minuto:

`([0-9]{2})([0-9]{2})([0-9]{2})Z`

Com o METAR supracitado, os grupos de captura serão:

- Grupo 1 (dia): 17
- Grupo 2 (hora): 13
- Grupo 3 (minuto): 00

15010KT se refere à velocidade e direção do vento. Os três primeiros algarismos informam a direção, em graus, de onde o vento sopra, e os últimos dois algarismos informam a velocidade do vento em nós (milhas náuticas por hora). Neste caso, o vento vem da direção 150 graus com velocidade de dez nós. Com a expressão abaixo extraímos essas duas informações:

`([0-9]{3})([0-9]{2})KT`

A informação de vento pode também conter a letra G (gust) para rajadas e a letra V em um item separado para o caso de haver variação de direção. Por exemplo, um METAR com os itens 10016G21KT 080V120 informa que há rajadas de até 21 kt e a direção do vento pode variar de 80 a 120 graus. Existem outros aeroportos que podem usar outras unidades para a velocidade do vento, mas no Brasil só é usado nós (kt). Para obter essas informações usamos o regex `([0-9]{3}[0-9]{2}G[0-9]{2})` e `([0-9]{3})V([0-9]{3})`.

9999 significa visibilidade ilimitada (maior ou igual a 10 km). Se fosse 6000, a visibilidade seria de 6 km. Por ser sempre quatro algarismos, o regex `([0-9]{4})` consegue capturar essa informação.

30/25 Temperatura 30°C e ponto de orvalho 25°C. Caso a temperatura seja negativa, a letra M é adicionada antes do número. M2/M5 significa temperatura -2°C e ponto de orvalho -5°C [10].

Q1012 O altímetro do avião deve ser referenciado para 1012 hectopascal. Também pode ser usada a unidade polegadas de mercúrio (mmHg), mas no Brasil esta não é usada no METAR.

SCT025 Nuvens espalhadas (3/8 a 4/8 do céu com nuvens) em 2500 pés de altitude. 025 se refere ao nível de voo (Flight Level), que é a altitude acima do nível médio do mar com divisão exata por 100.

FEW030TCU Poucas nuvens (1/8 a 2/8 do céu com nuvens) em 3000 pés de altitude. O sufixo TCU significa que há nuvens convectivas significativas [11].

BKN100 Nuvens broken (5/8 a 7/8 do céu com nuvens) em 10000 pés de altitude.

Existe também o tipo OVC (overcast) que se refere a totalmente encoberto.

5.2

Algoritmo

O objetivo do módulo de decoder é dar uma explicação semelhante a esta para qualquer tipo de METAR de aeroportos no Brasil. O módulo usa várias expressões regulares para decodificar uma grande quantidade de informações, porém não é exaustivo; foi dada preferência a fenômenos que podem ocorrer no Brasil [11].

O algoritmo deve separar a string do METAR pelo caractere de espaço. Para cada item separado, cada expressão regular é testada. Caso uma combinação ocorra, os grupos de captura são interpolados em uma string que explica aquele item.

Sendo "\$1"o primeiro grupo de captura e "\$2"o segundo, se o item "27008G16KT"é encontrado pela expressão

```
([0-9]{3})([0-9]{2})G([0-9]{2})KT
```

o algoritmo interpola a frase:

```
Vento \ $1° com \ $2 nós e rajadas de até \ $3 nós
```

com os grupos de captura do regex supracitado. Então será gerada uma tupla (27008G16KT, Vento 270° com 8 nós e rajadas de até 16 nós). O retorno do algoritmo será uma lista de tuplas que será enviada a ferramenta de templating de página Jinja.

5.3

Complexidade Temporal

Considerando que todas as expressões usadas são simples, isto é, não levam a backtracking, a complexidade temporal para executar a função `re.findall()` do Python é

$$O_{findall}(m + n)$$

`m` := quantidade de caracteres da expressão regex

`n` := quantidade de caracteres da string a ser analisada

Se temos que testar todas as expressões para cada item do METAR, a complexidade será

$$O_{decode}(p * q * (m + n))$$

m := quantidade de caracteres da expressão regex

n := quantidade de caracteres da string do METAR a ser analisado

p := quantidade de itens do METAR

q := quantidade de expressões regex no programa

A maior expressão regex no decoder é

$$([A-Z]\{3\})(\backslash d\{3\})(CB|TCU)*$$

com 26 caracteres. Para efeitos práticos este é um valor muito pequeno então podemos assumir m constante.

Sabemos que o número de expressões é 11, também um valor que pode ser assumindo contante, logo q é igual à 1, portanto.

$$O_{decode}(p * 1 * (1 + n))$$

$$O_{decode}(p * n)$$

Apenas as variáveis "p" e "n" dependem de valores externos.

6

Modelo de Dados

Nesta seção, vamos ser explicado o modelo de dados desenvolvido para o projeto, abordando sua estrutura lógica e os componentes principais. O objetivo deste modelo é garantir flexibilidade para futuras alterações e manutenções, proporcionando uma base sólida e expansível para o aero.

6.1

Modelo Lógico

O modelo de dados foi feito de forma que futuras alterações possam ser absorvidas facilmente. Abaixo está o diagrama entidade-relacionamento no qual o nome no topo do retângulo identifica o nome da tabela. A lista abaixo mostra as colunas dessas tabelas, a sigla PK denota *chave primária* e FK *chave estrangeira*.

Uma relação é denotada pelas setas ligando duas tabelas. A cardinalidade da relação é indicada pelos números entre parênteses.

Para a relação **Aerodrome-ILS**, temos (1, 1) para (0, n), significando que um aeródromo pode ter zero ou mais frequências de ILS e esta só pode ser de um único aeródromo.

Já na relação **Aerodrome** com **Runway**, um aeródromo deve ter **uma ou mais** pistas.

Note que as tabelas "CommunicationType", "ILSCategory" e "PavementType" poderiam ser substituídas por colunas enum nas tabelas "Communication", "ILS" e "Runway", porém a manutenção seria difícil [12], pois teríamos que alterar a estrutura das tabelas (possivelmente tirando o sistema do ar) caso fosse necessário adicionar um tipo novo de comunicação, por exemplo. Fazendo com uma tabela externa é necessário apenas adicionar uma nova linha.

6.2

Tabelas

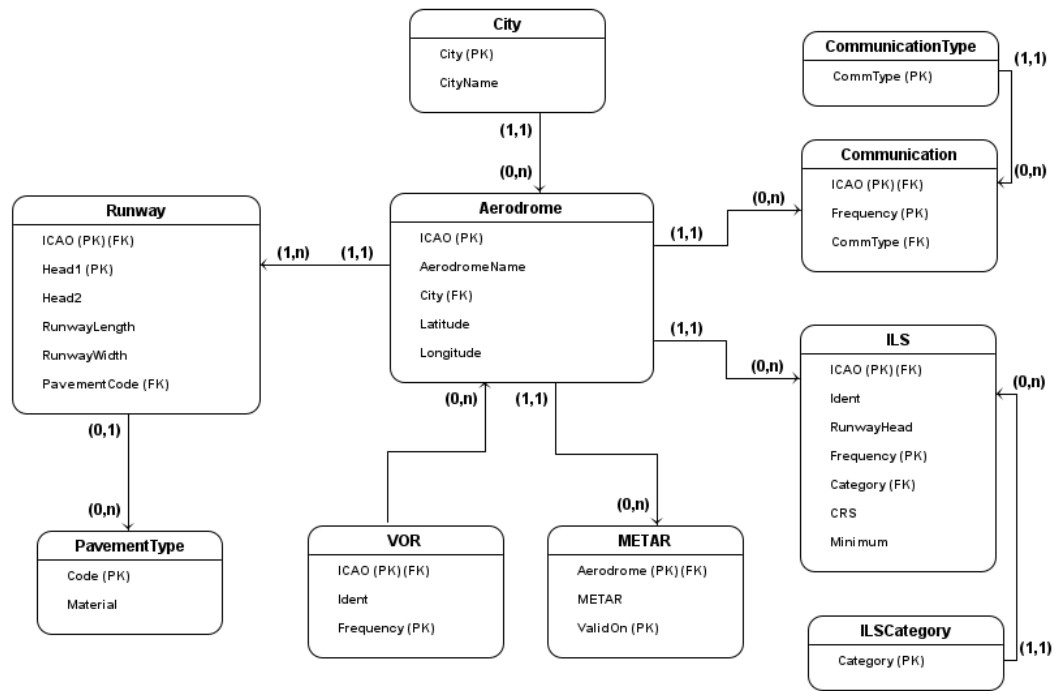


Figura 6.1: Diagrama E/R

Tabela 6.1: City

Nome	Descrição	Tipo
City (PK)	Código do IBGE [13] da cidade	INTEGER
CityName	Nome da cidade escrito em Português com a primeira letra maiúscula	VARCHAR (50)

Tabela 6.2: Aerodrome

Nome	Descrição	Tipo
ICAO (PK)	O código ICAO do aeródromo emitido pela Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO).	VARCHAR(4)
AerodromeName	O nome do aeródromo conforme definido pelo AISWEB, sistema nacional de informações aeronáuticas.	VARCHAR(50)
Continua na próxima página		

Tabela 6.2 – Continuação da página anterior

Nome	Descrição	Tipo
City (FK)	Chave estrangeira para o código da cidade	INTEGER
Latitude	A latitude do aeroporto em graus no formato de graus decimais (DD, Decimal Degrees). Três dígitos para representar a parte inteira e seis dígitos para a fracionária.	DECIMAL(9, 6)
Longitude	A longitude do aeroporto, seguindo o mesmo formato da latitude.	DECIMAL(9, 6)

Tabela 6.3: METAR

Nome	Descrição	Tipo
Aerodrome (PK) (FK)	Chave estrangeira para qual aeródromo este METAR se refere	VARCHAR(4)
METAR	O METAR em si	VARCHAR(100)
ValidOn (PK)	Timestamp com o momento que este metar é válido. É construído a partir do item do metar "ddhhmmZ" em que "dd" é o dia e "hhmm" é a hora zulu (UTC). O mês e ano são o mês e ano atuais do sistema.	DATETIME

Tabela 6.4: PavementType

Nome	Descrição	Tipo
Code (PK)	O código (em Inglês) do tipo de pavimento usado. É formado por três letras maiúsculas.	VARCHAR(3)
Material	O nome do pavimento em Português, com a primeira letra maiúscula.	VARCHAR(20)

Exemplo de siglas:

Code	Material
ASP	Asfalto
CON	Concreto
GVL	Brita

É importante conhecer as características dos tipos de pistas de pouso e decolagem, pois seu comprimento determinará a quantidade de freio necessária para parar uma determinada aeronave.

Se a pista for muito curta, determinados modelos de avião não poderão pousar. A largura da pista determina a envergadura máxima que uma aeronave pode ter para operar nessa pista. Se uma pista for muito estreita, uma aeronave quadrimotora como o Boeing 747 pode sofrer ingestão de materiais, já que os dois motores mais externos ficarão para fora da área da pista, sobre o gramado.

Tabela 6.5: Runway

Nome	Descrição	Tipo
ICAO (FK e PK)	O código ICAO do aeródromo ao qual a pista está associada, utilizado como chave estrangeira fazendo a ligação com a tabela 'Aerodrome'.	VARCHAR(4)
Continua na próxima página		

Tabela 6.5 – Continuação da página anterior

Nome	Descrição	Tipo
Head1 (PK)	Número e possível letra que identifica uma das cabeceiras da pista. Um aeroporto nunca terá cabeceiras repetidas, então ICAO e Head1 formam uma chave primária mínima.	VARCHAR(3)
Head2 (PK)	O mesmo, mas para a outra cabeceira.	VARCHAR(3)
RunwayLength	Comprimento da pista em metros.	INTEGER
RunwayWidth	Largura da pista em metros.	INTEGER
PavementCode (FK)	O tipo de pavimento da pista, referenciando a tabela 'PavementType'.	VARCHAR(3)

Para cabeceiras paralelas, ou seja, que apontam para a mesma direção, temos:

6.2.1

Pista única

A proa em que a pista aponta, com divisão por 10 arredondada. Por exemplo, em Fortaleza, temos uma cabeceira com curso de 126 graus, dividindo por 10 temos 12,6, arredondando temos o número 13 da cabeceira.

6.2.2

Pista dupla

Para duas pistas paralelas, usamos L para a cabeceira da esquerda e R para a da direita. Por exemplo, no Santos Dumont, de costas para o Pão de Açúcar, temos as cabeceiras 02L (na esquerda) e 02R (na direita).

6.2.3

Pista tripla

Não temos aeroportos com três pistas paralelas no Brasil, mas são usadas as letras L, C e R. C para a pista central.

Tabela 6.6: CommunicationType

Nome	Descrição	Tipo
CommType (PK)	O tipo de comunicação, podendo ser "Torre", "Solo", "ATIS", "Tráfego" ou "Operação". Mais adiante outros tipos podem ser adicionados.	VARCHAR(10)

Tabela 6.7: Communication

Nome	Descrição	Tipo
ICAO (PK e FK)	O código ICAO do aeródromo ao qual a frequência de comunicação está associada, utilizado como chave estrangeira referenciando a tabela 'Aerodrome'.	VARCHAR(4)
Frequency (PK)	A frequência em MHz multiplicada por 1000. Já que as frequências de comunicação possuem três dígitos decimais, multiplicamos por mil para armazenar em inteiro de ponto fixo. ICAO e frequency formam chave primária e usar um DECIMAL para uma PK, não é muito eficiente. Note que uma frequência, não necessariamente é única em todo o país, para distâncias longas, onde não há risco de interferência, é possível haver frequências repetidas.	INTEGER
CommType (FK)	O tipo de comunicação, chave estrangeira para 'CommunicationType'.	VARCHAR(20)

Esta tabela lista as diferentes categorias de Sistema de Pouso por Instrumentos (Instrument Landing System).

Tabela 6.8: ILSCategory

Nome	Descrição	Tipo
Category (PK)	A categoria de ILS, sendo "CAT I", "CAT II", "CAT IIIA", "CAT IIIB" ou "CAT IIIC". Será explicado melhor em "Minimus" na tabela "ILS".	VARCHAR(10)

Tabela 6.9: ILS

Nome	Descrição	Tipo
ICAO (PK e FK)	O código ICAO do aeródromo ao qual o sistema de pouso está associado, utilizado como chave estrangeira referenciando a tabela 'Aerodrome'.	VARCHAR(4)
Frequency (PK)	A frequência de operação do ILS em MHz, multiplicado por 10. Fazemos isso para poder usar o tipo INTEGER, já que um DECIMAL como chave primária não seria eficiente, como já explicado na tabela de comunicação.	INTEGER
Ident	Identificação de três letras maiúsculas única do ILS para aquele aeródromo. Aparece na carta aérea do procedimento ILS.	VARCHAR(3)
RunwayHead	Para qual pista este ILS se refere.	VARCHAR(3)
Category (FK)	A categoria do ILS, referenciando a tabela 'ILSCategory'.	VARCHAR(10)
Continua na próxima página		

Tabela 6.9 – Continuação da página anterior

Nome	Descrição	Tipo
CRS	A referência do curso de aproximação do ILS. É a proa final que a aeronave deve manter para o correto alinhamento nesta cabeceira.	INTEGER
Minimum	A altura mínima de decisão em pés para operação do ILS. A partir desta altura, é desligado o piloto automático e o resto da aproximação é feita manualmente. Se a altitude da aeronave ficar abaixo deste valor e ainda não for possível ter visual da pista é obrigatória a arremetida. Quando maior a categoria do ILS, maior a precisão do sistema, portanto a Minimus será mais baixa. Uma "CAT IIIC"(pronuncia-se cat três charlie), possui Minimus zero, portanto a aeronave pode pousar de forma totalmente automática.	INTEGER

Esta tabela registra os sistemas de navegação VOR/DME disponíveis em um aeródromo. Não foi incluída uma tabela para as frequências de NDB porque este sistema está caindo em desuso.

Tabela 6.10: VOR

Nome	Descrição	Tipo
ICAO (PK e FK)	O código ICAO do aeródromo ao qual o VOR/DME está associado, utilizado como chave estrangeira referenciando a tabela 'Aerodrome'.	VARCHAR(4)
Continua na próxima página		

Tabela 6.10 – Continuação da página anterior

Nome	Descrição	Tipo
Frequency (PK)	A frequência de operação do VOR/DME em MHz multiplicada por 10.	INTEGER
Ident	Identificação única do VOR/DME para aquele aeródromo. Forma chave primária junto com ICAO.	VARCHAR(3)

7

Arquitetura

A arquitetura foi pensada para ser implementada com o Docker e Docker Compose. Cada programa que precisa ser executado é rodado em um serviço separado. Exceto o Gunicorn, todos os outros serviços usam imagens prontas do Docker Hub, o que oferece mais segurança com as atualizações constantes.

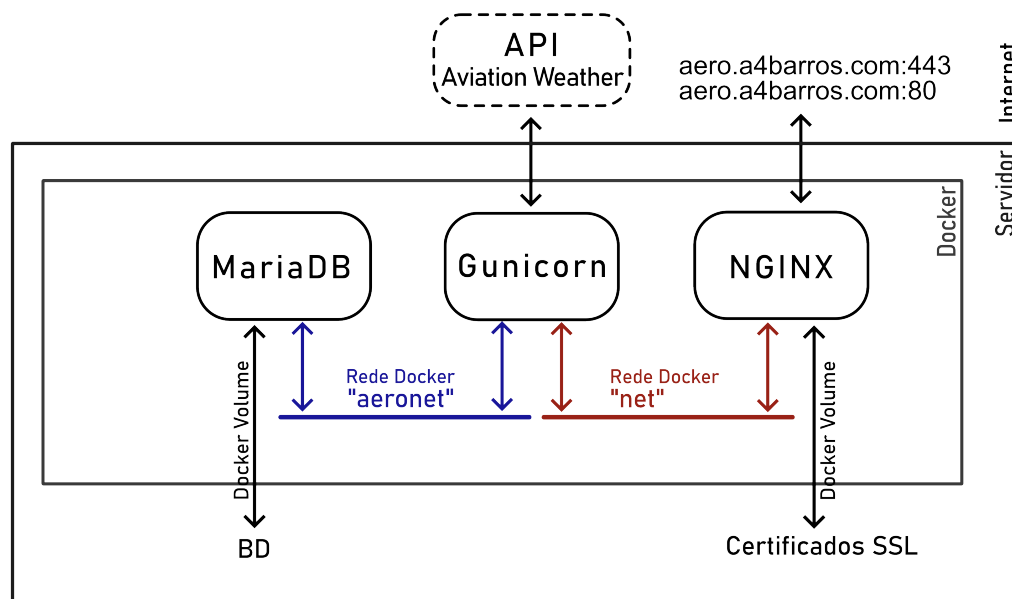


Figura 7.1: Modelo de Arquitetura

7.1

Docker Network

A porta 5000 do Gunicorn não estará disponível para todos os serviços. Por segurança, é usada a função de "network". Observe no diagrama que a proxy NGINX compartilha com o Gunicorn a rede "net", para o NGINX, o Gunicorn não pode ser acessado por `localhost:5000`, e sim por `http://aero:5000`, "aero" sendo o nome do serviço no Docker Compose.

7.2

Docker Secrets

Para aumentar a segurança de acesso ao banco, é usada a funcionalidade "secrets". Nela, no Docker Compose, você informa um arquivo de texto no host onde estará uma senha, uma senha por arquivo. No mesmo Compose, você

informa quais serviços têm acesso a cada senha. Caso o serviço de banco de dados, por exemplo, tenha acesso a senha `db-password.txt`, será feito um `bind` do arquivo `db-password.txt` no host para o `"/run/secret/db-password.txt"` no guest. Tanto os bancos como o servidor Gunicorn usam este método para terem acesso às senhas dos bancos.

7.3

Serviços

7.3.1

MariaDB

Este banco de dados relacional guarda toda a informação mais ou menos fixa sobre os aeródromos, conforme explicado no capítulo de modelo de dados.

7.3.2

Proxy NGINX

Faz o HTTPS funcionar, dá suporte ao HTTP/2 e ao header HTTP keep-alive. O Gunicorn só tem suporte ao primeiro. De qualquer forma, a documentação do Gunicorn não recomenda que ele esteja diretamente ligado à Internet [14]. Já que tenho outros projetos na mesma máquina, uso subdomínios. Na configuração do NGINX, o server block com hostname `aero.a4barros.com` é redirecionado para o endereço interno `"https://aero:5000"`.

7.4

Flask/Gunicorn

Já que o Gunicorn é o serviço principal: o servidor onde o backend implementado em Flask roda, fiz um Dockerfile próprio iniciando a partir de uma imagem do Alpine, devido a ser lightweight. O Python e as dependências do projeto são instalados automaticamente pelo Dockerfile e, por fim, o arquivo de entrada `server.py` é executado usando o servidor Gunicorn. As configurações dele ficam no arquivo `gunicorn_config.py` e apenas configura a porta para 5000 e usa três workers.

A documentação do Gunicorn informa a seguinte fórmula para determinar a quantidade de workers. [15]

$$\begin{aligned} N_{worker} &= 2 * N_{cores} + 1 \\ N_{worker} &= 2 * 1 + 1 = 3 \end{aligned} \tag{7-1}$$

7.5

Produção

O site se encontra em produção no endereço <https://aero.a4barros.com>. Ele está hospedado em uma VPS com as seguintes características:

- **CPU:** AMD EPYC 7713 (1 core disponível) @ 2GHz
- **RAM:** 1GB
- **Armazenamento:** 25GB
- **SO:** Ubuntu 22.04.4 LTS

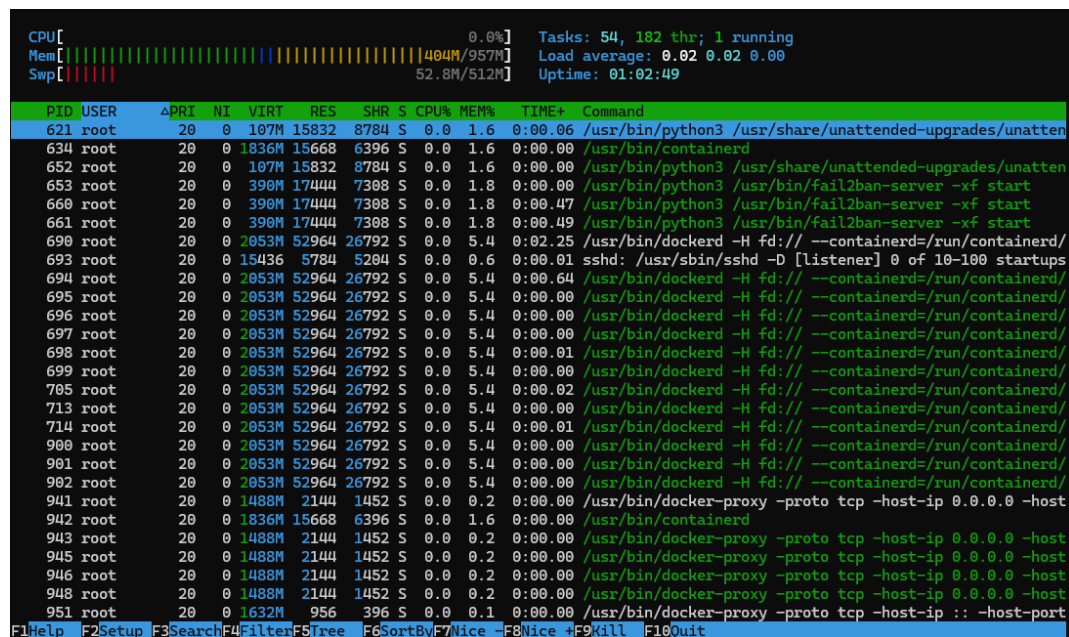


Figura 7.2: Uso do sistema em baixa demanda

Mesmo com uma configuração bastante modesta, o sistema roda sete containers Docker, usando aproximadamente metade da memória primária (RAM) em idle.

7.6

Diagrama de sequência

1. O usuário realiza uma requisição para a rota raiz ou `/info/{icao}`.
2. Um servidor NGINX funcionando como proxy realiza o limite de requisições por segundo e bloqueia user-agents que aparentem ser robôs. Caso a requisição passe pelo filtro, é realizado um proxy-pass para o servidor Gunicorn.

```
root@a4-server: ~/a4 $ docker ps
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	NAMES	CREATED	STATUS	PORTS
885861e72965	a4-aero	"python3 -u -m gunic..."	a4-aero-1	3 hours ago	Up About an hour	0.0.0.0:5000->5000/tcp, :::5000->5000/tcp
8bc8d020f125	nginx	"/docker-entrypoint..."	a4-a4-1	3 hours ago	Up About an hour	0.0.0.0:80->80/tcp, :::80->80/tcp
1e7763d35d44	a4-axia	"gunicorn -c gunicor..."	a4-axia-1	3 hours ago	Up About an hour	5002/tcp
4434a160cee2	a4-todo	"gunicorn -c gunicor..."	a4-todo-1	3 hours ago	Up About an hour	5001/tcp
c4c10e0c261	redis:alpine	"docker-entrypoint.s..."	a4-redis-1	3 hours ago	Up About an hour	6379/tcp
5ec6396a65b9	mariadb	"docker-entrypoint.s..."	a4-aero-db-1	3 hours ago	Up About an hour	0.0.0.0:3306->3306/tcp, :::3306->3306/tcp
0e52641e9fda	a4-conv	"/docker-entrypoint..."	a4-conv-1	3 hours ago	Up About an hour	80/tcp, 4001/tcp

Figura 7.3: Containers Docker em execução

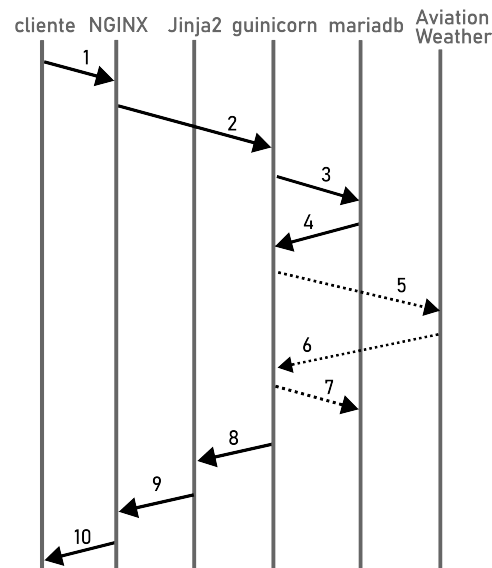


Figura 7.4: Diagrama de sequência

- Para a rota raiz, é feito um SELECT no banco para pegar informações de todos os aeroportos. Na rota `"/info/{icao}"`, é feito um SELECT-WHERE para buscar apenas um aeroporto. A ORM é usada para isto, portanto os comandos SQL não aparecem diretamente no código.
- O banco de dados responde à requisição. Para a rota `"/info/{icao}"`, é verificado se o METAR existente no banco é válido para aquela hora. Se for, o sistema vai para o passo 8; se não, continua para o passo 5.
- É feita uma requisição para a API do Aviation Weather pedindo o METAR para o aeroporto em questão. O sistema vai para o passo 3.
- A API responde.
- O METAR atualizado é gravado no banco.

8. O servidor envia as informações necessárias ao Jinja2 para a geração da página.
9. A página HTML é gerada.
10. O usuário recebe esta página.

8

Conclusão e Próximos Passos

O desenvolvimento deste projeto busca juntar as funcionalidades comumente usadas na simulação de voo em uma plataforma acessível e amigável, buscando promover um maior nível de realismo na simulação de voo.

A arquitetura implementada, utilizando Docker e Docker Compose, garante uma implementação modular, segura e, com o uso do Git, de fácil deploy caso seja necessário trocar o ISP no futuro. O uso de um banco de dados como o MariaDB e Docker Secrets para armazenadas suas senhas, proporciona um ambiente robusto para o projeto. O uso de uma VPS modesta para hospedagem do projeto em produção demonstra a viabilidade do sistema em ambientes com recursos limitados.

Para o próximo semestre está planejado implementar o módulo que informa a pista ativa. É mais seguro para o voo se a decolagem for realizada a partir da cabeceira em que o vento está soprando contra o sentido da movimentação do avião. Por isso, em um momento os procedimentos estão sendo realizados em um lado da pista e em outro momento pelo outro lado.

Nem sempre a direção do vento estará paralela com a pista, mas, mesmo assim, tenta-se decolar e pousar no sentido que a componente paralela ao sentido do movimento da aeronave fique com sentido contrário.

A pista ativa normalmente é informada pela torre de controle, mas é interessante o piloto se antecipar.

Outro módulo que será implementado é o cálculo do perfil de descida. Para que o avião chegue no procedimento de aproximação com a altitude expressa na carta de aproximação, é necessário calcular uma razão de descida em pés por minuto, a partir da altitude atual, da altitude que se quer chegar e da velocidade atual.

É interessante poder adicionar e editar aeródromos sem precisar estar logado na máquina de produção via SSH. Será feito uma seção do site protegida por nome de usuário e senha que disponibilizará uma interface para estas mudanças.

9

Referências bibliográficas

- 1 BORT, J. *Here's The Microsoft Surface 2 Tablet Delta Bought 11,000 Pilots Instead Of iPads*. 2014. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/surface-2-tablet-delta-bought-pilots-2014-1>>. Acesso em: 01 maio 2024.
- 2 MOORMAN, R. *EFBs: More Than Paper Replacers*. 2018. Disponível em: <<https://interactive.aviationtoday.com/avionicsmagazine/gca-link-april-2018/efbs-more-than-paper-replacers/>>. Acesso em: 01 maio 2024.
- 3 PRADZ. *Performance Calculation*. 2024. Disponível em: <<http://perfcalc.pradz.de/index.php>>. Acesso em: 25 abril 2024.
- 4 National Weather Service. *Information Reporting*. 2024. Disponível em: <<https://www.weather.gov/asos/InformationReporting.html>>. Acesso em: 17 abril 2024.
- 5 KOCH, S. *METAR / SPECI*. 2024. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/invacivil/meteorologia/metar>>. Acesso em: 08 abril 2024.
- 6 National Weather Service. *Aviation Weather Center*. 2024. Disponível em: <<https://aviationweather.gov/api/data/metar?ids=SBFZ>>. Acesso em: 17 abril 2024.
- 7 Airport Codes. *IATA codes*. 2024. Disponível em: <<https://airportcodes.io/en/iata-codes/>>. Acesso em: 16 abril 2024.
- 8 Airport Codes. *ICAO codes*. 2024. Disponível em: <<https://airportcodes.io/en/icao-codes/>>. Acesso em: 16 abril 2024.
- 9 NIST. *What are International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC)?* 2023. Disponível em: <<https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/nist-time-frequently-asked-questions-faq>>. Acesso em: 17 abril 2024.
- 10 College of DuPage Weather Lab. *METAR HELP*. 2024. Disponível em: <<https://weather.cod.edu/notes/metar.html>>. Acesso em: 17 abril 2024.
- 11 Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Como decodificar o METAR e o SPECI?* 2024. Disponível em: <<https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/como-decodificar-o-metar-e-o-speci/>>. Acesso em: 17 abril 2024.
- 12 EMELYANOV, S. *The Pros and Cons of Enum Data Type in Database Design*. 2023. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/pros-cons-enum-data-type-database-design-sergey-emelyanov>>. Acesso em: 17 abril 2024.

13 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Códigos dos Municípios*. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/codigos-dos-municipios.php>>. Acesso em: 17 junho 2024.

14 CHESNEAU, B. *Deploying Gunicorn*. 2024. Disponível em: <<https://docs.gunicorn.org/en/latest/deploy.html>>. Acesso em: 24 abril 2024.

15 CHESNEAU, B. *How Many Workers*. 2024. Disponível em: <<https://docs.gunicorn.org/en/latest/design.html>>. Acesso em: 24 abril 2024.