



**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Matemática**

Bacharelado em Estatística

**MONITORAMENTO E PREVISÃO DO
NÚMERO DE VOOS SOB
RESPONSABILIDADE DO CONTROLE
DE APROXIMAÇÃO DE UBERLÂNDIA**

Ruth Souto de Oliveira Rasé

Uberlândia-MG

2021

Ruth Souto de Oliveira Rasé

**MONITORAMENTO E PREVISÃO DO
NÚMERO DE VOOS SOB
RESPONSABILIDADE DO CONTROLE
DE APROXIMAÇÃO DE UBERLÂNDIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Estatística como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Estatística.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Borges de Araújo

**Uberlândia-MG
2021**



**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Matemática**

Coordenação do Curso de Bacharelado em Estatística

A banca examinadora, conforme abaixo assinado, certifica a adequação deste trabalho de conclusão de curso para obtenção do grau de Bacharel em Estatística.

Uberlândia, _____ de _____ de 20_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lúcio Borges de Araújo

Profa. Dra. Mirian Fernandes Carvalho Araújo

Profa. Dra. Priscila Neves Faria

**Uberlândia-MG
2021**

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e pela minha família, por ter me sustentado até aqui sempre me conduzindo com amor e graça.

Ao meu esposo Daniel Rasé por todo apoio, carinho e amor nesses anos de processo de formação, estando ao meu lado orando, participando dos melhores e piores momentos da minha vida. Sem você seria impossível retomar os estudos e assistir às aulas, agradeço por ter cuidado do Vicente enquanto eu estudava.

Ao meu filho Vicente, nosso milagre, que mesmo tão pequeno me ensina o que é dedicação, amor e resiliência.

À minha mãe Eva e ao meu irmão Samuel por todo apoio incondicional, amor e palavras encorajadoras durante toda minha vida para que eu não desistisse desse curso.

A todos meus amigos, em especial aos meus amigos e também minha equipe durante esses anos Tiekó e Arthur, pela amizade, força e compreensão.

A todos meus colegas de curso, que foram essenciais durante minha formação, em especial ao Mateus Aguiar e ao Tiago Kerr, que foram colegas ajudadores e incentivadores.

Aos professores pelo conhecimento transmitido e aos amigos da Universidade que estiveram ao meu lado nesse caminho.

Ao meu orientador Professor Doutor Lúcio Borges de Araújo, pelo ensino, orientação, correções, incentivos e pelo empenho dedicado à elaboração desse trabalho.

A todos que fizeram parte direta ou indiretamente da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

O Espaço Aéreo Brasileiro, em especial a Área de Controle Terminal, onde ocorre a convergência de aeronaves em subida em rota ou em descida para pouso, é uma área que exige capacidade cognitiva e conhecimento das regras por parte do controlador de tráfego aéreo, quando se trata de área de controle não radar, a exigência aumenta. Este trabalho monitorou a quantidade de tráfego aéreo sob responsabilidade de um Controlador de Tráfego Aéreo na Área de Controle Terminal da cidade de Uberlândia e através de séries temporais, analisou e verificou a presença de tendência, sazonalidade. Fez-se a previsão, a fim de estudar o emprego da vigilância radar, aumentando a capacidade dos controladores de tráfego aéreo da região e conseqüentemente a segurança no espaço aéreo em questão. Foram analisadas duas séries temporais e ambas o modelo SARIMA, foi o que melhor se ajustou as séries estudadas, com baixo erro de previsão e boa acuracidade.

Palavras-chave: Séries Temporais, Tráfego Aéreo, Análise Quantidade de voos, Segurança de Voo, SARIMA.

ABSTRACT

The Brazilian Airspace, in particular the Terminal Control Area, where the confluence of aircraft ascending en route or descending for landing, is an area that requires cognitive capacity and knowledge of the rules on the part of the air traffic controller. When it comes to non radar control area, the demand increases. This work monitored the amount of air traffic under the responsibility of an Air Traffic Controller in the Terminal Control Area of Uberlândia and through time series, analyzed and verified the presence of trend, seasonality. Made the forecast, in order to study the use of radar surveillance, increasing the capacity of air traffic controllers in the region and, consequently, safety in the airspace in question. Two time series were analyzed and both the SARIMA model was the one that best fitted the series studied, with low forecast error and good accuracy.

Keywords: Time Series, Air Traffic, Flight Quantity Analysis, Flight Safety, SARIMA.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	I
Lista de Tabelas	III
1 Introdução	1
2 Metodologia	5
2.1 Dados	5
2.2 Séries temporais	5
2.2.1 Tendência e sazonalidade	5
2.2.2 Modelos	6
2.2.3 Identificação, validação do modelo e erros de precisão	7
3 Resultados	9
3.1 Série 1: Número máximos de voos por hora na TMA-UL	9
3.1.1 Análise das séries	9
3.1.2 Estimação e validação dos modelos	11
3.1.3 Previsão	14
3.2 Série 2: Número de voos mensais na TMA-UL, do ano de 2016 a 2021.	16
3.2.1 Análise das séries	16
3.2.2 Estimação e validação dos modelos	18
3.2.3 Previsão	20
3.3 Discussões	21
4 Conclusões	23
Referências Bibliográficas	25

LISTA DE FIGURAS

1.1	Divisão do Espaço Aéreo (Fonte: Site da Força Aérea Brasileira, disponível em https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/22979/	1
1.2	Divisão do Espaço Aéreo Controlado (Fonte: Manual do Piloto, disponível em https://http://manualdopiloto.blogspot.com/2011/01/espaco-aereo-controlado-divisao.html	2
1.3	Carta Aeronáutica TMA-UL, 2016 - elaborada e disponibilizada ATCO e geógrafo Leonardo Gentil Santana.	3
3.1	Série temporal dos números máximos de voos por hora na Terminal Uberlândia.	9
3.2	Decomposição da série 1.	10
3.3	Função de Autocorrelação e Função de Autocorrelação Parcial da série 1.	10
3.4	Série 1 diferenciada.	11
3.5	ACF e PACF da série 1 diferenciada.	11
3.6	Gráfico dos resíduos do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].	13
3.7	Histograma dos resíduos do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].	13
3.8	Periodograma dos resíduos do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].	13
3.9	Gráfico da previsão de 24 valores do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].	14
3.10	Série do número de voos mensais na TMA-UL, do ano de 2016 a 2021.	16
3.11	Decomposição da série 2.	17
3.12	Função de Autocorrelação e Função de Autocorrelação Parcial da série 2.	17
3.13	Série 2 diferenciada.	18
3.14	ACF e PACF da série 2 diferenciada.	18
3.15	Gráficos dos resíduos do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].	19
3.16	Histograma dos resíduos do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].	20
3.17	Periodograma dos resíduos do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].	20
3.18	Gráfico da previsão de 10 valores do modelo SARIMA (0,1,1),(1,0,0)[12].	21

LISTA DE TABELAS

2.1	Comportamento ACF e PACF.	7
3.1	Valores de AIC dos modelos testado da série 1.	12
3.2	Valores do p -valor dos parâmetros dos modelos estudados da série 1.	12
3.3	Valores previstos da série 1.	15
3.4	Valores de AIC dos modelos testado da série 2.	19
3.5	Valores do p -valor dos parâmetros dos modelos estudados da série 2.	19
3.6	Valores previstos da série 2.	21

1. INTRODUÇÃO

O espaço aéreo brasileiro é dividido em espaço aéreo inferior, que é definido como limite inferior o solo ou água até o nível de voo 245 inclusive (FL 245 – *flight level* ou 24500 pés), e o espaço aéreo superior, que é definido com limite inferior o FL 245 (exclusive) e limite superior ilimitado conforme especificado na Figura 1.1 [4].

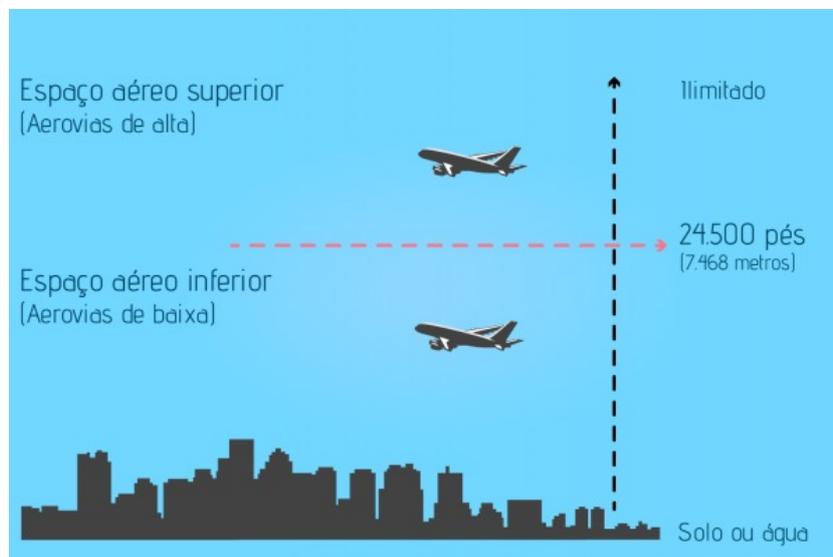


Figura 1.1: Divisão do Espaço Aéreo (Fonte: Site da Força Aérea Brasileira, disponível em <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/22979/>).

A Figura 1.2 ilustra o espaço aéreo inferior que contém espaço aéreo não controlado e espaços aéreos controlados. Os espaços aéreos controlados, que possuem configurações variáveis, são [4]:

- ATZ ou Zona de Tráfego Aéreo: Espaço Aéreo envolve o circuito de tráfego e área de manobras;
- CTR ou Zona de Controle: Espaço aéreo envolvendo um ou mais aeródromos próximos e capaz de conter as trajetórias dos procedimentos de aproximação e saída por instrumentos;
- TMA ou Área de Controle Terminal: Área de controle situada na confluência de rotas ATS e envolve os procedimentos de chegada e saída de um ou mais aeródromos. Contém uma ou mais CTR e estabelece um espaço aéreo controlado adicional para as aproximações e saídas de um ou mais aeródromos; e

- CTA ou Área de Controle Inferior: Compreende as aerovias inferiores, as áreas de controle terminal e outras partes do espaço aéreo inferior, assim definidas como áreas de controle.



Figura 1.2: Divisão do Espaço Aéreo Controlado (Fonte: Manual do Piloto, disponível em <https://http://manualdopiloto.blogspot.com/2011/01/espaco-aereo-controlado-divisao.html> .

Dentro do espaço aéreo brasileiro são prestados Serviços de Tráfego Aéreo (ATS), sendo eles:

- Serviço de controle de tráfego aéreo - serviço de controle de área, serviço de controle de aproximação e o serviço de controle de aeródromo;
- Serviço de informação de voo; e
- Serviço alerta.

Os serviços de controle de tráfego aéreo são prestados por um órgão de Controle (ATC) que correspondem a:

- Torre de Controle de Aeródromo (TWR) – órgão que prestará serviço de controle de aeródromo;
- Controle de Aproximação (APP) – órgão que prestará serviço de controle de aproximação, podendo prestar serviço de controle de área;
- Controle de Área (ACC) - órgão que presta serviço de controle de área, podendo prestar serviço de controle de aproximação.

Na prestação do serviço de controle de tráfego aéreo, o órgão ATC, através do Controlador de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Controller* - ATCO), emite autorizações e informações com a finalidade de prevenir colisão entre aeronaves sob seu controle, acelerar e manter um fluxo de tráfego ordenado e para prover esse serviço, é preciso dispor da informação sobre o movimento intencional de cada aeronave, ou variações do mesmo, e de dados atuais sobre a progressão real de cada uma delas, e determinar as posições relativas que guardam entre si as aeronaves conhecidas [4].

O objetivo geral deste trabalho é analisar os voos sob responsabilidade do Controle de Aproximação de Uberlândia (TMA-UL) no de 2016 a 2021, sendo esses divididos em dois objetivos específicos:

- Através de duas séries temporais monitorar e analisar o tráfego que evoluiu na Área de Controle Terminal de Uberlândia ;
- Prever dados futuros e verificar a viabilidade de instalação do Sistema de Vigilância Radar a fim de prover o aumento da segurança operacional.

2. METODOLOGIA

2.1 DADOS

Os dados utilizados foram coletados do Sistema de Gerenciamento de Torre de Controle-SGTC, do ano de 2016 a 2021. Foram analisadas a quantidade de tráfego aéreo que cruzam e os que pousam e decolam dos aeródromos na TMA-UL.

Através de séries temporais pretendeu-se monitorar e prever o aumento do movimento e do movimento máximo por hora para sugestão de instalação de radar na Área de Controle de Terminal Uberlândia e para melhoria do serviço de controle prestado. Abaixo estão dispostas as séries estudadas no trabalho:

- Série 1: Número máximo de voos por hora na TMA-UL no ano de 2021.
- Série 2: Número de voos mensais na TMA-UL, do ano de 2016 a 2021.

2.2 SÉRIES TEMPORAIS

2.2.1 TENDÊNCIA E SAZONALIDADE

Uma série temporal é uma sequência cronológica ou orientada para o tempo de observações sobre uma variável de interesse [7]. Existem vários modelos para ajustar uma série temporal, um modelo clássico supõe que a série pode apresentar 4 padrões [8]:

- Tendência (T): comportamento a longo prazo da série;
- Variações cíclicas ou ciclos: flutuações nos valores da variável com duração superior a um ano, e que se repetem com certa periodicidade;
- Variações sazonais: flutuações nos valores com duração inferior a um ano;
- Variações irregulares: variações inexplicáveis, resultados de eventos inesperados.

A série é dita estacionária se ela não apresenta tendência e/ou sazonalidade. Defini-se ruído branco como um processo estacionário, sendo uma sequência de variáveis aleatórias independente, identicamente distribuídas representado por a_t , e tem como característica média zero e variância σ_a^2 .

2.2.2 MODELOS

Serão usados para a análise dos dados os modelos Autoregressivos, Médias Móveis, Autoregressivos combinados com Médias Móveis, Autoregressivos integrados com Médias Móveis e Autoregressivos integrados com Médias Móveis Sazonal definidos abaixo [2]:

- Os Modelos Autorregressivos (AR) de ordem p , onde p é o número de parâmetros a serem estimados, usam uma combinação linear de valores passados da própria variável e um erro, descrito por:

$$\bar{Z}_t = \phi_1 \bar{Z}_{t-1} + \phi_2 \bar{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \bar{Z}_{t-p} + a_t \quad (2.1)$$

Em que a_t é ruído branco (erro aleatório), ψ é parâmetro da função, \bar{Z}_t é observação no tempo t e \bar{Z}_{t-i} é a observação no tempo $t - i$.

- Modelos Médias Móveis (MA) de ordem q , quando tornamos \bar{Z}_t linearmente dependentes de um número finito de a 's (erros aleatórios) é definido por:

$$\bar{Z}_t = \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (2.2)$$

Em que a_t é ruído branco (erro aleatório), θ é parâmetro da função, \bar{Z}_t é a observação no tempo t e a é o erro no tempo $t - q$.

- Modelos Autorregressivos combinado com Média Móveis (ARMA), é a junção do modelo MA e AR. Na prática esses modelos AR, MA e ARMA é comumente usados para séries estacionárias. O modelo ARMA (p, q) é definido por:

$$\bar{Z}_t = \phi_1 \bar{Z}_{t-1} + \phi_2 \bar{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \bar{Z}_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (2.3)$$

Em que a_t é ruído branco (erro aleatório), ψ é parâmetro da função, θ é parâmetro da função, \bar{Z}_t observação no tempo t e \bar{Z}_{t-p} é a observação no tempo $t - p$ e a_{t-q} é o erro no tempo $t - q$.

- Modelos Autorregressivos Integrados de Médias Móveis (ARIMA) são utilizados para séries não estacionárias em que torna possível remover fontes de variação transformando em estacionária. Essa transformação se dá removendo a tendência, tomando diferenças sucessivas da série original até que torne uma série estacionária. Os processos ARIMA podem ser gerados pela soma ou integração do processo ARMA estacionário " d " vezes. O modelo ARIMA (p, d, q) é definido por :

$$W_t = \phi_1 W_{t-1} + \dots + \phi_p W_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (2.4)$$

Em que $W_t = \nabla d Z_t$.

- Modelos Autorregressivos Integrados de Médias Móveis Sazonais (SARIMA) são utilizados para séries que contém componente sazonal repetindo a cada s observações. Para tornar a série estacionária é necessária tomar diferenças no período sazonal [8]. O modelo SARIMA de ordem $(p, d, q) \times (P, D, Q)$ é definido por:

$$\phi(B)\Phi(B^s)W_t = \theta(B)\Theta(B^s)\varepsilon_t \quad (2.5)$$

Em que:

$$\phi(B) = (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_p B^p)$$

$$\Phi(B^s) = (1 - \phi_s B^s - \dots - \phi_p B^p)$$

$$W_t = \nabla^d \nabla_s^D X_t$$

$$\theta(B) = (1 + \varphi_1 B + \dots + \varphi_q B^q)$$

$$\Theta(B^s) = (1 + \alpha_s B^s + \dots + \alpha_Q B^Q)$$

2.2.3 IDENTIFICAÇÃO, VALIDAÇÃO DO MODELO E ERROS DE PRECISÃO

"Lag's" pode ser considerado um conjunto de valores de uma série temporal, plotado, em relação a um segundo conjunto de dados posterior, com atraso. A Função de Autocorrelação (*Autocorrelation Function-ACF*) relaciona os "lags" e os valores de uma série temporal. Já uma Função de Autocorrelação parcial (*Partial Autocorrelation Fuction-PACF*), encontra a correlação dos resíduos com os "lags" futuros.

A Função de Autocorrelação e a Função de Correlação Parcial ajuda na identificação do modelo a ser utilizado na estimação aos dados. A partir da observação do comportamento da ACF e PACF, exposto na Tabela 2.1 e devido suas propriedades podemos sugerir as ordens dos parâmetros (p, q) , norteando a escolha do modelo [1].

Tabela 2.1: Comportamento ACF e PACF.

Modelo	ACF	PACF
MA(1)	1 pico no lag 1	Decrescimento exponencial
AR(1)	Decrescimento exponencial	1 pico no lag 1
MA(2)	1 pico no lag1 e 1 pico no lag2	Misturas exponenciais ou ondas senoides amortecidas
AR(2)	Misturas exponenciais ou ondas senoides amortecidas	pico no lag1 e 1 pico no lag2
ARMA(1,1)	Decrescimento exponencial	Decrescimento exponencial
ARIMA(1,d,1)	Decrescimento exponencial após o lag 1	Decrescimento exponencial após o lag 1

Para validação do modelo, utilizou-se a análise dos resíduos. Para a avaliação da previsão das séries utilizou-se medidas de precisão tais como a Média Percentual de Erro (*Mean Absolute Percentage Error-MAPE*) e o O Erro Quadrático Médio (*Mean Squared Error-MSE*). O MAPE

que é uma medida de precisão para valores de séries temporais, quanto menor a medida, melhor é a previsão [6]. Seja a equação do erro da previsão k passos à frente, no instante t :

$$\epsilon_{t+\frac{k}{t}} = Z_{t+\frac{k}{t}} - \hat{Z}_{t+\frac{k}{t}} \quad (2.6)$$

Em que :

$Z_{t+\frac{k}{t}}$ é o valor observado da série e $\hat{Z}_{t+\frac{k}{t}}$ é o valor previsto da série

A equação do MAPE é expressa por:

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|\epsilon_t|}{|Z_t|} \quad (2.7)$$

Em que:

$|\epsilon_t|$ é o do t -ésimo erro e $|Z_t|$ é o módulo do valor da variável Z no instante t .

O Erro Quadrático Médio é a média dos quadrados dos erros, sendo que quanto menores os erros, menores serão os valores do MSE, logo melhor é previsão. O MSE é dado por:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon_t^2 \quad (2.8)$$

Toda análise estatística neste trabalho foi realizada através do *software* R versão 4.2.1, considerando o nível de 5% de significância.

3. RESULTADOS

3.1 SÉRIE 1: NÚMERO MÁXIMOS DE VOOS POR HORA NA TMA-UL

3.1.1 ANÁLISE DAS SÉRIES

A série 1 é representada pela Figura 3.1 e observou-se através da decomposição da série que a mesma possui tendência e sazonalidade conforme a Figura 3.2. Na Figura 3.3 onde consta a Função de Autorrelação (ACF) e a Função de Autocorrelação Parcial (PACF), vê-se que na ACF os "lags" são significativos e decaem lentamente para zero, sugerindo uma série não estacionária e PACF os "lags" apresentam oscilação.

O teste do sinal de Cox-Stuart se trata de um teste bilateral que tem a hipótese nula H_0 : a série não possui tendência e H_1 : a série possui tendência. O teste foi realizado tendo como resultado um p -valor de 0,0226, neste caso rejeitando a H_0 [8]. A sazonalidade presente na série 1 aparenta ser determinística, logo pressupõe-se que apenas operação de diferença será o suficiente para eliminar a tendência e a sazonalidade, transformando a série em estacionária.

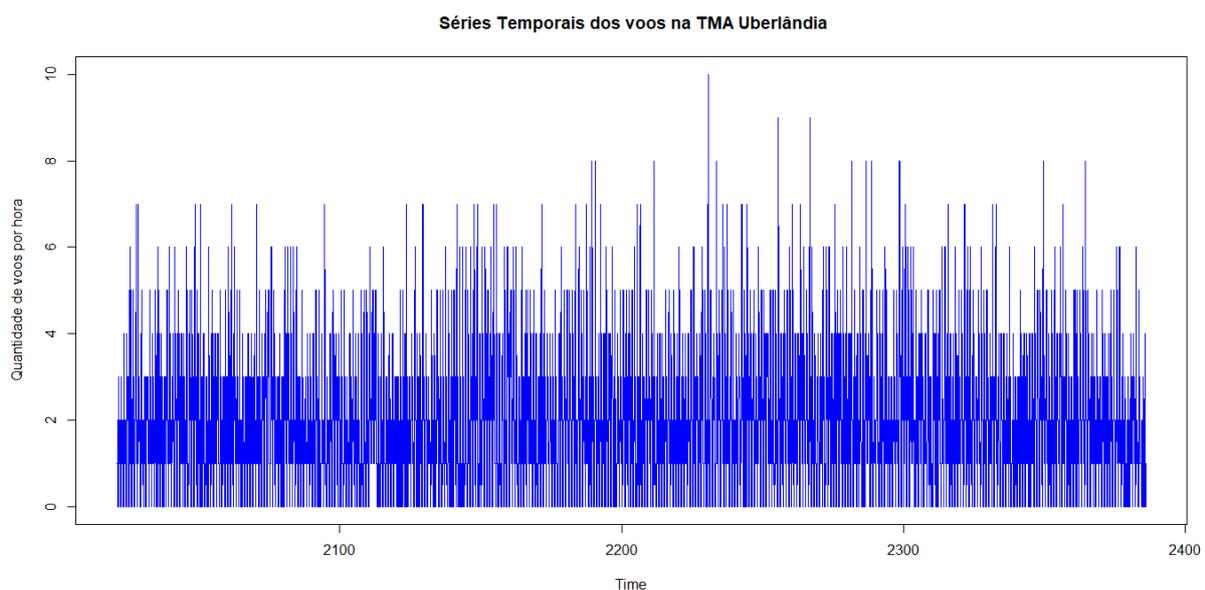


Figura 3.1: Série temporal dos números máximos de voos por hora na Terminal Uberlândia.

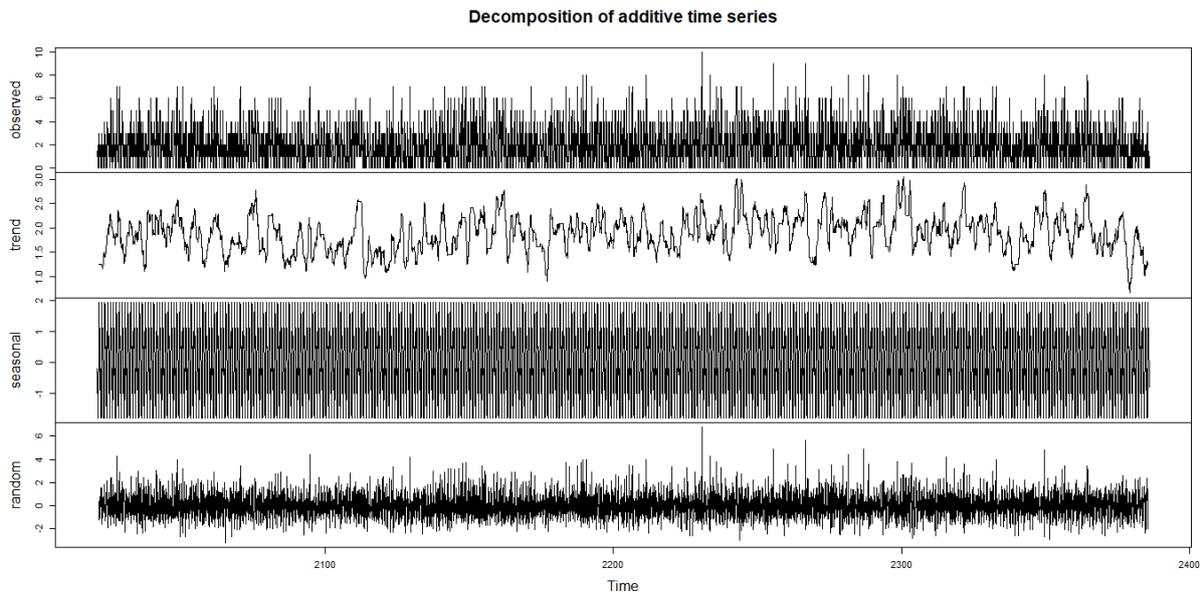


Figura 3.2: Decomposição da série 1.

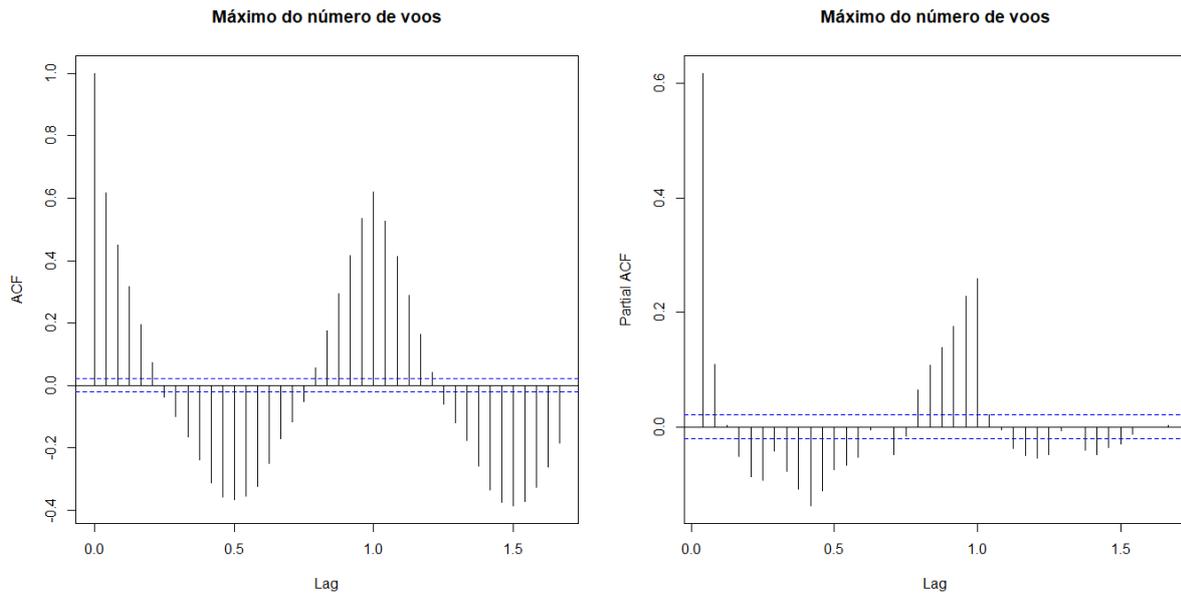


Figura 3.3: Função de Autocorrelação e Função de Autocorrelação Parcial da série 1.

Nas Figuras 3.4 e 3.5 a seguir, contempla-se os resultados após a aplicação da primeira diferença. Nota-se que após a diferença o primeiro e o segundo "lags" da ACF são significativos e na PACF observa-se ainda uma oscilação nos "lags" com decaimento suave característicos do modelo MA(2), pela Figura 3.4 a série não necessita de transformação, considerando-a estacionária.

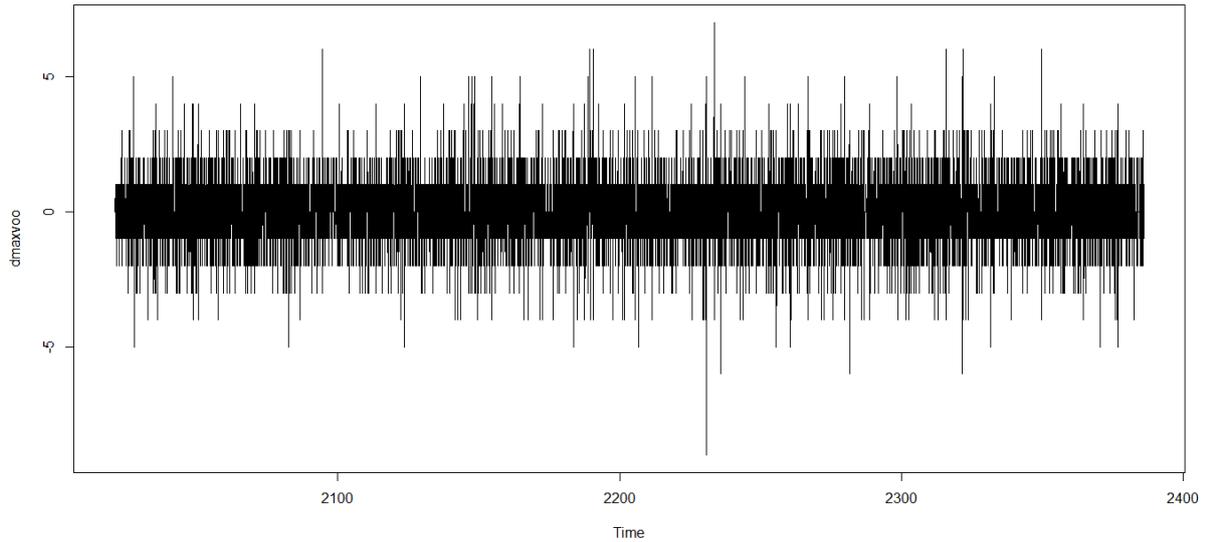


Figura 3.4: Série 1 diferenciada.

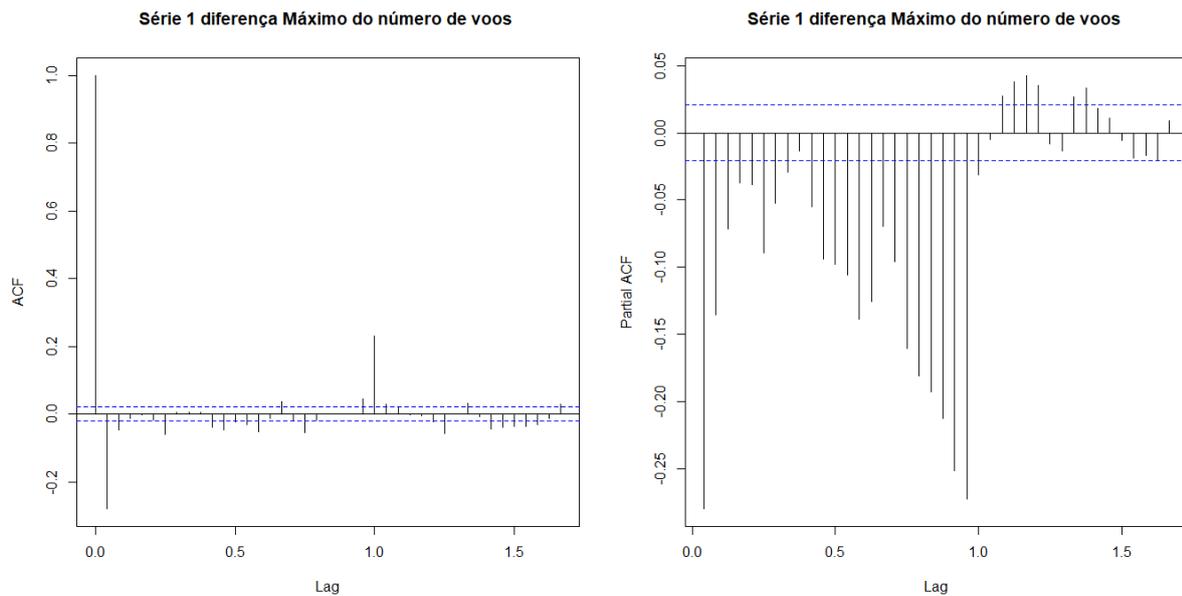


Figura 3.5: ACF e PACF da série 1 diferenciada.

3.1.2 ESTIMAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Baseado no comportamento da ACF e PACF testou-se os modelos MA(1), MA(2), ARMA(1,1) e o como resultado da função `auto.arima` do R, o modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].

O Critério de Informação de Akaike (AIC) que é descrito por $-2\ln(L) + 2k$, e foi usado como critério de seleção do melhor modelo, sendo que o que possui o menor valor de AIC é considerado o melhor. Abaixo está a Tabela 3.1 onde estão dispostos os modelos testados e seus respectivos valores de AIC.

Os parâmetros dos modelos testados tiveram sua significância testada, apresentado na Tabela 3.2. Baseado no valor de AIC e por apresentar significância, o melhor modelo escolhido foi o SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].

Tabela 3.1: Valores de AIC dos modelos testado da série 1.

Modelo	Valores de AIC
MA(2)	28821,09
MA(1)	28770,31
SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24]	26122,54
ARMA(1,1)	27926,77

Tabela 3.2: Valores do p -valor dos parâmetros dos modelos estudados da série 1.

Modelo	Parâmetros	p -valor
MA(2)	$\theta_1 = -0,3387$	$< 0,0001$
	$\theta_2 = -0,0828$	$< 0,0001$
MA(1)	$\theta_1 = -0,3564$	$< 0,0001$
SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24]	$\theta_1 = 0,8998$	$< 0,0001$
	$\phi_1 = -0,6796$	$< 0,0001$
	$\phi_2 = -0,1145$	$< 0,0001$
	$\Theta_1 = -0,6130$	$< 0,0001$
	$\Theta_2 = -0,3128$	$< 0,0001$
ARMA(1,1)	$\theta_1 = 0,6167$	$< 0,0001$
	$\phi_1 = -0,9994$	$< 0,0001$

¹ Parâmetros significativos ao nível de 5% de significância.

Após escolhido o modelo SARIMA (1,0,2),(2,1,0)[24], a validação do modelo se dá através das análises de resíduos ilustrados na Figura 3.6, checando os pressupostos de ser um ruído branco. O teste de Box-Pierce foi usado para o teste de normalidade dos resíduos do modelo, resultando um p -valor de 0,2111, assim sendo, os resíduos são normais.

Na Figura 3.7, o histograma dos resíduos plotados apresenta similaridade com dados que seguem uma Distribuição Normal. Além do mais por meio do gráfico periodograma, vê-se que os resíduos estão dentro da banda de confiança, confirmando a indicação de normalidade.

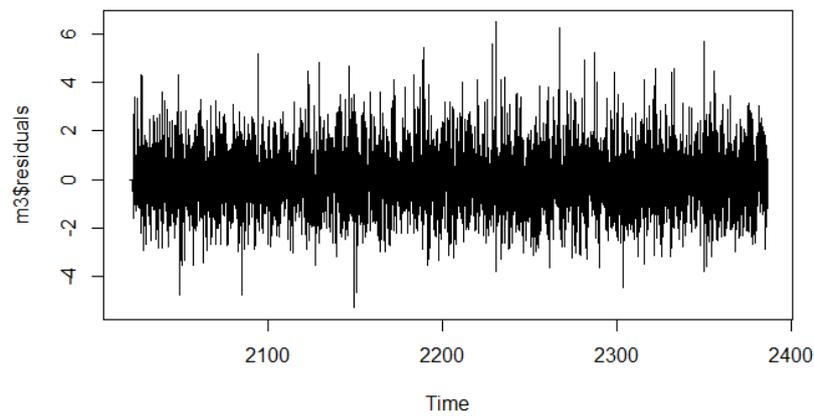


Figura 3.6: Gráfico dos resíduos do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].

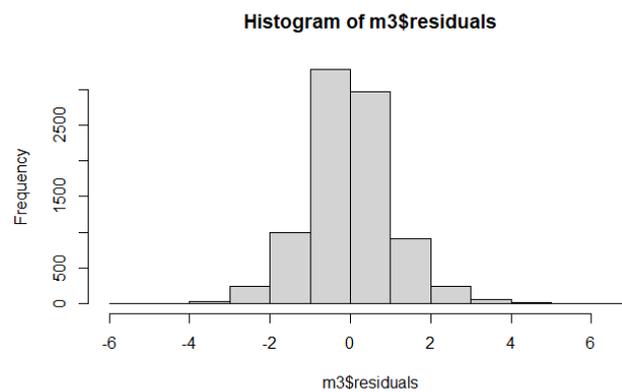


Figura 3.7: Histograma dos resíduos do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].

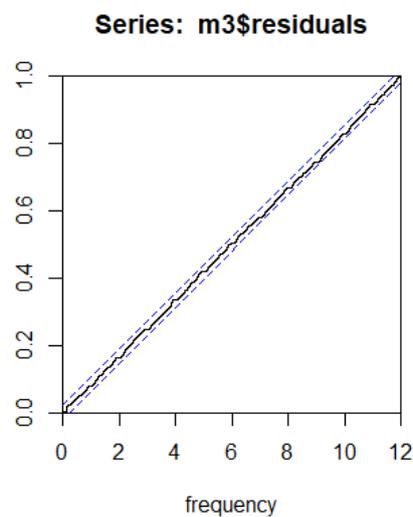


Figura 3.8: Periodograma dos resíduos do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].

3.1.3 PREVISÃO

A previsão realizada através do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24], apresentou as medidas de acurácia MAPE 39% e MSE 1,03 quando comparado com os dados reais, o que indica um bom ajuste do modelo. Observa-se que os valores previstos médio é 3, e através do Intervalo de Confiança (IC) de 95% em algumas horas por dia, o valor máximo pode chega a 6 aeronaves por hora sob responsabilidade do controlador de tráfego aéreo. A previsão completa com o seu IC está exposta na Tabela 3.1.3.

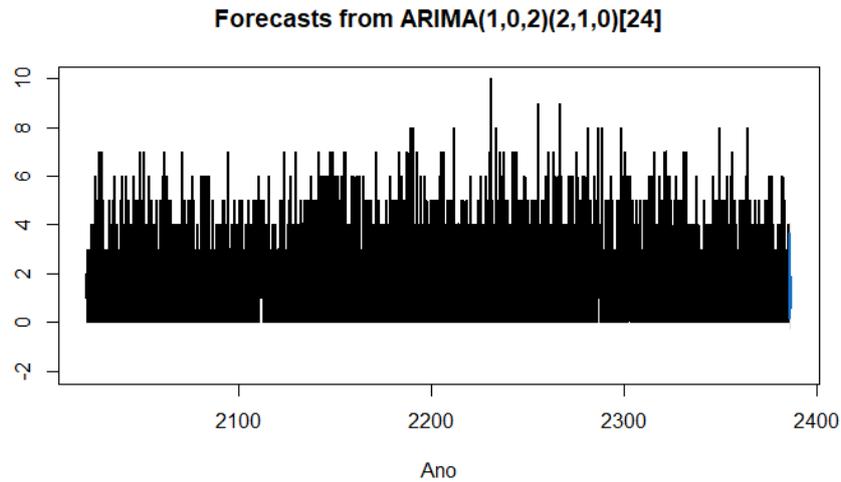


Figura 3.9: Gráfico da previsão de 24 valores do modelo SARIMA(1,0,2),(2,1,0)[24].

Tabela 3.3: Valores previstos da série 1.

Valor previsto	Limite inferior do IC	Limite superior do IC
1,0295	-1,0834	3,1423
1,5317	-0,6317	3,6952
0,7820	-1,3887	2,9527
1,1908	-0,9856	3,3674
0,8977	-1,2835	3,0789
0,1413	-2,0436	2,3263
0,1572	-2,0308	2,3453
0,5586	-1,6319	2,7491
0,8843	-1,3082	3,0769
1,8959	-0,2982	4,0901
0,8321	-1,3633	3,0276
1,2412	-0,9552	3,4378
3,6367	1,4393	5,9741
1,9444	-0,2536	4,1426
1,3256	-0,8730	3,5243
1,2576	-0,9415	3,4567
1,2504	-0,9490	3,4499
1,2808	-0,9189	3,4806
1,1984	-1,0016	3,3984
0,9638	-1,2364	3,1640
0,5804	-1,6199	2,7808
0,6705	-1,5299	2,8710
1,2737	-0,9268	3,4744
0,5892	-1,6114	2,7899

3.2 SÉRIE 2: NÚMERO DE VOOS MENSAIS NA TMA-UL, DO ANO DE 2016 A 2021.

3.2.1 ANÁLISE DAS SÉRIES

Como apresentado na Figura 3.10 e observado através da decomposição da série que a mesma possui tendência positiva e negativa, conseqüente de uma variabilidade inesperada, causada pela pandemia de COVID-19 e sazonalidade conforme a Figura 3.11. Já na Figura 3.12 a Função de Autocorrelação (ACF) e Função de Autocorrelação Parcial (PACF), vemos que na ACF os "lags" são significativos e decaem lentamente para zero e alternam, sugerindo uma série não estacionária e PACF os "lags" apresentam oscilação, sendo o "lag" 1 significativo.

Após a realização do teste para verificação de tendência, verificou-se que a série possui tendência [8] tendo como resultado um p -valor de 0,02882, rejeitando a H_0 : A série não possui tendência. A sazonalidade presente na série 2 assim como a série 1, aparenta ser determinística, logo pressupõe-se que apenas a operação de diferença será o suficiente para eliminar a tendência e a sazonalidade, transformando a série em estacionária.

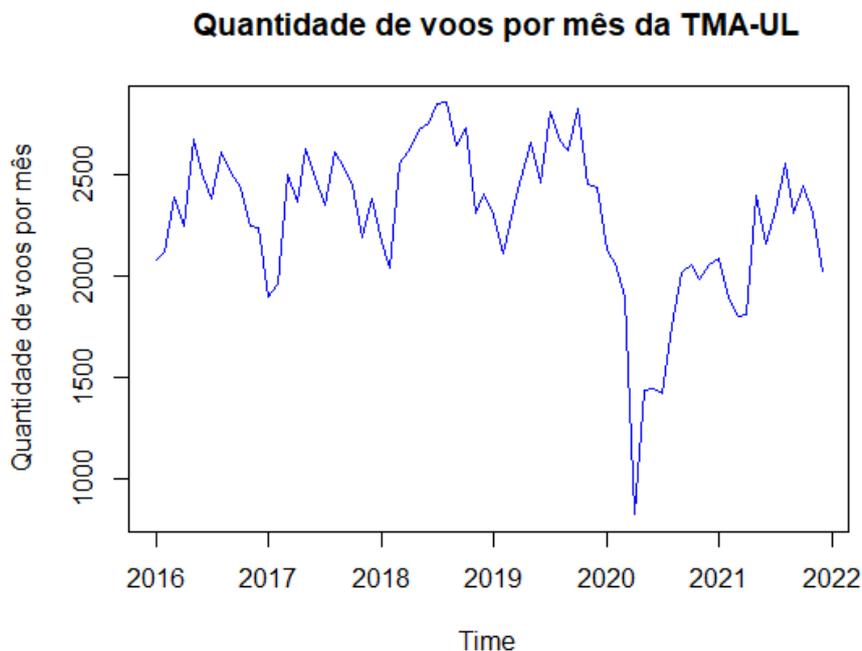


Figura 3.10: Série do número de voos mensais na TMA-UL, do ano de 2016 a 2021.

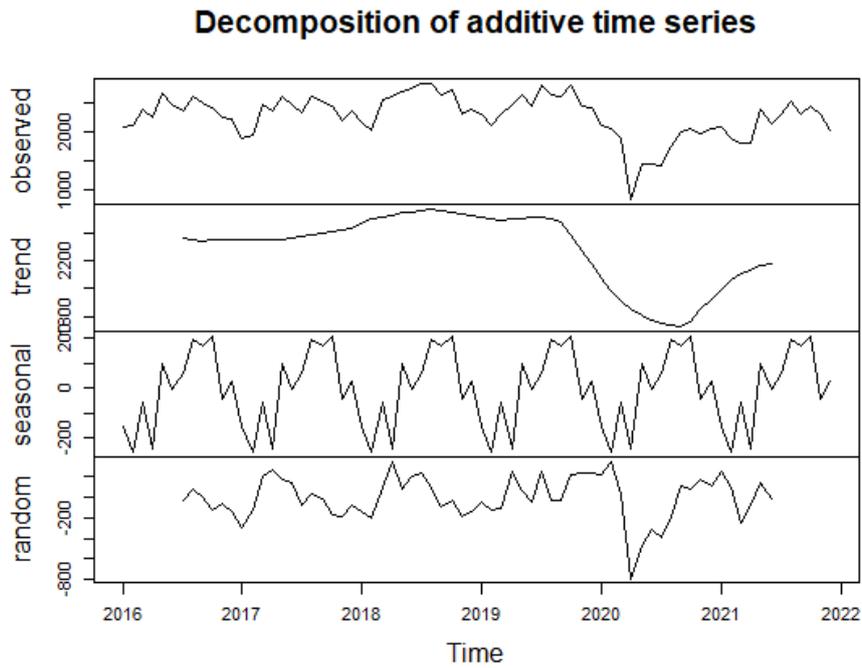


Figura 3.11: Decomposição da série 2.

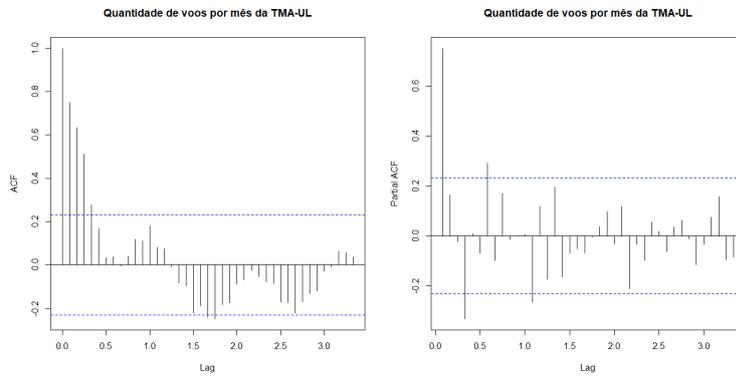


Figura 3.12: Função de Autocorrelação e Função de Autocorrelação Parcial da série 2.

Nas Figuras 3.13 e 3.14, contempla-se os resultados após a aplicação da primeira diferença. Nota-se que após a diferença o primeiro "lags" da ACF são significativos e na PACF vemos os "lags" não significativos, característicos do modelo MA(1), verificou-se que não há necessidade de outra transformação, considerando a série estacionária após a diferenciação.

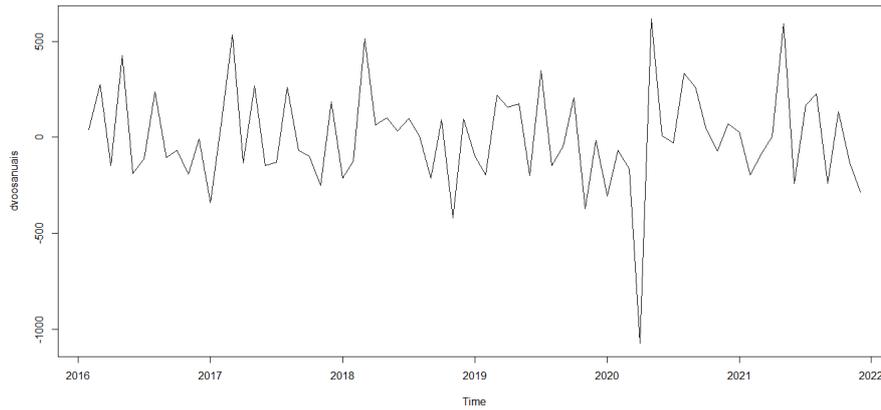


Figura 3.13: Série 2 diferenciada.

Quantidade de voos por mês da TMA-U Quantidade de voos por mês da TMA-U

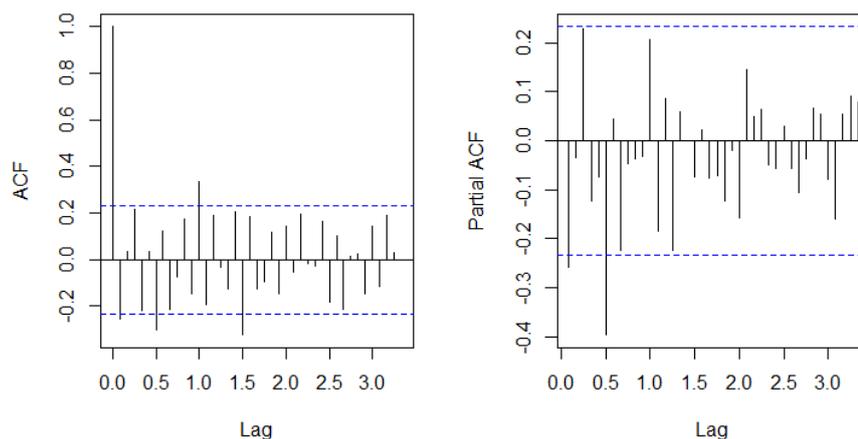


Figura 3.14: ACF e PACF da série 2 diferenciada.

3.2.2 ESTIMAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Baseado no comportamento da ACF e PACF testou-se os modelos MA(1), AR(1) e o como resultado da função `auto.arima` do R, o modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].

Igualmente como na série 1 usou-se como critério de seleção do melhor modelo o Critério de Akaike, sendo que o que possui o menor valor de AIC é considerado o melhor. Abaixo está a Tabela 3.4 onde estão dispostos os modelos testados e seus respectivos valores de AIC. Baseado nisso o melhor escolhido foi o SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].

Testou-se a significância dos parâmetros dos modelos testados, sabendo que um bom modelo possui parâmetros significativos, conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.4: Valores de AIC dos modelos testado da série 2.

Modelo	Valores de AIC
MA(1)	992,8041
AR(1)	992,4400
SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12]	985,0410

Tabela 3.5: Valores do p -valor dos parâmetros dos modelos estudados da série 2.

Modelo	Parâmetros	p -valor
MA(1)	$\phi_1 = -0,2361$	0,0327
AR(1)	$\theta_1 = -0,2585$	0,0315
SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12]	$\phi_1 = -0,2079$	0,0723
	$\Theta_1 = 0,3365$	0,0053

² Parâmetros significativos a nível de 5% de significância.

Após escolhido o modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12], a validação do modelo se dá através das análises de resíduos, checando os pressupostos de ser um ruído branco através do Teste de Box-Pierce, o p -valor de 0,98 indica que os resíduos são normais. O histograma dos resíduos plotados abaixo apresenta similaridade com dados que seguem uma Distribuição Normal. Por meio do gráfico periodograma, vê-se que os resíduos estão dentro da banda de confiança, indicando normalidade.

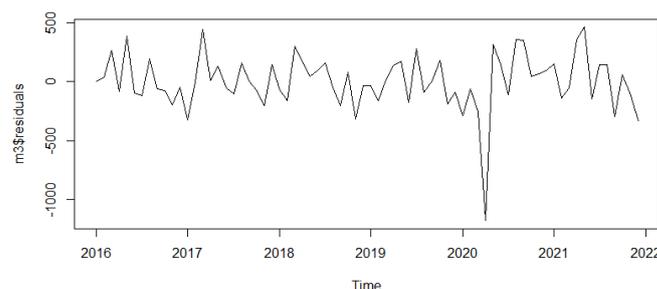


Figura 3.15: Gráficos dos resíduos do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].

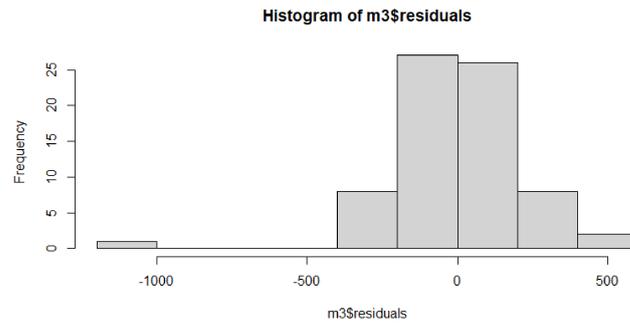


Figura 3.16: Histograma dos resíduos do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].

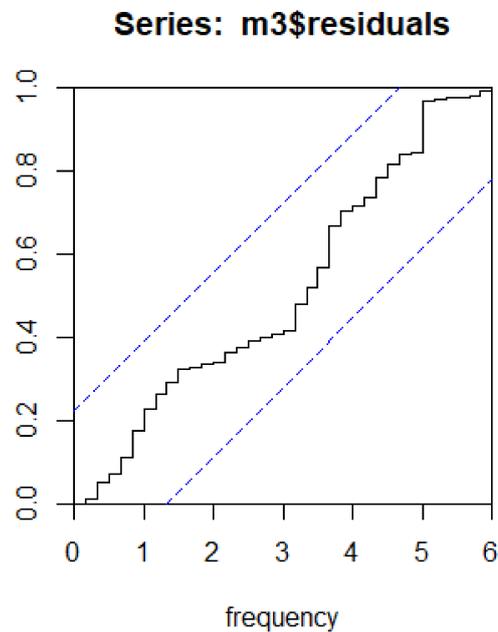


Figura 3.17: Periodograma dos resíduos do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12].

3.2.3 PREVISÃO

A previsão realizada através do modelo SARIMA(0,1,1),(1,0,0)[12], exibida na Figura 3.18, mostra que a tendência para o ano de 2022 é de aumento no número de aeronaves que cruzarão, pousarão e decolarão na Terminal Uberlândia, podendo chegar a 3.480,00 tráfegos mensais. Na Tabela 3.6 é exibido os valores previstos e o Intervalo de Confiança (IC). Nota-se que, devido a pandemia, houve uma notável diminuição na quantidade do tráfego, resultando no aumento da variabilidade dos dados, porém não influenciou no ajuste do modelo.

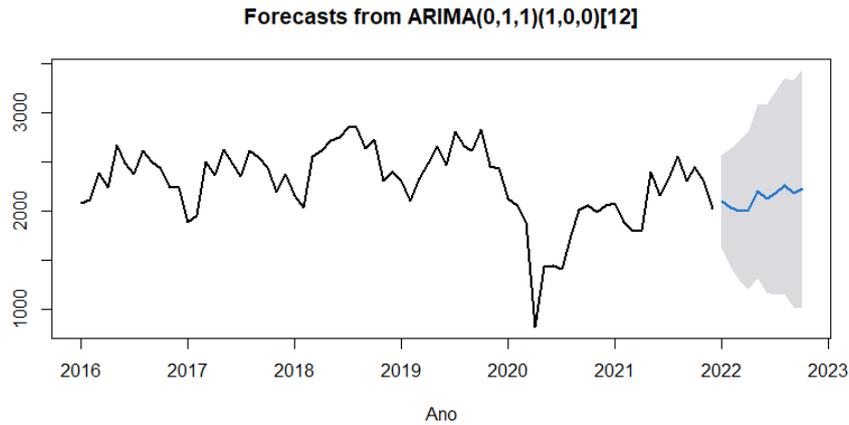


Figura 3.18: Gráfico da previsão de 10 valores do modelo SARIMA $(0,1,1),(1,0,0)[12]$.

Tabela 3.6: Valores previstos da série 2.

Valor previsto	Limite inferior do IC	Limite superior do IC
2099,772	1630,010	2569,534
2033,484	1434,219	2632,49
2005,219	1299,839	2710,599
2006,565	1209,067	2804,063
2206,101	1326,075	3086,127
2125,008	1169,556	3080,460
2181,538	1156,193	3206,882
2257,584	1166,816	3348,351
2176,490	1024,008	3328,973
2221,243	1010,186	3432,300

3.3 DISCUSSÕES

A Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 63-18 trata de critérios de implantação de sistema de vigilância ATS, ou seja, vigilância radar. A legislação dispõe dos seguintes critérios ordenados abaixo [5]:

- TMA/CTR cuja soma do total anual de pousos e decolagens em seus aeródromos seja igual ou superior a 45.000,00, dos quais, pelos menos, 10.000,00 de linha aérea regular;
- TMA/CTR cuja soma do total anual de pousos e decolagens em seus aeródromos seja igual ou superior 60.000,00, dos quais, pelos menos, 5.000,00 de linha aérea regular; ou
- TMA/CTR de interesse estratégico definido pelo Departamento de Controle de Espaço Aéreo(DECEA).

A quantidade de tráfego que evoluiu na TMA-UL no ano de 2021 foi de 26.079,00 [9] que apesar de estar abaixo do que a legislação indica como mínimo para pleitear a instalação do radar, sugere-se, baseado no terceiro item dos critérios acima, considerar o início do processo de instalação do sistema de vigilância.

Sugere-se ainda, incluir na Área de Controle Terminal de Uberlândia, a Área de Controle Terminal de Uberaba (TMA-UR) e o aeródromos de médio e pequeno movimento que tangência a TMA-UL, sendo os principais: SBCN - Aeródromo de Caldas Novas, SWKT- Aeródromo de Catalão, SBIT - Aeródromo de Itumbiara. Os aeródromos citados não possuem serviço de controle prestado na localidade, apenas serviço de informação de voo, logo ao fazerem parte de uma área controlada, o serviço prestado seria melhorado e por consequência com maior segurança. É importante pontuar que, ao englobar a área, hoje sob responsabilidade do Controle de Aproximação (APP-UR), e os demais aeródromos citados acima, implicaria no aumento do tráfego dentro da TMA-UL, aumentando os recursos captados advindos dos serviços prestados, sem necessidade de gastos extras com infraestrutura, maquinários ou pessoal, além do previsto na instalação de vigilância radar.

Outro ponto a ser considerado para indicação de instalação radar é de que esse melhoramento nas facilidades do APP-UL, aumentaria a Capacidade de setor ATC(N), ou seja, o número de aeronaves sob responsabilidade simultânea de Setor de Controle ATC e o Npico que é definido por, capacidade de controle simultâneo que um determinado setor ATC tem condições de manter, por no máximo 19 (dezenove) minutos (contínuos ou não) no intervalo de uma hora, durante esse intervalo o ATCO estará sob uma sobrecarga controlada.

Neste caso o órgão já estará preparado para receber o aumento previsto de tráfego aéreo para os próximos anos, levando em consideração a grande expansão do transporte aéreo [3].

Vale lembrar que, conforme disposto na Figura 3.11, observa-se que a tendência da série nos anos anteriores ao de 2019 era de crescimento, o que mudou devido a pandemia de COVID-19, que afetou diretamente o número de voos mundialmente. Ainda avaliando os resultados vê-se que a retomada nos voos, gera uma tendência positiva na série temporal de voos mensais na TMA-UL, logo o estudo para a implantação de radar seria viável.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos na análises dos voos dentro da Terminal Uberlândia, conclui-se que a série 1 , relativa a número máximo de voos por hora , e a série 2, relativa a número de voos mensais do ano de 2016 a 2021 possuem tendência positiva, ou seja tendência de aumento de tráfego, e componente sazonal. O modelo SARIMA foi o melhor entre os analisados, assim escolhido para explicar as observações e predizer de forma satisfatória. Obteve-se valores baixos para MAPE e MSE. Devido a previsão de aumento dos números de voo, recomenda-se dar continuidade ao monitoramento da quantidade de tráfego, pensando na qualidade do serviço prestado e na segurança daqueles que utilizam a Área de Controle Terminal de Uberlândia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BIASE, N. G.: *Notas de aula de Séries temporais*. Notas de aula disponibilizada pela Prof. Dra. Nádia Giaretta Biase, 2022.
- [2] BOX, George. E. P. and JENKINS, G. M. e REINSEL, G. C.: *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Prentice - Hall, Inc, 3ª ed., 1994.
- [3] DECEA: *Manual do Comando da Aeronáutica (MCA) 100-17, Capacidade ATC*. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, 3ª ed., 2014.
- [4] DECEA: *Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-37, Serviços de Tráfego Aéreo*. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, 3ª ed., 2020.
- [5] DECEA: *Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 63-18, Critérios de Implantação de Órgãos Operacionais, Auxílios à Navegação Aérea e Sistemas de Apoio aos Órgãos ATS*. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, 3ª ed., 2020.
- [6] Miranda, I. P. H. de: *Comparação de diferentes Métodos de Previsão Temporais com valores discrepantes*. Monografia, 2014.
- [7] MONTGOMERY, D. C., JENNINGS, C. L. e KULAHCI, M.: *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. John Wiley and Sons, Inc, 1ª ed., 2008.
- [8] MORETTIN, P. A. e TOLOI, C. M. C.: *Análise de Séries Temporais*. Edgard Blucher LTDA, 1ª ed., 2004.
- [9] NAV Brasil, S. d. N. A.: *SETA DTA*, 2021. <https://>, acessado em 12/12/2021.