

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Ciências Biológicas - ICB

Programa de Pós-Graduação em Neurociências

Deborah Christiny Abrante Godinho

**MEDIDAS OBJETIVAS DE FADIGA E SONOLÊNCIA BASEADAS NA ANÁLISE
ACÚSTICA DA ORGANIZAÇÃO TEMPORAL DA FALA**

Belo Horizonte

2023

Deborah Christiny Abrante Godinho

**MEDIDAS OBJETIVAS DE FADIGA E SONOLÊNCIA BASEADAS NA ANÁLISE
ACÚSTICA DA ORGANIZAÇÃO TEMPORAL DA FALA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Neurociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Neurociências.

Orientador: Prof. Hani Camille Yehia

Coorientadora: Dra. Carla Aparecida de Vasconcelos

Belo Horizonte

2023

043

Godinho, Deborah Christiny Abrante.

Medidas objetivas de fadiga e sonolência baseadas na análise acústica da organização temporal da fala [manuscrito] / Deborah Christiny Abrante Godinho. – 2023.

99 f. : il. ; 29,5 cm.

Orientador: Prof. Hani Camille Yehia. Coorientadora: Dra. Carla Aparecida de Vasconcelos.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Neurociências.

1. Neurociências. 2. Fadiga mental. 3. Sonolência. 4. Acústica da Fala. 5. Medida da produção da fala. I. Yehia, Hani Camille. II. Vasconcelos, Carla Aparecida de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. IV. Título.

CDU: 612.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM NEUROCIÊNCIAS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DA ALUNA

DÉBORAH CHRISTINY ABRANTE GODINHO

Realizou-se, no dia 12 de dezembro de 2023, às 08:30 horas, Bloco J2 Sala 222 - ICB, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 228ª defesa de dissertação, intitulada *Medidas objetivas de fadiga e sonolência baseadas na análise acústica da organização temporal da fala*, apresentada por DÉBORAH CHRISTINY ABRANTE GODINHO, número de registro 2021661126, graduada no curso de FONOAUDIOLOGIA, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em NEUROCIÊNCIAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof. Hani Camille Yehia - Orientador (UFMG), Dra. Carla Aparecida de Vasconcelos - Coorientadora (UFMG), Profa. Carmen Elvira Flores-Mendoza Prado (UFMG), Profa. Maria Mendes Cantoni (UFMG), Prof. Maurilio Nunes Vieira (UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 12 de dezembro de 2023.

Carlos Magno Machado Dias - Secretário(a)

Assinatura dos membros da banca examinadora:

Prof. Hani Camille Yehia (Doutor)

Dra. Carla Aparecida de Vasconcelos (Doutora)

Profa. Carmen Elvira Flores-Mendoza Prado (Doutora)

Profa. Maria Mendes Cantoni (Doutora)

Prof. Maurilio Nunes Vieira (Doutor),



Documento assinado eletronicamente por **Hani Camille Yehia, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carmen Elvira Flores Mendoza Prado, Professora do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 19:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maurilio Nunes Vieira, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 20:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carla Aparecida de Vasconcelos, Usuário Externo**, em 21/12/2023, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Mendes Cantoni, Professora do Magistério Superior**, em 22/12/2023, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2916787** e o código CRC **617996DE**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM NEUROCIÊNCIAS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Medidas objetivas de fadiga e sonolência baseadas na análise acústica da organização temporal da fala

DÉBORAH CHRISTINY ABRANTE GODINHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em NEUROCIÊNCIAS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em NEUROCIÊNCIAS, área de concentração NEUROCIÊNCIAS CLÍNICAS.

Aprovada em 12 de dezembro de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Maria Mendes Cantoni

UFMG

Profa. Carmen Elvira Flores-Mendoza Prado

UFMG

Prof. Maurilio Nunes Vieira

UFMG

Dra. Carla Aparecida de Vasconcelos - Coorientadora

UFMG

Prof. Hani Camille Yehia - Orientador

UFMG

Belo Horizonte, 12 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Hani Camille Yehia, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carmen Elvira Flores Mendoza Prado, Professora do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 19:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maurilio Nunes Vieira, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 20:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carla Aparecida de Vasconcelos, Usuário Externo**, em 21/12/2023, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Mendes Cantoni, Professora do Magistério Superior**, em 22/12/2023, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2916802** e o código CRC **C089951C**.

Dedico este trabalho Àquele que sempre
me faz alcançar muito mais do que peço e
muito além do que mereço: Deus!

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Prof. Hani Camille Yehia e Dra. Carla Aparecida de Vasconcelos pela atenção, paciência, disponibilidade e suporte para pesquisa e conclusão deste trabalho. À Dra. Carla, em especial, pela disponibilização do banco de dados.

Ao Prof. Túlio Rodrigues e ao Eduardo Furlan também pelo suporte, atenção e parceria, tornando possível a utilização do *software* SAFTE-FAST nesta pesquisa.

Ao meu esposo, Mauro, pelo apoio incondicional, compreensão e ombro amigo sempre que precisei.

Ao meu pai, Gilvan, minha mãe, Maria dos Anjos, e minhas irmãs, Jackeline e Ana Clara, pela torcida e por compreenderem meus momentos de ausência durante este percurso.

Aos colegas do laboratório CEFALA, Marcos Rosa, Michelle Diniz e Priscilla Chantal por tantas trocas, ajuda e incentivo. Aprendi muito com cada um e levarei sempre, com muito carinho, a parceria que construímos.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade para leitura e correção deste trabalho.

Minha gratidão, respeito e admiração.

“Tudo que o homem é

Ele é porque fala

E na sua fala se revela

O homem que ele é.

Pelo tom, pela força,

pelo timbre da voz conhecemos

seu prazer ou desprazer

confiança ou desconfiança

sua alegria ou dor

seu à vontade ou acanhamento

sua autoafirmação ou timidez

segurança ou insegurança

sua pressa ou seu vagar

seu estado de tensão ou relaxamento.

Pelo modo de falar sabemos os hábitos de linguagem de sua família, amigos, bairro, cidade, país... Podemos classificá-lo social, regional, cultural e até profissionalmente.

Quando você fala é sua personalidade que se expressa.

Torne sua VOZ uma MENSAGEM de otimismo, confiança, amor...

Que suas palavras, ao FALAR, tenham a dignidade que exige o destino do homem no universo.”

(Edmée Brandi, “Educação da voz falada”, p.17, 2002)

RESUMO

INTRODUÇÃO: A fadiga e a sonolência são estados que afetam negativamente a capacidade cognitiva e física, com implicações diretas na segurança da aviação. A fadiga é frequentemente subestimada como fator contribuinte em ocorrências aeronáuticas, apesar de sua influência significativa na tomada de decisão. Métodos objetivos para medir a fadiga são necessários para melhor associá-la a eventos críticos. A análise acústica de voz e fala tem se mostrado uma alternativa confiável e robusta para detecção de uma série de alterações e expressões dos indivíduos, incluindo a fadiga e a sonolência, mostrando que as variações da fala humana podem ser indicativos robustos também para esses estados temporários. Este estudo teve como objetivo aplicar um método objetivo de análise acústica baseada na organização temporal da fala, (proposto em Vasconcelos (2019), "*Fadiga e sonolência em aviadores: análise de variações da voz, fala e linguagem*", tese de doutorado, UFMG), em um maior número de participantes, a fim de confirmar e expandir os resultados obtidos, além de verificar a correlação deste método objetivo com métodos subjetivos de detecção de fadiga e sonolência.

MÉTODOS: análise transversal retrospectiva de um banco de dados contendo amostras de fala espontânea, dados de histórico do sono das últimas 72h e de escalas psicométricas de fadiga (Samn-Perelli) e sonolência (Karolinska) de 25 pilotos de aeronaves, falantes nativos do Português Brasileiro e neurologicamente saudáveis. Os dados foram registrados em um dia de folga em que os pilotos se sentiam descansados e em um dia de trabalho após 16h acordados. Após a extração de medidas de organização temporal da fala, a análise dos dados se deu por meio do teste *t* de *student* pareado e as correlações por meio do teste de correlação de *Spearman*, adotando-se o nível de significância de 5%.

RESULTADOS: As medidas de organização temporal da fala mostraram variações estatisticamente significativas na comparação entre dia de folga e trabalho, evidenciando uma piora dos parâmetros analisados quando os indivíduos relataram fadiga e sonolência. A redução da taxa de elocução e a variação da frequência dos tipos de pausas foram particularmente relevantes dentre as medidas de fala. Verificou-se presença de correlação significativa entre medidas da análise da fala e as escalas psicométricas de Karolinska e Samn-Perelli. Além disso, a regressão linear múltipla mostrou que a porcentagem de pausas é preditiva do nível de fadiga e sonolência

reportados nessas escalas. Verificou-se existir uma correlação elevada ($r = 0,98$) entre a taxa de elocução e a escala de Samn-Perelli, representada pelas médias de quatro faixas. Tal resultado permite inferir o nível de fadiga usando-se uma medida objetiva (taxa de elocução) em lugar de uma medida subjetiva (escala de Samn-Perelli).

CONCLUSÕES: A alta variabilidade dos parâmetros de organização temporal da fala em resposta à presença de fadiga e sonolência sugere que estes são bons indicadores que refletem o nível de planejamento cognitivo do discurso e o estado de alerta do indivíduo. Além disso, os métodos de extração dos parâmetros de fala replicados nesse estudo mostraram-se apropriados para a detecção objetiva da fadiga e da sonolência.

Palavras-chave: Fadiga mental. Sonolência. Fala. Acústica da fala. Medida da produção da fala.

ABSTRACT

INTRODUCTION: Fatigue and sleepiness are states that negatively affect cognitive and physical capabilities, with direct implications for aviation safety. Fatigue is often underestimated as a contributing factor in aeronautical occurrences, despite its significant influence on decision-making. Objective methods for measuring fatigue are necessary to better associate it with critical events. Acoustic analysis of voice and speech has proven to be a reliable and robust alternative for detecting a range of individual alterations and expressions, including fatigue and sleepiness, demonstrating that variations in human speech can also be robust indicators of these temporary states. This study aimed to apply an objective method of acoustic analysis based on the temporal organization of speech, (proposed in Vasconcelos (2019), "*Fatigue and sleepiness in aviators: analysis of voice, speech and language variations*", doctoral thesis, UFMG, in Portuguese), to a larger sample size in order to confirm and expand upon the obtained results. Additionally, it sought to investigate the correlation of this objective method with subjective methods of fatigue and drowsiness detection.

METHODS: A retrospective cross-sectional analysis of a database containing spontaneous speech samples, sleep history data from the last 72 hours, and psychometric scales of fatigue (Samn-Perelli) and sleepiness (Karolinska) from 25 aircraft pilots, native Brazilian Portuguese speakers, and neurologically healthy. Data were recorded on a day off when pilots felt rested and on a workday after being awake for 16 hours. After extracting measures of speech temporal organization, data analysis was performed using paired Student's t-test and correlations through Spearman's correlation test, adopting a 5% significance level.

RESULTS: Measures of speech temporal organization showed statistically significant variations when comparing rest and workdays, evidencing a worsening of the analyzed parameters when individuals reported fatigue and sleepiness. The speech rate reduction and the frequency variation of pause types were particularly relevant among the speech measures. A significant correlation was found between speech analysis measures and the Karolinska and Samn-Perelli psychometric scales. Furthermore, multiple linear regression showed that the percentage of pauses is predictive of the level of fatigue and sleepiness reported in these scales. It was found that there exists

a high correlation ($r = 0.98$) between the speech rate and the Samn-Perelli scale, represented by the means of four bands. This result allows the level of fatigue to be inferred using an objective measure (speech rate) instead of a subjective measure (Samn-Perelli scale).

CONCLUSIONS: The high variability of the temporal organization parameters of speech in response to the presence of fatigue and sleepiness suggests that these are good indicators that reflect the level of cognitive planning of discourse and the individual's state of alertness. In addition, the methods for extracting speech parameters replicated in this study proved to be appropriate for the objective detection of fatigue and sleepiness.

Keywords: Mental fatigue. Sleepiness. Speech. Speech Acoustics. Speech production measurement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama representando o modelo SAFTE-FAST	34
Figura 2 - Efetividade de uma pessoa que dorme 8h/noite e trabalha 9h/dia	35
Figura 3 - Efetividade após duas noites de trabalho x recuperação	36
Figura 4 - Esquema de organização da mensagem falada	44
Figura 5 - Resumo de resultados anteriores sobre potenciais sinais de carga cognitiva na fala	52
Figura 6 - Interface do software de análise acústica da fala (PRAAT)	59
Gráfico 1 - Taxa de Elocução em dia de folga e trabalho	63
Gráfico 2 - Taxa de Articulação em dia de folga e trabalho	64
Gráfico 3 - Taxa Total de Pausas na fala em dia de folga e trabalho	64
Gráfico 4 - Taxa de Pausas Demarcativas na fala em dia de folga e trabalho	65
Gráfico 5 - Taxa de Pausas Hesitativas (preenchidas e silenciosas)	65
Gráfico 6 - Taxa de Hesitação e Disfluências na fala em dia de folga e de trabalho	66
Gráfico 7 - Porcentagem de Disfluência da Fala em dia de folga e trabalho	66
Gráfico 8 - Porcentagem de Pausas na fala em dia de folga e trabalho	67
Gráfico 9 - Tipologia das pausas na fala	67
Gráfico 10 - Escalas psicométricas de Fadiga e Sonolência (Folga x Trabalho)	68
Gráfico 11 – Parâmetros calculados pelo SAFTE-FAST - Efetividade e Reservatório de Sono	69
Gráfico 12 - Regressão linear mostrando a escala de fadiga de Samn-Perelli em função da taxa elocução.	72
Gráfico 13 - Regressão linear (linha azul) e intervalo de confiança de 95% (limite superior em vermelho e limite inferior em verde).	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas descritivas da análise acústica da fala, escalas psicométricas e parâmetros do SAFTE-FAST	62
Tabela 2 - Correlação de <i>Spearman</i> – Fala x Escalas Psicométricas – Dia de Trabalho (n=25).....	70
Tabela 3 – Correlação de <i>Spearman</i> - SAFTE-FAST x Escalas Psicométricas - Dia de Trabalho (n=24).....	70
Tabela 4 - Modelo de regressão linear múltipla para Karolinska – Dia de Trabalho (n=25).....	71
Tabela 5 - Modelo de regressão linear múltipla para Samn-Perelli – Dia de Trabalho (n=25).....	71
Tabela 6 - Correlação SAFTE-FAST x Escalas psicométricas – Dia de Folga (n=24)	96
Tabela 7 – Correlação SAFTE-FAST x Fala – Dia de Trabalho (n=24).....	96
Tabela 8 - Correlação SAFTE-FAST x Fala - Dia de Folga (n=24)	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAPAC	Associação Brasileira de Pilotos da Aviação Civil
ASAGOL	Associação de Aeronautas da Gol
ATL	Associação dos Tripulantes da LATAM Brasil
CASA	<i>Civil Aviation Safety Authority</i>
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CNFH	Comissão Nacional de Fadiga Humana
CNPAA	Comitê Nacional de Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CNT	Comissão Nacional de Treinamento
dB	Decibel
DP	Doença de Parkinson
EEG	Eletroencefalograma
EOG	Eletrooculograma
ERP	<i>Event Related Potential</i>
F0	Frequência Fundamental
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
Hz	hertz
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
KSS	<i>Karolinska Sleepiness Scale</i>
MFCC	<i>Mel-Frequency Cepstral Coefficients</i>
NREM	<i>Non-rapid eye movement</i>
PVT	<i>Psychomotor Vigilance Task</i>
REM	<i>Rapid Eyes Movement</i>

SAFTE-FAST Sleep, Activity, Fatigue and Task Effectiveness – Fatigue Avoidance Scheduling Tool

SIPAER Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

SNA Sindicato Nacional dos Aeronautas

SNC Sistema Nervoso Central

SPS *Samn-Perelli Fatigue Scale*

TA Taxa de Articulação

TE Taxa de Elocução

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	FADIGA E SONOLÊNCIA	24
2.1.1	Fadiga Humana	24
2.1.2	Ciclo Sono-Vigília	27
2.1.3	Fadiga e Sonolência em pilotos de aeronaves	30
2.1.4	Métodos de avaliação da Fadiga e sonolência	32
2.2	VOZ, LINGUAGEM E FALA	37
2.2.1	Voz	37
2.2.2	Linguagem Humana	40
2.2.3	Fala	42
2.2.3.1	<i>Prosódia e organização temporal da fala</i>	45
2.3	IMPLICAÇÕES DA FADIGA E SONOLÊNCIA NA FALA E NA LINGUAGEM	51
3	MÉTODOS	54
3.1	Análise acústica da fala	56
3.2	Análise estatística	60
4	RESULTADOS	62
4.1	Medidas de organização temporal da fala	63
4.2	Escalas psicométricas e SAFTE-FAST	68
4.3	Testes de Correlação e Regressão	69
4.4	Regressão linear relacionando Taxa de Elocução e escala de Samn-Perelli	71
5	DISCUSSÃO	74

5.1	Medidas de organização temporal da fala.....	74
5.2	Escalas psicométricas e SAFTE-FAST	81
5.3	Testes de Correlação e Regressão.....	83
6	CONCLUSÕES.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87
	GLOSSÁRIO.....	95
	APÊNDICE A – RESULTADOS COMPLEMENTARES	96
	ANEXO A – INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA	98

1 INTRODUÇÃO

Fadiga e sonolência são fenômenos complexos que afetam a capacidade cognitiva e física dos indivíduos, tendo implicações significativas em diversos setores, incluindo a aviação. Pesquisas com essa população indicam que a sonolência, letargia, lentidão cognitiva, dificuldades de concentração, atenção e vigilância reduzidas, capacidade reduzida na tomada de decisão e déficits nas habilidades de comunicação são alguns dos indícios comuns de fadiga (CALDWELL et al., 2019; KHAROUFAH et al., 2018).

Segundo Mello et al. (2008), a fadiga, seguida de carga de trabalho, medo, sobrecarga cognitiva, deficiência na comunicação interpessoal e dificuldade no processamento da informação e na tomada de decisão são fatores que influenciam a ocorrência de erros humanos, seja por restrições fisiológicas ou psicológicas. Os autores conduziram um estudo em uma grande companhia aérea brasileira e observaram que durante a madrugada, entre 0h e 6h, pilotos tinham quase 50% mais chances de cometer erros caracterizados por ultrapassar limites ou não seguir procedimentos operacionais, em comparação com outros horários do dia. Esse resultado evidencia que o trabalho durante a madrugada vai contra o ritmo e fisiologia humana, que naturalmente é programado para descansar em vez de trabalhar durante esse período (MELLO et al., 2008). Contudo, a crescente demanda global de transporte de pessoas e cargas fez com que o transporte aéreo se tornasse uma atividade ininterrupta e com turnos de trabalho variados para atender essa demanda (LICATI et al., 2010).

Licati et al. (2015) associaram relatos de fadiga com parâmetros quantitativos extraídos do modelo biomatemático SAFTE-FAST e observaram que cerca de 50% (n=301) da amostra de pilotos estudada apresentava condições inadequadas de atenção, evidenciando uma presença de fadiga acumulada em pilotos da aviação civil brasileira.

Em outro estudo, que investigou a prevalência de fadiga em pilotos comerciais de curta distância por meio de uma escala psicométrica, 75% dos pilotos relataram sentir fadiga severa, 81% relataram fadiga crônica e 80% consideraram que sua capacidade de raciocínio era reduzida durante o voo (JACKSON; EARL, 2006).

Em diversos países, incluindo Estados Unidos, Austrália, Canadá, França e Brasil, as estatísticas sobre acidentes na aviação geral revelam padrões consistentes quanto aos fatores contribuintes. Apesar dos esforços contínuos e interdisciplinares para debater e mitigar riscos na aviação, os fatores humanos permanecem como principais fatores, representando aproximadamente 80% das ocorrências aeronáuticas. E, independentemente da nomenclatura adotada em cada país, notavelmente, o termo “julgamento” destaca-se consistentemente como o principal contribuinte em ocorrências investigadas (COMITÊ NACIONAL DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CNPAA; COMISSÃO NACIONAL DE TREINAMENTO - CNT, 2016).

No Brasil, de acordo com estatísticas divulgadas pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), por meio do portal SIPAER, o termo “Julgamento de Pilotagem” aparece em primeiro lugar entre os fatores contribuintes de acidentes e incidentes ocorridos nos últimos 10 anos no Brasil (CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CENIPA, 2023). Para a *Federal Aviation Administration* (FAA) o julgamento do piloto é um processo que envolve a análise e reconhecimento de todas as informações disponíveis sobre ele mesmo, a aeronave e o ambiente de voo, sendo necessária uma avaliação racional das alternativas para tomar uma decisão que favoreça a segurança (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA, 1982). Para o sistema de investigação de acidentes brasileiro, o mesmo é entendido como uma avaliação incorreta do piloto sobre aspectos operacionais da aeronave, mesmo estando qualificado para operá-la. Se esse fator for identificado, indica que a decisão tomada diante das circunstâncias foi equivocada (COMITÊ NACIONAL DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CNPAA; COMISSÃO NACIONAL DE TREINAMENTO - CNT, 2016).

Neste mesmo panorama estatístico, o percentual de fadiga como fator contribuinte para ocorrências aeronáuticas pode ser considerado insignificante, conforme também observado por Cassiano (2018). No entanto, esses números isoladamente não capturam a complexidade da fadiga e seus impactos na segurança das operações aéreas (CASSIANO, 2018).

A fadiga é um fator crítico que influencia a tomada de decisão dos tripulantes de voo (KHAROUFAH et al., 2018). Assim, embora a fadiga não apareça como um

dos principais fatores contribuintes nos painéis estatísticos, sabe-se que ela influencia de maneira significativa a habilidade de tomada de decisão e pode contribuir, ainda que indiretamente, para o julgamento inadequado do piloto em uma situação de emergência.

Conforme observado por Vasconcelos (2019), o declínio na capacidade de tomar decisões, bem como o aumento do tempo de reação, são efeitos atribuídos a mudanças cognitivo-fisiológicas, incluindo diminuição da atenção, concentração e memória, além de fatores fisiológicos como diminuição da temperatura corporal e da tensão muscular. Tais alterações levam a uma capacidade neurocomportamental que pode ser comparada à experimentada durante a embriaguez.

Para a Comissão Nacional de Fadiga Humana (CNFH) brasileira, o fato de a fadiga não figurar como um fator contribuinte recorrente nos relatórios emitidos pelo CENIPA reflete a complexidade de investigar esse fenômeno em ocorrências aeronáuticas e reforça a necessidade de uma abordagem multidisciplinar. A ausência de métodos adequados para medir a fadiga possivelmente limita sua associação a eventos críticos. Desta forma, acredita-se que muitos eventos podem ter a fadiga como fator contribuinte, porém devido à carência de abordagens objetivas, de fácil aplicação e baseadas em evidências científicas, essa identificação pode estar sendo subestimada (COMISSÃO NACIONAL DE FADIGA HUMANA- CNFH; COMITÊ NACIONAL DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CNPAA, 2017).

Em estudo pioneiro no Brasil, Vasconcelos (2019) adaptou e propôs um método objetivo de análise acústica da fala para detecção de fadiga e sonolência em aviadores. A autora analisou a fala de pilotos de avião em situações de descanso e fadiga, inclusive em situações reais de trabalho e confirmou que os parâmetros acústicos e perceptivos de voz, fala e linguagem analisados são suficientemente robustos para detecção de fadiga central e sonolência.

Em 2020, A CNFH publicou um manual de orientações com métodos revisados para auxiliar o CENIPA a avaliar e identificar o fator fadiga em ocorrências aeronáuticas. Um dos métodos recomendados neste documento é a avaliação técnica dos aspectos de voz, fala e linguagem, a fim de verificar variações indicativas de estado de fadiga e sonolência nos pilotos (COMISSÃO NACIONAL DE FADIGA HUMANA - CNFH, 2020). Embora o documento reconheça a importância deste

método para detecção de fadiga na análise de ocorrências, a recomendação é de uma análise retrospectiva, sendo de extrema importância a realização de mais estudos mostrando a eficácia e aplicabilidade da análise dos aspectos de voz, fala e linguagem também como ferramenta preventiva e que pode ser facilmente implementada nos sistemas de gerenciamento de risco de fadiga. A identificação precoce da fadiga e da sonolência é de suma importância, não apenas para a prevenção de acidentes aéreos, mas também para garantir a saúde laboral dos aeronautas.

Retomando o estudo de Vasconcelos (2019), a autora apresenta cinco análises nas quais utilizou a análise acústica da fala em comparação com escalas psicométricas para mostrar os parâmetros da fala que podem ser indicativos de fadiga e sonolência em pilotos de aeronaves. Em uma dessas análises, no subestudo 5, foram aplicadas 4 escalas psicométricas para detecção de fadiga e sonolência e realizada a gravação de um trecho de fala espontânea e outra da leitura de um texto em 4 momentos distintos (dia de folga e 3 momentos do dia de trabalho), em uma amostra de 10 pilotos. A partir da análise e dos resultados obtidos, Vasconcelos (2019) descreve detalhadamente o método objetivo de análise acústica da fala e sintetiza os parâmetros mais relevantes. Além disso, observa que, na presença de fadiga e sonolência, as alterações nos parâmetros de fala são mais expressivos na fala espontânea do que na leitura de textos. Em relação ao momento analisado, no terceiro momento do dia de trabalho (após 16h de vigília) as alterações também foram mais significativas. Contudo, ainda não há uma correlação desse método com outros métodos de identificação de fadiga e sonolência.

Na pesquisa atual, utilizamos os dados e achados mais relevantes desse estudo para aprofundar sua análise em um número maior de participantes (25 pilotos), além de correlacionar o método proposto com outros métodos de detecção de fadiga e sonolência, como as escalas psicométricas de Samn-Perelli e Karolinska, e o modelo biomatemático de predição de fadiga SAFTE-FAST.

Diante desse cenário, o objetivo principal deste estudo foi aplicar o método objetivo de análise acústica baseada na organização temporal da fala, proposto por Vasconcelos (2019), em um N maior, a fim de confirmar e expandir os resultados obtidos, além de verificar a correlação desse método objetivo com métodos subjetivos de detecção de fadiga e sonolência.

Os objetivos específicos foram:

- a) Analisar marcadores acústicos de fala e linguagem indicativos de fadiga e sonolência.
- b) Comparar amostras de fala espontânea de um grupo de pilotos de aeronaves gravadas em dia de folga e dia de trabalho.
- c) Correlacionar os achados da análise acústica da fala com escalas psicométricas de detecção de fadiga e sonolência.
- d) Verificar a correlação entre os dados da análise acústica da fala e escalas psicométricas com o modelo biomatemático de predição de fadiga (SAFTE/FAST).

A hipótese principal deste estudo é que a fadiga e a sonolência detectadas por meio de escalas psicométricas podem também ser medidas por meio de alterações em parâmetros da organização temporal da fala, evidenciando o uso de tais medidas como sinais objetivos.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: o **Capítulo 2** contém a fundamentação teórica sobre fadiga, sonolência e sua relação com aspectos da comunicação oral. O **Capítulo 3** descreve o delineamento do estudo e detalhes da metodologia adotada. No **Capítulo 4**, os principais resultados do estudo são apresentados. No **Capítulo 5**, os resultados são discutidos e confrontados com dados da literatura. Finalmente, o **Capítulo 6** apresenta as conclusões, achados e contribuições do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e o quadro teórico, com estudos que norteiam a compreensão e possibilitaram a investigação deste estudo.

2.1 FADIGA E SONOLÊNCIA

2.1.1 Fadiga Humana

A fadiga humana é um conceito complexo que envolve uma série de processos mentais, motores, sensoriais, endócrinos, metabólicos e ambientais, tornando desafiadora a tarefa de estabelecer uma definição amplamente aceita e suficientemente precisa desta condição (SHEN; BARBERA; SHAPIRO, 2006; TREJO et al., 2015).

Para compreensão da amplitude do significado do termo fadiga, iniciaremos com uma distinção importante apontada na literatura: fadiga crônica (ou patológica) de estado de fadiga. A fadiga crônica refere-se a uma experiência prolongada de cansaço, podendo durar semanas ou meses, e mantém certa estabilidade. É frequentemente observada como sintoma de diversas doenças agudas e crônicas, como esclerose múltipla, artrite reumatoide, câncer, entre outras. Origina-se tanto de mecanismos intrínsecos à doença quanto de fatores secundários associados, como depressão, efeitos colaterais de medicamentos e certos tratamentos como radiação ou quimioterapia. Já o estado de fadiga é uma forma aguda ou temporária, que pode ocorrer em indivíduos saudáveis e se manifesta através de alterações no desempenho motor ou cognitivo e sensação subjetiva de exaustão, surgindo especificamente em resposta a uma atividade motora ou cognitiva sustentada. Geralmente, após descanso ou controle do fator desencadeante, o estado de fadiga é aliviado (BEHRENS et al., 2023; SHEN; BARBERA; SHAPIRO, 2006).

Outra distinção importante refere-se ao tipo de manifestação fisiológica da fadiga: central (ou mental) ou periférica (ou física). A fadiga central sugere que sua origem está ligada a disfunções do sistema nervoso central (SNC), podendo envolver transmissão inadequada entre o SNC e o sistema nervoso periférico ou falhas em áreas específicas do SNC, como a região hipotalâmica. Por outro lado, a fadiga

periférica pode ser atribuída a problemas no sistema nervoso periférico, em particular a uma dificuldade na transmissão sináptica na junção neuromuscular ou placa motora, resultando em déficits musculares e da atividade motora (SHEN; BARBERA; SHAPIRO, 2006). A fadiga mental é mais complexa e mais prejudicial pois está associada a sintomas comportamentais e fisiológicos que, em contexto de tarefas complexas e de alto risco, podem comprometer o desempenho e a segurança por meio de diversos déficits cognitivos, incluindo: diminuição da vigilância, diminuição do desempenho, prejuízo na habilidade de resolução de problemas, redução da consciência situacional, entre outros (TREJO et al., 2015). Daremos maior enfoque na fadiga mental por esta ser objeto de estudo deste trabalho.

Alguns modelos teóricos têm buscado compreender as bases neurais da fadiga. Um deles delineou uma estrutura que identifica duas origens fundamentais: primeiro, com o surgimento da fadiga, há uma diminuição da atividade em áreas cerebrais específicas envolvidas na tarefa em execução. Segundo, há uma redução concomitante na ativação de regiões cerebrais não específicas para a tarefa, como a ínsula, o córtex pré-frontal dorsolateral e o córtex cingulado anterior. Estas áreas seriam responsáveis pela avaliação dos benefícios da tarefa e pela regulação do esforço, ponderando os custos e benefícios do desempenho (DARNAI et al., 2023; ISHII; TANAKA; WATANABE, 2014).

A capacidade de sustentar tarefas que demandam esforço físico e mental intenso ou prolongado desempenha um papel significativo na experiência humana, sendo necessária em diversos aspectos do cotidiano, incluindo atividades físicas, profissionais e educacionais (BEHRENS et al., 2023). Contudo, a execução prolongada de tarefas cognitivamente exigentes, pode induzir à fadiga mental, levando a um declínio desse desempenho, além de aumento na distração e diminuição da motivação para continuar na tarefa. Tais fatores elevam significativamente o potencial para erros e o risco de acidentes de trabalho (DARNAI et al., 2023).

Dessa forma, a fadiga mental, também conhecida como fadiga central ou fadiga cognitiva, pode ser definida como um estado psicobiológico resultante de atividades cognitivas prolongadas e desafiadoras, necessitando de esforço mental contínuo. Se manifesta por meio de um aumento na sensação de cansaço, resistência em prosseguir com a tarefa e declínio do desempenho (BEHRENS et al., 2023; DARNAI

et al., 2023; SALIHU; HILL; JABERZADEH, 2022; SHEN; BARBERA; SHAPIRO, 2006).

Estudos descrevem declínios nas funções executivas, principalmente na capacidade atencional, como atenção sustentada, atenção seletiva, atenção alternada e atenção dividida, dificuldade na inibição de resposta, prejuízos no planejamento e processamento de novas informações como componentes altamente vulneráveis à fadiga mental (ISHII; TANAKA; WATANABE, 2014).

No contexto da aviação, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) define fadiga da seguinte forma:

“Um estado fisiológico de capacidade de desempenho mental ou físico reduzida, resultante de perda de sono, vigília prolongada, fase circadiana e/ou carga de trabalho (atividade mental e/ou física) que pode prejudicar o estado de alerta de uma pessoa e a capacidade de realizar adequadamente funções operacionais relacionadas à segurança” (ICAO, 2016, p. 2-1).

Para o gerenciamento da fadiga, a ICAO exige que sejam estabelecidos regulamentos com base em princípios científicos relacionados a: necessidade de sono, privação e recuperação do sono e influência da carga de trabalho, sendo que, nesta última, a quantidade e qualidade do sono devem ser valorizados e monitorados, uma vez que o sono de qualidade é essencial para restaurar a saúde do cérebro e corpo (INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO, 2016).

A fadiga pode ser desencadeada por diversos fatores, incluindo a privação de sono, períodos prolongados de vigília, desajustes no ritmo circadiano e excesso de carga de trabalho (ALAMINOS-TORRES et al., 2023). Outros fatores como voos noturnos, *jet lag*, despertar precoce, vários trechos de voo, pressão do tempo e sessões de serviço sucessivas sem pausas eficientes para descanso também foram apontados por outro estudo (KHAROUFAH et al., 2018).

Os sinais e sintomas exibidos por pessoas cansadas incluem sonolência, letargia, diminuição da motivação, atenção, resistência, concentração, memória e equilíbrio físico, além de uma forte necessidade de descanso e sentimento de mal-estar (SALIHU; HILL; JABERZADEH, 2022).

A relação entre carga de trabalho e fadiga já foi amplamente investigada em pilotos. Em um estudo recente com pilotos de curta distância, esta relação foi confirmada. De acordo com Arsintescu et al., (2020) observou-se que pilotos com maior carga de trabalho autorrelatada demonstraram tempos de reação mais lentos e níveis acentuados de fadiga. Foi identificada uma correlação, embora tênue, entre a carga de trabalho média, medida pelo desempenho em testes como Tarefa de Vigilância Psicomotora (PVT), e escalas como a de Samn-Perelli, duração do sono, quantidade de setores e duração do voo. Notavelmente, a avaliação da carga de trabalho estava consistentemente associada ao desempenho no PVT e às classificações de fadiga de Samn-Perelli. Em situações de elevada carga de trabalho, os pilotos apresentaram mais lapsos no PVT e tempos de resposta mais lentos. A correlação mais forte observada no estudo foi entre o desempenho do PVT e a carga de trabalho, indicando que um aumento na carga de trabalho é frequentemente acompanhado por uma elevação na percepção de fadiga e piora do desempenho em tarefas (ARSINTESECU et al., 2020).

2.1.2 Ciclo Sono-Vigília

O nosso corpo possui um relógio biológico de 24 horas, conhecido como ritmo circadiano, que regula os nossos períodos de vigília e sono em resposta às mudanças de luz ao nosso redor. O ciclo sono-vigília representa o ritmo circadiano mais marcante, sendo um processo fisiológico meticulosamente regulado por centros cerebrais responsáveis tanto pela indução do sono quanto pela excitação do cérebro (RUAN; YUAN; ELTZSCHIG, 2021).

A melatonina, um hormônio produzido principalmente durante a escuridão na glândula pineal e suprimido pela exposição à luz, desempenha um papel crucial na regulação desse ritmo circadiano e no ciclo de sono-vigília (OKECHUKWU, 2022; RUAN; YUAN; ELTZSCHIG, 2021). Em diversos seres vivos, o ritmo circadiano evoluiu para harmonizar as flutuações ambientais externas com os processos fisiológicos internos (RUAN; YUAN; ELTZSCHIG, 2021).

Abordando a neurofisiologia do sono de forma resumida, o sono humano é composto por duas fases principais: o sono com movimentos oculares não rápidos (NREM) e o sono com movimentos oculares rápidos, denominado sono REM. O

núcleo pré-óptico ventrolateral, que contém substâncias como o ácido gama-aminobutírico (GABA) e a galanina, desempenha um papel importante na indução do sono, respondendo a estímulos circadianos do hipotálamo anterior e informações homeostáticas relacionadas ao sono-vigília, como a concentração de adenosina, que aumenta proporcionalmente ao tempo acordado (OKECHUKWU, 2022).

De acordo com Okechukwu (2022), uma vez iniciado o sono, um oscilador ultradiano localizado na junção mesopontina regula a alternância entre os estágios de sono NREM e REM. Na fase NREM, observamos uma diminuição no tônus simpático e um aumento na atividade parassimpática, criando um estado de atividade diminuída. Durante a fase REM, ocorre um aumento na atividade parassimpática e uma atividade simpática ajustada.

O sono NREM é dividido em três estágios distintos. O estágio 1 do sono NREM marca a transição da vigília para o sono e normalmente dura menos de 10 minutos. É um estágio de sono leve que se caracteriza por uma respiração mais lenta, batimentos cardíacos mais calmos e relaxamento muscular. O estágio 2 do sono NREM também é considerado um estágio de sono leve e precede os estágios mais profundos do sono NREM. Nesse estágio, a respiração e os batimentos cardíacos desaceleram, os músculos relaxam ainda mais, e a atividade cerebral se torna mais lenta. O estágio 3 do sono NREM é o estágio de sono profundo, no qual a respiração e os batimentos cardíacos diminuem significativamente. Durante essa fase, os músculos permanecem relaxados, e as ondas cerebrais são ainda mais lentas. Este estágio dura aproximadamente de 20 a 40 minutos (OKECHUKWU, 2022).

O sono REM representa a fase final do ciclo do sono, que precede o início de um novo ciclo. Durante o sono REM, a respiração e os batimentos cardíacos se tornam mais rápidos e a maioria dos sonhos ocorre nesse período (OKECHUKWU, 2022).

A vigília caracteriza-se por um estado de alerta em que há consciência do ambiente e capacidade de reagir a estímulos externos. Este estado contrasta com o sono, no qual a sensibilidade a tais estímulos é reduzida. Com o aumento da duração da vigília, observa-se um aumento na sincronização dos disparos neuronais no córtex cerebral. Contudo, após extensos períodos de vigília sustentada, a frequência e a sincronia desses disparos neuronais diminuem (OKECHUKWU, 2022).

Desta forma, o sono desempenha um papel vital em funções biológicas cruciais, incluindo a consolidação da memória, concentração, produtividade, regulação da temperatura corporal e a restauração da energia. Alterações substanciais em qualquer um desses aspectos pode ter impactos significativos no desempenho físico, profissional, cognitivo e social de um indivíduo, e, em última instância, prejudicar consideravelmente a qualidade de vida (JIANG et al., 2018; KINOSHITA et al., 2020).

As perturbações do ciclo sono-vigília podem exercer impacto significativo na saúde mental e favorecer o surgimento de doenças neurodegenerativas (KINOSHITA et al., 2020). Distúrbios do sono afetam um número cada vez maior de pessoas no mundo, sendo que muitas delas não recebem diagnóstico ou tratamento adequado (OKECHUKWU, 2022).

A sonolência pode ser considerada um estado comum, pois manifesta-se tanto em contextos fisiológicos normais dentro de um período de 24h, quanto em distúrbios de saúde, psiquiátricos e relacionados ao sono. É considerada atípica quando surge em momentos inapropriados ou falha em surgir conforme desejado (SHEN; BARBERA; SHAPIRO, 2006).

Seres humanos são intrinsecamente diurnos e, por sua natureza, apresentam limitações fisiológicas para manter longos períodos de vigília contínua, trabalho noturno e alterações significativas nos padrões sono-vigília (CALDWELL et al., 2019).

No contexto da aviação, embora a tecnologia e exigências operacionais tenham avançado, a necessidade de sono do operador humano permanece a mesma. A variabilidade inerente às operações de voo, como alterações climáticas e tráfego aéreo, faz com que pilotos e tripulantes frequentemente operem sob escalas rotativas e irregulares. Além dos desafios comuns associados ao trabalho por turnos, esses profissionais enfrentam consequências adicionais decorrentes das mudanças de fuso horário. Assim, a sonolência é um fator prevalente nesta população, e que frequentemente requer medidas para gerenciamento e mitigação por parte das companhias aéreas e órgãos reguladores (JACKSON; EARL, 2006; WEN et al., 2023).

Deslocamentos em múltiplos fusos horários, combinados com privação de sono por voos prolongados são fatores determinantes para sintomas de *jet lag* em pilotos de aeronaves. *Jet lag* é um termo em inglês que caracteriza uma desordem temporária

resultante da diferença entre o ritmo circadiano e o relógio externo do ambiente, frequentemente causada por viagens através de vários fusos horários (RUAN; YUAN; ELTZSCHIG, 2021).

2.1.3 Fadiga e Sonolência em pilotos de aeronaves

Fadiga e sonolência são comumente reportadas por trabalhadores em turnos e, embora esses termos sejam frequentemente usados de forma sinônima para descrever a sensação de “cansaço”, representam fenômenos distintos. A fadiga é resultado do esforço e manifesta-se como letargia ou exaustão após atividades intensas e não implica necessariamente em necessidade de sono. A sonolência, por sua vez, está ligada ao ritmo circadiano e ao impulso homeostático do sono. Assim, a duração do período acordado contribui para o aumento da sensação de sonolência. Diferentemente da fadiga, a sonolência pode ser resolvida com algumas horas de sono (WEN et al., 2023).

De acordo com Wen et al. (2023), quando trabalhadores em turnos são expostos a fadiga acumulada ou sono inadequado, podem manifestar sintomas de humor deprimido, ansiedade e estresse. Além disso, essas condições podem comprometer as habilidades cognitivas e físicas a ponto de simular efeitos de intoxicação alcoólica, afetando o desempenho. O trabalho por turnos é muito comum na indústria da aviação e provavelmente contribui, pelo menos em parte, para o desencadeamento destas condições.

A evidência da fadiga no setor aéreo tem crescido notavelmente, devido à pressão inerente à atividade aérea e às responsabilidades associadas às funções desses profissionais, especialmente os membros da tripulação de cabine. As diversas condições de trabalho às quais estão sujeitos, incluindo turnos variados, afetam o ritmo circadiano, perturbando funções orgânicas cruciais, como o sono e a alimentação. Esses fatores, por sua vez, resultam em um considerável impacto na saúde dos trabalhadores, prejudicando tanto a qualidade de vida quanto as condições essenciais para a segurança das operações de voo. Pesquisas realizadas com aeronautas sinalizam que esta categoria dispõe frequentemente de uma série de problemas de sono e de saúde, especialmente sonolência excessiva, cochilos involuntários e fadiga (JACKSON; EARL, 2006; PELLEGRINO; MARQUEZE, 2019).

A atenção e a carga de trabalho dos pilotos frequentemente se concentram intensamente no ambiente interno da aeronave, necessária para monitorar a complexa instrumentação no *cockpit* e interagir com o Controle de Tráfego Aéreo, com períodos críticos de demanda de recursos atencionais em certas manobras como decolagem e fase de pouso. Destaca-se que a carga de trabalho mental não é uma característica intrínseca do cérebro, mas o resultado da combinação entre os requisitos da tarefa, as condições em que é realizada e as competências, comportamentos e percepções de um piloto (ALAMINOS-TORRES et al., 2023; BORGHINI et al., 2014).

Além disso, foi descrito na literatura que fatores ambientais como má circulação de ar, pouca luz e ruído de fundo constante e as vibrações podem provocar ou pelo menos contribuir para a fadiga. Esse fator aumenta quando uma pessoa se envolve em atividades de perigo que demandam atenção e alta concentração (GREELEY et al., 2007).

Um exemplo altamente ilustrativo dos impactos da fadiga na segurança de operações aéreas é evidenciado pelo acidente envolvendo o voo 812 da Air Índia Express, ocorrido em 2010, durante a aterrissagem em Mangalore. Esse acidente resultou na trágica perda de 158 vidas das 166 pessoas a bordo. Acredita-se que a sonolência residual e a tomada de decisões prejudicada tenham desempenhado um papel nesse acidente, uma vez que as gravações da cabine indicaram que o capitão estava adormecido durante a primeira hora e quarenta minutos de um voo com duração total de duas horas e cinco minutos. Esse incidente representou o primeiro registro de ronco em um gravador de voz da cabine (WINGELAAR-JAGT et al., 2021).

A sonolência e o adormecimento involuntário são, possivelmente, os dois efeitos mais frequentemente mencionados pelos pilotos quando questionados sobre sua experiência de fadiga durante o voo. Foi estabelecido e reconhecido por órgãos de segurança de voo, que pilotos fatigados com até 19h de vigília eram mais propensos a cometer erros de julgamento na tomada de decisões (JACKSON; EARL, 2006).

Indivíduos fatigados tendem a ter níveis reduzidos de alerta, podendo começar a sentir sonolência ou mesmo adormecer. Se esses indivíduos não conseguirem o descanso necessário, a sensação de sonolência pode se tornar intolerável, levando a

ocorrência de microssonos, que são definidos como breves períodos de sono involuntário e incontrolável. Episódios de microssono não intencionais, por sua vez, afetam negativamente o desempenho (ALAMINOS-TORRES et al., 2023; INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO, 2016).

2.1.4 Métodos de avaliação da Fadiga e sonolência

Tal como ocorre com os estados mentais, a identificação da fadiga mental por meio de processos fisiológicos específicos é uma tarefa desafiadora. Assim, a fadiga mental é frequentemente determinada por avaliações subjetivas associadas a sintomas comportamentais e fisiológicos e quantificada por meio de medidas autorreferidas e modelagem biomatemática (TREJO et al., 2015).

Medidas autorreferentes tem sido empregadas na avaliação da fadiga e sonolência subjetiva, ou seja, aquela percebida pelo indivíduo. No ambiente operacional, esses instrumentos são particularmente úteis devido às restrições práticas que dificultam a coleta de dados objetivos baseados em parâmetros fisiológicos. Contudo, apesar de sua aplicação conveniente e rápida, minimizando interrupções nas atividades da tripulação, essas ferramentas não alcançam a confiabilidade e precisão de medidas objetivas, como actígrafos, polissonografias, eletroencefalografia (EEG) e Teste de Vigilância Psicomotora (PVT). A limitação deste tipo de medida está relacionada ao fato de que são baseadas na experiência pessoal e na informação disponível no momento (CASSIANO, 2017; INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO, 2016).

Apesar dos desafios advindos de medidas de autorrelatos, elas ainda se configuram como um método de pesquisa importante e necessário. Encontra-se na literatura uma variedade de escalas para medir fadiga e sonolência, utilizadas em diferentes contextos. Destacaremos nesta seção as duas mais amplamente utilizadas no contexto da aviação e especialmente recomendadas pela ICAO (GAWRON, 2016; SHAHID; SHEN; SHAPIRO, 2010).

A Escala de Sonolência de Karolinska, do inglês *Karolinska Sleepiness Scale* (KSS), é uma das ferramentas disponíveis e amplamente empregada para avaliar relatos subjetivos de sonolência em contextos de campo e laboratório. Desenvolvida

para ser uma medida unidimensional de sonolência, a KSS foi validada através de correlações com a atividade eletroencefalográfica (EEG) alfa e teta e com a atividade electrooculográfica de movimentos lentos dos olhos (EOG). Estudos de validação demonstram uma consistente correlação positiva entre as medidas objetivas de sonolência e as autoavaliações reportadas através desta escala (KAIDA et al., 2006).

A KSS avalia as classificações subjetivas imediatas da sonolência de um indivíduo em uma escala de nove pontos, variando de 1 (extremamente alerta) a 9 (muito sonolento, esforço significativo para manter-se acordado, lutando contra o sono (ÅKERSTEDT; GILLBERG, 1990).

Para avaliação da fadiga, temos a escala de Samn-Perelli (SP), um instrumento composto por um único item de sete pontos, que solicita ao indivíduo que identifique seu estado atual. Devido à sua simplicidade e rapidez na aplicação, é ideal para uso em situações de voo, seja real ou simulado, sem interromper as atividades dos tripulantes. Embora a SP tenha características de um *checklist* e não se enquadre estritamente nas propriedades psicométricas tradicionais de escalas, ela foi validada em contextos experimentais com simulações de voo. Os resultados demonstraram sua sensibilidade em detectar impactos da vigília prolongada e do envolvimento da operação aérea no desempenho dos tripulantes. Assim, a escala SP é eficaz na mensuração da percepção de fadiga em ambientes aeronáuticos (CASSIANO, 2017; SAMN; PERELLI, 1982).

Ambas escalas mencionadas avaliam a condição momentânea do indivíduo, o que pode resultar em variações significativas ao longo do dia. No entanto, sua simplicidade e rapidez no preenchimento são vantajosas, principalmente porque minimizam interrupções nas atividades profissionais, um aspecto crucial para a viabilidade de sua aplicação.

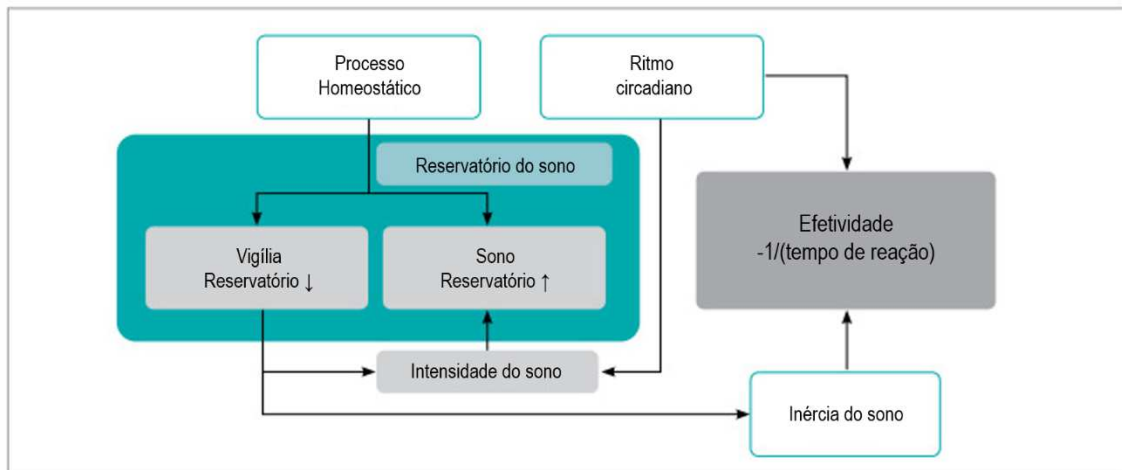
Modelos biomatemáticos são outro tipo de ferramenta possível para avaliação e monitoramento de fadiga e sonolência e estão sendo progressivamente integrados em programas de gerenciamento de fadiga. Teve sua primeira aplicação em operações militares, com o propósito de compreender o impacto da fadiga nas tropas envolvidas em operações prolongadas (DEVINE et al., 2023; HURSH et al., 2004).

Tais modelos empregam equações para antecipar níveis de fadiga, considerando variáveis como duração e qualidade do sono, padrões de sono-vigília e,

ocasionalmente, a carga de trabalho. Um exemplo relevante é o modelo Sono, Atividade, Fadiga e Eficiência de Tarefas, do inglês, *Sleep, Activity, Fatigue and Task Effectiveness* (SAFTE) proposto por Hursh et al., (2004), e adotado pelas forças armadas dos EUA. Este modelo foi incorporado ao *Fatigue Avoidance Scheduling Tool* (FAST), uma interface de software que exibe graficamente as previsões de desempenho geradas pelo modelo SAFTE (CALDWELL et al., 2019; DEVINE et al., 2023).

De acordo com Rodrigues et al. (2020), O SAFTE-FAST é projetado para estimar a eficácia operacional de um indivíduo durante o dia. A efetividade é um dos parâmetros calculados pelo modelo e é proporcional à velocidade e precisão da execução de tarefas, representando a velocidade cognitiva. A fundamentação do modelo se dá com base em três aspectos: equilíbrio homeostático, ritmo circadiano de sono-vigília e inércia do sono. O equilíbrio homeostático é representado como um “reservatório de sono” (outro parâmetro do software), que cai progressivamente durante as horas de vigília e se recupera durante o sono. A taxa de recuperação deste reservatório é influenciada pela intensidade, duração e qualidade do sono, com a intensidade sendo modulada tanto pelo déficit de sono acumulado quanto pelo ritmo circadiano. O componente inércia do sono, por sua vez, representa o comprometimento temporário no desempenho cognitivo observado imediatamente após o despertar, correspondendo ao período necessário para alcançar o estado de pleno alerta (HURSH et al., 2004; RODRIGUES et al., 2020). Um esquema deste mecanismo é demonstrado na figura abaixo:

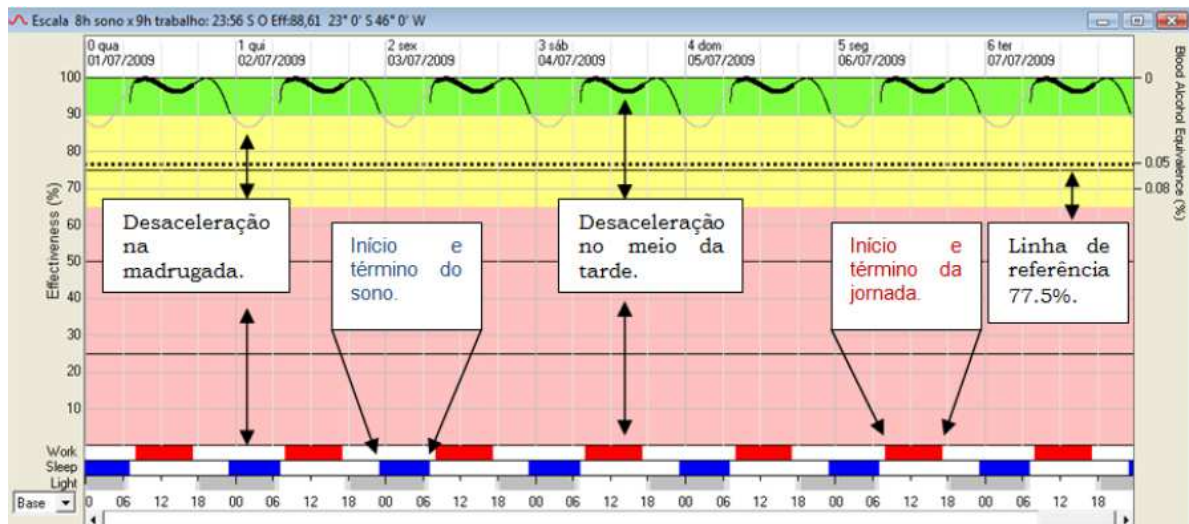
Figura 1 - Diagrama representando o modelo SAFTE-FAST



Fonte: adaptado de Rodrigues et al., (2020).

Licati et al. (2010) ilustram a aplicação da ferramenta para o planejamento adequado das escalas e investigação de erros dos tripulantes por meio de dois exemplos: no primeiro, um indivíduo que dorme 8h por noite e trabalha 9h por dia tem sua efetividade demonstrada no gráfico da Figura 2. O desempenho laboral, destacado em preto, flutua com base no “reservatório de sono”. Este reservatório é consumido ao longo do período de vigília e é reabastecido durante o sono. Ao longo de um ciclo circadiano de 24h, o desempenho exhibe duas quedas notáveis: uma acentuada durante a madrugada e uma redução mais branda no meio da tarde.

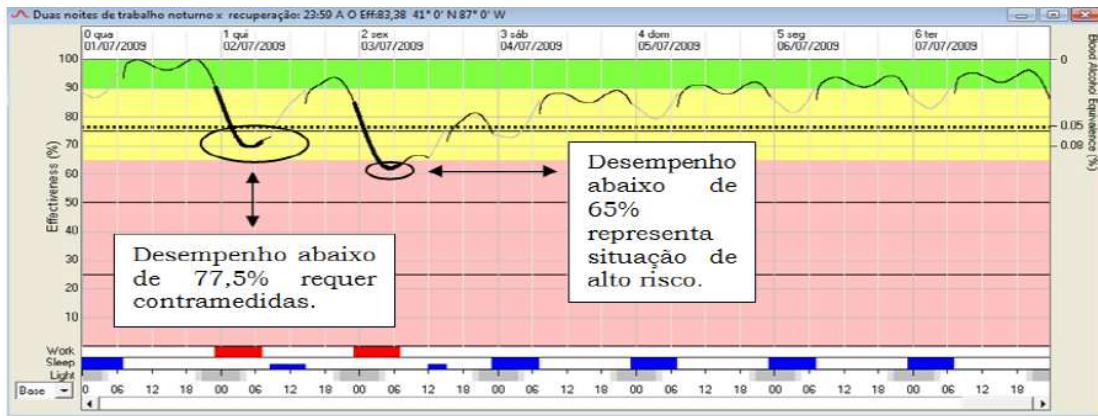
Figura 2 - Efetividade de uma pessoa que dorme 8h/noite e trabalha 9h/dia



Fonte: Licati et al., (2010).

O segundo exemplo, ilustrado na Figura 3, mostra um indivíduo que está bem descansado e experimenta a privação de sono por duas noites consecutivas, manifestando uma queda significativa no desempenho, atingindo níveis inferiores a 77,5%. Esse nível de efetividade já indica a necessidade de implementar contramedidas para gestão de riscos. Se o desempenho degrada ainda mais, para nível abaixo de 65%, representa uma situação de alto risco. Adicionalmente, trabalhar durante duas madrugadas consecutivas não só eleva o risco das operações aéreas, como também exige do profissional até quatro dias assumindo um regime de 8h de sono regular por noite para restaurar sua capacidade plena.

Figura 3 - Efetividade após duas noites de trabalho x recuperação



Fonte: Licati et al., (2010).

Estas flutuações refletem as influências biológicas inerentes ao ritmo circadiano sobre a capacidade funcional do indivíduo e ilustra como a interação entre os principais determinantes da fadiga, privação e débito de sono, podem predispor um indivíduo à fadiga durante sua jornada de trabalho (LICATI et al., 2010).

O SAFTE-FAST além de ser validado em contextos de transporte terrestre, foi adaptado para incluir informações pertinentes à aviação. Se mostrou eficaz em prever os impactos da privação de sono em tarefas cognitivas e os efeitos da restrição do sono na vigilância psicomotora (CALDWELL et al., 2019).

Atualmente, este software é empregado por empresas de aviação comercial regulamentadas pelo Regulamento Brasileiro da Aviação Civil - RBAC 121. Além disso, é utilizado em um projeto pioneiro, conhecido como “Fadigômetro”, cujo objetivo é a criação de um banco de dados sobre o estado de alerta e fadiga das tripulações da aviação civil brasileira, sendo financiado e desenvolvido através de colaboração entre o Sindicato Nacional dos Aeronautas (SNA), a Associação Brasileira de Pilotos da Aviação Civil (ABRAPAC), a Associação dos Aeronautas da GOL (ASAGOL) e a Associação dos Tripulantes da LATAM Brasil (ATL), além de pesquisadores do Instituto de Física, Instituto de Biociências e Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo (RODRIGUES; FAZÃO; FISCHER, 2023). Maiores detalhes sobre o projeto podem ser obtidos no endereço www.fadigometro.com.br.

Embora a fadiga mental seja predominantemente avaliada por métodos subjetivos, há uma demanda significativa por abordagens objetivas para sua

estimação, monitoramento e previsão (TREJO et al., 2015). Como veremos neste estudo, métodos de análise acústica de voz e fala têm se mostrado promissores para este fim.

2.2 VOZ, LINGUAGEM E FALA

Voz, fala e linguagem são capacidades inatas que possibilitam a comunicação humana, mas não são sinônimos e uma abordagem didática com o objetivo de diferenciá-las se mostra pertinente quando consideradas em contexto científico.

A voz é uma tarefa motora que produz som por meio do uso simultâneo dos pulmões e das pregas vocais na laringe. A linguagem refere-se à expressão oral, escrita ou simbólica utilizada para comunicar, descrever e compartilhar conhecimentos, crenças e comportamentos. Já a fala é a manifestação oral da linguagem realizada por meio de ações musculares precisamente coordenadas que executam o que foi previamente planejado no nível linguístico (GREELEY et al., 2013).

Abordaremos cada um desses aspectos com mais detalhes, dada a sua importância para compreensão deste estudo.

2.2.1 Voz

A voz é um fenômeno acústico, presente não só em humanos, mas em diversas espécies. É produzida pela pressão da passagem de ar expiratório pelas pregas vocais, fazendo-as vibrarem e produzirem um som. Este som é produzido em baixa amplitude e passa por uma etapa inicial de modulação ainda dentro da laringe. Esta modulação inicial dá a tonalidade da voz e refere-se à tensão do músculo das pregas vocais. Quanto mais tensionadas estiverem, maior a frequência de vibração e, como resultado, mais agudo é o som. Quanto menos tensionadas, menor a frequência de vibração e mais grave é o som (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2017; SIMONYAN; HORWITZ, 2011).

O sinal vocal ganha significado por meio de sua modulação, ao passar pelas estruturas fonoarticulatórias (laringe, faringe, cavidade nasal, cavidade oral, dentes, língua, bochechas e mandíbula). A modulação do sinal de voz pelo trato vocal

transformando-o em fonemas, sílabas e palavras de uma língua tem como resultado a fala (SIMONYAN; HORWITZ, 2011).

A análise do sinal vocal permite a extração de diversos parâmetros objetivos, tais como a frequência fundamental (F0), qualidade vocal (*jitter/shimmer*), harmônicos e formantes, relação sinal-ruído, intensidade, frequência e duração do sinal. Verificam-se na literatura diversos estudos que investigaram estes parâmetros em diferentes condições de saúde e obtiveram resultados suficientemente robustos para reconhecer a voz como um potencial e acessível biomarcador, útil para auxiliar na classificação, monitoramento e definição de diversos diagnósticos (BRIEND et al., 2023; FAGHERAZZI et al., 2021; GAO et al., 2022; HAIDER; DE LA FUENTE; LUZ, 2020; YANG et al., 2020).

Yang et al. (2020), por exemplo, identificaram diferenças significativas nos parâmetros acústicos da fala (F0, duração e intensidade vocal, variações na frequência de vibração das pregas vocais) de indivíduos diagnosticados com Doença de Parkinson (DP) comparado a indivíduos saudáveis. As discrepâncias mais proeminentes foram identificadas na dimensão temporal, ou seja, na duração dos parâmetros, que reflete o tempo que um sujeito requer para articular um fonema ou uma sequência de fala. Indivíduos com DP tendem a apresentar segmentos de fala mais curtos, assim como um aumento na velocidade de fala, particularidades que os autores relacionam à rigidez muscular característica da doença, ocasionando prejuízos no gerenciamento do fluxo aéreo e no controle laríngeo. Tais disfunções, por sua vez, exercem um impacto direto na qualidade da emissão vocal.

Em condições transitórias como a fadiga, os estudos ainda são incipientes, mas promissores. Um estudo com 17 indivíduos saudáveis investigou, especificamente, variações de F0 durante uma tarefa fatigante e correlacionou os resultados com outras variáveis como diâmetro da pupila, escala de sensação de fadiga e desempenho na tarefa. Os autores observaram que os valores de F0 aumentaram à medida que a sensação de fadiga aumentou e o desempenho na tarefa declinou, concluindo que a F0 se configura como um confiável e potencial indicador psicofisiológico de fadiga mental, com implicações práticas tanto na previsão de fadiga em tarefas cotidianas quanto em análises retrospectivas (CAÑAS; MUÑOZ-DE-ESCALONA; MORALES-GUAMAN, 2021).

Segundo Boyer et al. (2018), por meio da voz, pode-se extrair medidas interessantes para medir carga cognitiva por ser possível registrá-la na maioria das situações do dia a dia utilizando equipamentos acessíveis e de baixo custo. Comprovaram isto por meio de seus achados ao analisarem objetivamente diversos parâmetros extraídos do sinal vocal e constataram que parâmetros como *jitter* e F0 variaram significativamente com a carga mental e, portanto, constituem parâmetros promissores para aplicabilidade clínica.

Em estudo recente, Gao et al. (2022), mediram o estado de fadiga em 15 indivíduos após 36h de privação de sono, utilizando a análise acústica de voz e métodos fisiológicos como potencial relacionado a eventos (ERP) e nível de glicocorticoide salivar, além de escalas psicométricas. Em relação aos parâmetros vocais, os autores extraíram a F0, relação harmônico/ruído, *jitter/shimmer*, energia e coeficientes Cepstrais e utilizaram aprendizado de máquina para verificar correspondências dos parâmetros de voz com os métodos fisiológicos. Apesar da amostra pequena, a taxa de precisão foi em torno de 76% a 81%, indicando a alta acurácia do método de análise de voz na detecção de fadiga.

De fato, a análise de parâmetros vocais é um método objetivo e do qual o advento da tecnologia tem tornado possível extrair diversas medidas de maneira automática com o auxílio de softwares, dentre elas, uma que vem recebendo cada vez mais atenção é a análise utilizando o método MFCC, do inglês *Mel-Frequency Cepstral Coefficients* (BOUALOULOU N. et al., 2022; WU; SUN, 2022).

Greeley et al. (2007) investigaram a capacidade de estimar a fadiga por meio deste tipo de análise vocal baseada em MFCC, utilizando softwares de reconhecimento de fala. Ao confrontar essa abordagem com modelos biomatemáticos de predição de fadiga, como o SAFTE, perceberam certas limitações devido ao fato de que a análise do tempo acordado não quantifica com precisão o nível de atividade do indivíduo e que, apesar da influência do ritmo circadiano em muitos sistemas fisiológicos, eles não o medem com a mesma sensibilidade. No entanto, os autores ressaltam que mesmo com essas diferenças, a associação entre a análise do tempo acordado e do desempenho com mudanças na voz é um método promissor.

Uma lacuna ainda presente neste tipo de abordagem é que a análise acústica do sinal vocal requer, na maioria das vezes, que este sinal seja livre de ruídos e

interferências e, para garantir a qualidade do sinal, é necessária sua gravação em ambiente controlado, para que seja possível a extração destas medidas. Além disso, a voz humana é um sinal altamente dinâmico e dependente de diversos fatores (emoção, entonação, condição de saúde, etc...), sua amplitude e frequência variam constantemente ao longo do tempo e, por isso, é considerado um sinal não estacionário. Métodos tradicionais de processamento de sinal são projetados para analisar sinais estacionários e, para analisar sinais não estacionários como a voz, é necessário utilizar abordagens adaptadas, como dividir o sinal em pequenos segmentos (tornando-os estacionários) e analisar cada um deles (WU; SUN, 2022).

A gravação do sinal de voz em ambiente controlado é um fator que limita a praticidade e acessibilidade deste método. Além disso, embora as características do trato vocal também possam indicar fadiga ou carga cognitiva, elas representam recursos de fala de baixo nível, estando mais associadas à efeitos fisiológicos, como respiração e mudanças na tensão muscular, do que à processos cognitivos de alta ordem ou mais complexos.

2.2.2 Linguagem Humana

Há anos, a linguagem humana é objeto de estudo de diversas disciplinas como a Psicologia, Fonoaudiologia e Linguística. Nos últimos anos também tem despertado particular interesse da Neurociências, por este campo possibilitar uma discussão mais ampla e multidisciplinar, contribuindo para compreensão desta complexa habilidade.

A linguagem pode ser definida como um sistema que permite a representação de informações por meio de símbolos e regras de uma língua, podendo ser expressa de forma verbal, gestual ou escrita (BEAR; CONNORS; PARADISO, 2017).

O aprofundamento em modelos teóricos de aquisição e desenvolvimento da linguagem foge ao escopo deste estudo. Abordaremos de forma resumida alguns conceitos envolvidos na formulação da mensagem a fim de compreender como se dá a organização do discurso falado.

Assim como diversas funções cognitivas, a linguagem não se realiza de forma independente. Especialmente no caso da linguagem, outras duas funções cognitivas exercem importante papel de suporte: a atenção e a memória. A atenção é a

capacidade de se concentrar em um estímulo específico, evitando distrações de outros estímulos internos ou externos. Alterações na atenção podem impactar significativamente o desempenho em tarefas linguísticas, como evidenciado em diversas lesões e doenças. A memória, fundamental em quase todas as etapas do processamento linguístico, também desempenha papel crucial. Déficits na memória operacional podem afetar a compreensão e produção da fala. Essas duas funções são componentes do controle executivo de alta ordem denominado funções executivas (MANSUR; RADANOVIC, 2004).

A relação entre o controle executivo central e a linguagem vem sendo estudada na literatura em indivíduos saudáveis e, sobretudo, indivíduos com déficits de linguagem. De acordo com Gonçalves et al. (2018), quanto mais complexa a habilidade linguística, maior o recrutamento das funções executivas. Especialmente a inibição, memória de trabalho e flexibilidade cognitiva são habilidades cruciais para vários aspectos da vida, incluindo trabalho, educação, saúde mental e física, e são igualmente fundamentais para outras habilidades como a linguagem. Déficits nas funções executivas podem levar à uma organização deficiente do pensamento, resultando em produção de enunciados irrelevantes, dificuldades na escolha de palavras, sequencia inadequada de palavras e proposições, linguagem tangencial e verbosidade, afetando a expressão linguística. Dessa forma, as funções executivas são essenciais para uma comunicação eficaz, permitindo reter o que foi dito, planejar respostas e inibir respostas inapropriadas, envolvendo memória de trabalho, planejamento e inibição.

Para Levelt (1993), psicolinguista e pesquisador da aquisição da linguagem humana e dos processos cognitivos envolvidos na produção da fala, antes do ato intencional de falar, ocorrem uma série de processos que exigem atenção ativa do falante. Esses processos se iniciam na concepção de uma intenção, que passa por uma seleção de informações relevantes, segue por uma ordenação das informações, além de monitoramento do que foi dito anteriormente. O autor denomina este conjunto de processos mentais como conceitualização, resultando no que se denomina planejamento da mensagem pré-verbal. O planejamento da mensagem pré-verbal pode então ser dividido em duas fases: o macroplanejamento e o microplanejamento. O macroplanejamento envolve a elaboração de algum objetivo comunicativo em uma série de subobjetivos e a recuperação da informação a ser expressa na memória

declarativa por meio da memória procedural. No microplanejamento, cada parte da informação recebe a estrutura adequada para ser compreendida, bem como a perspectiva informacional que orientará a atenção do ouvinte.

O processo seguinte é denominado Formulação. O componente formulador aceita fragmentos de mensagens como entrada e produz como saída um plano fonético ou articulatório. Assim, o formulador transforma a estrutura conceitual em uma estrutura linguística, por meio da codificação gramatical e da codificação fonológica. Essa última é uma representação interna de como o enunciado planejado deve ser articulado. Desta forma, o produto final do formulador é armazenado numa espécie de memória de trabalho, denominada *buffer* articulatório, e torna-se a entrada para o próximo componente do processamento, a articulação (LEVELT, 1993).

Articular é a execução do plano fonético pela musculatura dos sistemas respiratório, laríngeo e supralaríngeo. O componente articulatório recupera partes da mensagem pré-verbal do *buffer* e os torna sílabas e palavras efetivamente articuladas. O produto da articulação é a fala espontânea (LEVELT, 1993). A teoria proposta por Levelt (1993) é uma das que existem para descrever os processos da linguagem.

2.2.3 Fala

A fala, apesar de ser uma ação motora aparentemente simples, é na verdade uma manifestação rica em particularidades do falante, desempenhando um papel crucial na integração e expressão da linguagem e constituindo-se como o veículo primordial da comunicação.

Ao articular uma simples frase acionamos, em fração de milésimos de segundos, cerca de 100 músculos, e, em concomitante, ocorre a atividade elétrica de milhões de neurônios para integrar, coordenar e executar os comandos necessários para transformar uma mensagem linguística abstrata em palavras (CHARTIER et al., 2018).

Assim, a fala espontânea se mostra como um processo complexo que envolve a organização de uma série de funções cognitivas tais como: atenção, memória, acesso lexical, planejamento e execução motora, além dos vários níveis de

processamento linguístico (KRAJEWSKI et al., 2009; PASTORIZA-DOMÍNGUEZ et al., 2022)

De acordo com Massini-Cagliari e Cagliari (2006, p.107), a produção da fala requer o planejamento verbal do que se deseja dizer e o envio de comandos neuromusculares para sua execução. Desta forma, o processo inicial é de natureza neurolinguística, o que significa associar as ideias aos sons que as representam e em ordem específica, obedecendo às regras da língua. O processo seguinte é o neuromuscular, que envolve o envio de comandos, pelo cérebro, para diversas partes do corpo preparando-o para verbalizar o que foi inicialmente planejado.

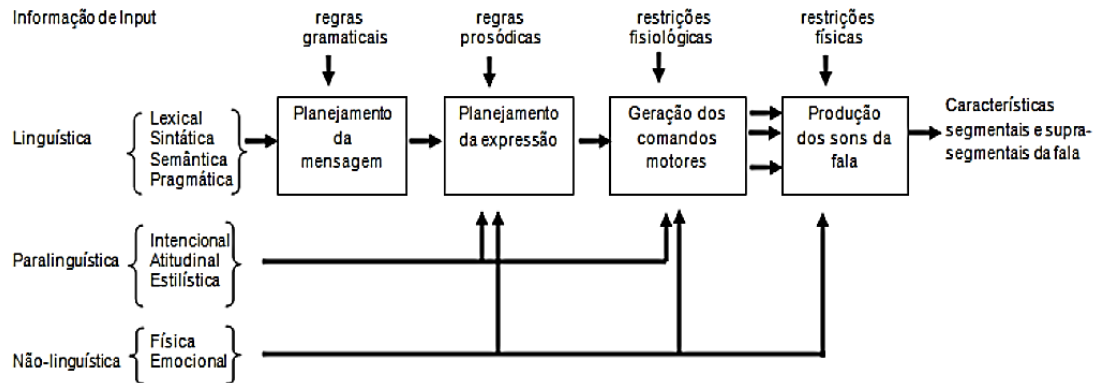
Em relação à organização da mensagem, Fujisaki (2004) sugere que podemos categorizar a informação em três domínios principais: linguístico, paralinguístico e não linguístico.

- 1. Domínio linguístico:** é a camada mais básica de comunicação, centrada no conteúdo que é transmitido por meio de símbolos e regras gramaticais de uma língua. É essencialmente a informação que poderia ser capturada por escrito.
- 2. Domínio paralinguístico:** além de transmitir o conteúdo linguístico, a fala permite uma camada adicional de nuance, a qual não pode ser transmitida pelo texto. A informação paralinguística refere-se a aspectos da comunicação que um falante adiciona intencionalmente para enriquecer ou modificar o conteúdo linguístico. Isso pode incluir intenção, atitude e estilo de fala, e destaca a diferença entre o que dizemos e como dizemos. Por exemplo, uma frase pode ser pronunciada com diferentes entonações para comunicar diferentes sentimentos ou intenções.
- 3. Domínio não linguístico:** trata-se de uma camada que diz mais sobre o falante do que sobre o conteúdo. Inclui informações como idade, gênero e estados físicos e emocionais e geralmente não podem ser controladas pelo falante (exceto, por exemplo, por atores que ajustam sua fala para desempenhar um papel).

Juntos, estes três domínios fornecem o contexto e conteúdo da mensagem a ser expressa. A Figura 4 mostra, de forma esquematizada, a atuação destes domínios no processo de organização da fala, que se dá em quatro etapas: planejamento da

mensagem, planejamento da expressão verbal, geração de comandos motores e produção sonora (FUJISAKI, 2004).

Figura 4 - Esquema de organização da mensagem falada



Fonte: FUJISAKI (2004).

A produção da fala, por sua vez, de acordo com Machado (2011), se constitui a partir de cinco parâmetros, a saber:

- 1. Respiração:** é a fonte de energia para uma fala eficaz, pois o controle do fluxo aéreo permite estruturar a frase, o ritmo e a intensidade vocal.
- 2. Fonação:** diz respeito à produção vocal, a qual já discutimos em mais detalhes na seção anterior.
- 3. Ressonância:** sistema em que as estruturas do aparelho fonador (laringe, faringe, cavidade nasal e oral) funcionam como caixas acústicas que moldam e amplificam o sinal vocal no espaço.
- 4. Articulação:** trata-se do movimento das estruturas responsáveis pela fala (lábios, língua, mandíbula, palato) resultando na pronúncia dos sons de uma língua.
- 5. Prosódia:** sistema amplo que possui diversas funções, engloba os aspectos rítmicos, de entonação, intenção e os parâmetros prosódico-acústicos (F0, duração e intensidade) de um enunciado.

Alguns parâmetros da prosódia são considerados recursos de fala de alto nível, devido à influência dos domínios linguísticos e sua interação com estes. Enquanto os

três domínios linguísticos fornecem o contexto e conteúdo caracterizando “o que se fala”, a prosódia ajuda a moldar e transmitir esse conteúdo de maneiras específicas caracterizando “o como se fala”. Exploraremos em mais detalhes os parâmetros prosódicos por serem objeto de estudo desta pesquisa.

2.2.3.1 Prosódia e organização temporal da fala

De acordo com Barbosa (2019), as funções e características prosódicas são expressas através da variação da Frequência Fundamental (F0), da intensidade e da duração dos segmentos de um enunciado.

A F0 é o correlato acústico da frequência de vibração das pregas vocais, medida em hertz (Hz), corresponde ao número de vezes que as pregas vocais oscilam em um segundo. Mudanças nessa frequência resultam na percepção de tons graves e agudos.

A intensidade refere-se ao volume da voz ou fala, expressa em decibéis (dB). Variações nessa intensidade ajudam a estabelecer foco, ênfase entre outros sentidos.

A duração refere-se ao tempo necessário para executar unidades linguísticas do enunciado, como fones, sílabas, palavras, etc. A análise da duração dos segmentos nos permite caracterizar uma fala como lenta ou rápida, com presença de pausas e outros elementos que influenciam na velocidade e fluência da fala. É medida em segundos ou milissegundos, dependendo da unidade analisada.

O tempo desempenha um papel fundamental na fala, influenciando como percebemos e produzimos palavras e frases. Ao estudar aspectos relacionados à duração, podemos entender melhor os processos linguísticos associados à estrutura da frase, articulação e à expressão de emoções. A análise temporal detalhada dos eventos associados à cada um destes processos nos ajuda a compreender a organização temporal do discurso (DUEZ, 2005).

Segundo Duez (2005), “a organização temporal da fala reflete os diferentes processos envolvidos na produção da fala, como pesquisa lexical, planejamento, estruturação sintática, ordenação das palavras, articulação e suas relações”. Desta forma, essa organização não só transmite o significado linguístico da mensagem, mas

também fornece informações extralinguísticas sobre o falante, como suas origens e condição de saúde.

Ao observamos um trecho de fala, percebemos uma alternância entre sequências de segmentos sonoros e silêncios. Os segmentos sonoros referem-se à produção de fonemas, sílabas, palavras e frases, enquanto os períodos de silêncios são conhecidos como pausas. Juntos, esses elementos determinam a cadência e fluência da fala (DUEZ, 2005).

A duração dos segmentos sonoros (vogais e consoantes), independentemente da língua, é sistematizada ao nível da sílaba e tem durações intrínsecas. Estas durações atribuem valores e pesos às sílabas e são importantes para a análise fonológica. Variações na duração das sílabas são considerados alongamentos ou encurtamento de segmentos e podem ter diversas funções dependendo da intenção do falante, como por exemplo imprimir ironia ou enfatizar uma palavra (CAGLIARI, 2012).

A pausa, longe de ser apenas um período de silêncio ou inatividade, é um componente complexo e sua função depende de sua distribuição ao longo do enunciado e da tarefa linguística em questão (DUEZ, 2005). Preliminarmente, a pausa tem uma função fisiológica importante: permitir ao falante respirar e reabastecer sua capacidade pneumofonoarticulatória. Denominada “pausa respiratória”, geralmente, este tipo de pausa, ocorre entre grupos tonais e de preferência no final de conjuntos de orações. Outra função é a de segmentação da fala, podendo ocorrer depois de frases, entre sintagmas, palavras e até entre sílabas (quando o objetivo é “silabar” para dar ênfase) (CAGLIARI, 2012).

Estes dois tipos de pausas são considerados adequados ao discurso por contribuírem para a fluência da fala e são comumente relatadas na literatura como “pausas silenciosas fluentes”. Merlo (2012) propôs a substituição deste termo “pausa fluente” por “pausa demarcativa”, tendo em vista que estas pausas sempre tem papel demarcativo e por considerar que o termo “pausa fluente” pode dar a falsa impressão de que apenas este tipo de pausa faz parte da fluência, descartando a relevância de pausas hesitativas e o fato de que pausas silenciosas nem sempre podem ser consideradas fluentes, conforme veremos adiante.

A análise do uso adequado de pausas demarcativas é feita com base em três critérios: o uso, conforme vimos anteriormente, pausas para respiração ou que seguem a estrutura sintática do discurso são consideradas fluentes; a duração, pausas prolongadas, mesmo em contextos adequados, podem ser interpretadas como hesitação; e frequência, mesmo que ocorram em pontos esperados, pausas em excesso interrompem o ritmo da fala e são consideradas como interrupções da fluência (MERLO, 2006).

Como vimos até aqui, além de permitir a respiração, a pausa fornece informações sobre o processamento cognitivo do falante. Desta forma, o falante faz pausas para respirar, buscar uma palavra, marcar um limite sintático, destacar uma palavra ou uma ideia. Pausas de curta duração estão associadas à respiração e articulação, enquanto pausas mais longas tendem a refletir processos internos e intensa atividade cognitiva (ANGELOPOULOU et al., 2018; DUEZ, 2005). De acordo com Merlo (2012), a produção de pausas demarcativas está associada a regiões cerebrais responsáveis pela recuperação de informações da memória declarativa, como o giro frontal inferior direito (região homóloga à área de Broca).

A interrupção do fluxo da fala com pausas “fora do esperado” representa um fenômeno conhecido como hesitação, revelando uma necessidade de reorganização do processamento da linguagem e tomada de tempo adicional para a decisão do falante sobre a verbalização da informação (CAGLIARI, 2012; MERLO, 2012).

Como mencionado anteriormente, nem sempre pausas silenciosas podem ser consideradas adequadas à fluência. Quando ocorrem em posições inesperadas do enunciado, como por exemplo no interior de sintagmas, ou quando, mesmo em posição adequada, apresentam durações excessivamente prolongadas podem ser consideradas pausas silenciosas hesitativas. Como acontece com as disfluências, as pausas silenciosas hesitativas interrompem o processo contínuo de compreensão do ouvinte, interrompem o fluxo temporal da fala e atrasam a cadência da fala (MACGREGOR; CORLEY; DONALDSON, 2010; MERLO, 2006).

Outro tipo de pausa considerada hesitativa são as chamadas pausas preenchidas ou preenchedores. No Português Brasileiro, este preenchimento é emitido com vogais semiabertas [e] ou [ã] ou pela consoante nasal [m], representados ortograficamente por “*eeh*”, “*ãn*”, “*huumm*” respectivamente. Ocorre

mais frequentemente no interior do enunciado e em suas fronteiras e geralmente indicam necessidade de busca lexical e dificuldade na codificação e organização do discurso (DUEZ, 2005).

Prolongamentos vocálicos, também chamados de alongamentos hesitativos, são um aumento na duração fônica (geralmente de vogais em final de palavras) sem função enfática ou de fronteira prosódica, que também representam hesitação (MERLO, 2012).

Outro tipo de interrupção no fluxo da fala são as disfluências, classificadas como repetições de fonemas, sílabas ou palavras, falsos começos, alongamentos vocálicos, omissões e acréscimos de sílabas, distorções de fonemas e erros articulatórios. Tais eventos linguísticos indicam uma necessidade de reformulação instantânea para resolver um problema na formulação verbal (DUEZ, 2005; MERLO, 2006). Destaca-se que as disfluências ainda são classificadas como comuns (não patológicas) ou gagas (patológica). A disfluência gaga é extensivamente abordada na literatura e não faz parte do escopo deste estudo. Consideramos as disfluências comuns, por fazerem parte da fala de todos os indivíduos (OLIVEIRA et al., 2007).

Todos os elementos abordados nesta seção contribuem e determinam a fluência da fala. A fluência da fala é dinâmica e varia em diferentes contextos interacionais. Embora as investigações tenham explorado fatores que influenciam a fluência, a determinação exata desses impactos permanece incerta. Notavelmente, fatores linguísticos, cognitivos, afetivos e genéticos são reconhecidos como influenciadores da fluência. Linguisticamente, narrativas são frequentemente menos fluentes do que descrições e leituras, e a fluência em uma língua materna supera aquela em uma segunda língua ou língua estrangeira. Do ponto de vista cognitivo, adultos geralmente exibem maior fluência do que crianças e idosos, e indivíduos com maior capacidade de memória operacional demonstram maior fluência do que aqueles com memória operacional limitada (LIMA; FRANÇOZO, 2011; MARTINS; ANDRADE, 2008; OLIVEIRA et al., 2007).

Segundo Merlo (2006), a fluência, embora influenciada pelo conhecimento linguístico, pode ser considerada uma habilidade estreitamente associada à memória operacional. Como habilidade, é adquirida e aprimorada gradualmente com a prática, e envolve o desenvolvimento de mecanismos linguísticos automáticos e

subconscientes que, ao serem otimizados, reduzem a demanda de processamento cognitivo.

A fala espontânea está sujeita a todos estes eventos linguísticos, tendo o locutor um distúrbio de comunicação ou não, uma vez que a fluência total só é vista em leituras ou em falas ensaiadas e decoradas, em que os enunciados estão cristalizados e automatizados (MERLO, 2006).

Observando todos estes componentes da organização temporal do discurso, a produção da fala espontânea pode ser medida, determinando o ritmo com que um falante produz seus enunciados por meio da taxa de elocução (ou taxa de fala) e taxa de articulação.

Na literatura, “taxa de elocução” e “velocidade de fala” são termos usados como sinônimos para descrever o ritmo da fala. No entanto, de acordo com Barbosa (2019), é equivocada a ideia de que a fala mais rápida implica em articuladores se movendo mais velozmente. O que geralmente ocorre não é uma articulação mais ou menos veloz, mas uma menor ou maior sobreposição de gestos articulatórios, ajustes que tornam possível caber mais unidades num determinado intervalo de tempo.

Ainda segundo o autor, a média de taxa de elocução é a produção de 4 a 6 sílabas por segundo, no entanto, esse número pode variar devido a diversos aspectos, tais como: estilo de elocução (leitura, locução, narrativa, entre outros), grau de formalidade da produção, idade, escolaridade, gênero do falante, entre outros. Por isso, o termo “taxa de elocução” é mais apropriado por, justamente, evitar associar velocidade de fala à produção mais lenta ou rápida dos articuladores.

A taxa de elocução, portanto, refere-se ao número de unidades linguísticas produzidas por unidade de tempo. Nesta taxa consideram-se todas as unidades linguísticas e não linguísticas, ou seja, segmentos sonoros e pausas. Pode ser expressa em palavras por minuto ou sílabas por segundo. Como diferentes línguas apresentam extensão de palavras distintas, é recomendada a utilização da unidade sílabas por segundo (BARBOSA, 2019).

A taxa de articulação, por sua vez, refere-se ao número de unidades linguísticas (apenas) por unidade de tempo gasto na produção destas, ou seja, desta taxa exclui-se o tempo relacionado a pausas e interrupções na fala. Assim, essa taxa reflete o

tempo gasto pelos articuladores para a execução motora das unidades linguísticas. Se um trecho de fala fosse produzido sem nenhuma pausa, taxa de elocução e de articulação teriam o mesmo valor (BARBOSA, 2019).

A variação da taxa de elocução pode ser influenciada pela carga cognitiva, relacionada ao processamento verbal. A carga cognitiva representa o grau de esforço empregado pelo falante na seleção de palavras durante o discurso. Em contextos de fala espontânea, o falante frequentemente confronta múltiplas tarefas que surgem de forma inesperada e cujas demandas cognitivas não são imediatamente claras. Assim, é compreensível que a taxa de elocução, nestes contextos, apresente considerável variabilidade (BERTHOLD; JAMESON, 1999; WANG; NARAYANAN, 2007).

A análise das propriedades temporais da fala tem se mostrado sensível e fornecido informações confiáveis sobre danos no sistema nervoso central, pois geralmente apresenta mudanças em função de uma diversidade de distúrbios, tais como déficits cognitivos, doenças neurodegenerativas musculares, lesão cerebral entre outros, sendo, inclusive, amplamente aceita e sugerida como biomarcador confiável para detecção precoce de declínio cognitivo na doença de Alzheimer (ANGELOPOULOU et al., 2018; BELTRAMI et al., 2018; DUEZ, 2005; MACHADO, 2011; MÜLLER et al., 2001; PASTORIZA-DOMÍNGUEZ et al., 2022; PISTONO et al., 2016; POTAGAS et al., 2022).

Vimos, portanto, que a análise dos parâmetros temporais da fala não apenas permite uma melhor compreensão da linguagem, como também serve como um potencial indicador de irregularidades e disfunções da produção verbal. Através de medidas simples, como frequência e duração de pausas, entonação e disfluências, é possível obter informações diretamente do sinal de fala sem a necessidade de tecnologias muito avançadas. A análise da quantidade, duração e frequência das pausas também pode revelar diferenças individuais no desempenho cognitivo. Além disso, o tempo de resposta ou a latência na fala são indicadores sensíveis de possíveis comprometimentos cognitivos (WOLTERS et al., 2016).

2.3 IMPLICAÇÕES DA FADIGA E SONOLÊNCIA NA FALA E NA LINGUAGEM

Conforme bem revisado e discutido por Shen, Barbera e Shapiro (2006), a diferenciação entre fadiga e sonolência, apesar das diversas ferramentas e escalas desenvolvidas, ainda é imprecisa. Ambos não são simplesmente fenômenos isolados, mas sim complexos e multifacetados. Em cenários de privação de sono, é comum que a sonolência e a fadiga ocorram simultaneamente, levando os indivíduos a descreverem ambos os estados genericamente como sensação de "cansaço".

Na análise dos aspectos temporais da fala, esta coexistência torna ainda mais desafiador discernir claramente entre os dois estados, já que os impactos de ambos sobre a fala seriam similares. Vogel et al. (2010) por exemplo, atribuíram mudanças observadas na produção acústica da fala como consequência do aumento nos níveis de fadiga, sendo este estado induzido por um período de vigília sustentada. Portanto, quando nos referimos à condição do indivíduo após um dia de trabalho, muitas vezes usamos os dois termos, "fadiga" e "sonolência", refletindo a complexidade em separar seus efeitos na comunicação oral.

Os estudos que investigaram os efeitos da fadiga na fala indicam que à medida que os níveis de fadiga aumentam, diversos componentes prosódicos sofrem alterações. Entre esses componentes, observam-se mudanças no tom da fala, na sua velocidade e na energia espectral. Uma manifestação muito clara da fadiga seria a diminuição da entonação, resultando em vozes que podem ser descritas como "monotônicas" ou "achatadas". (HARRISON; HORNE, 1997; VOGEL; FLETCHER; MARUFF, 2010).

Períodos prolongados de carga cognitiva intensa sem pausa adequada podem levar ao estado de fadiga mental. A carga cognitiva refere-se à demanda imposta ao sistema cognitivo durante a realização de uma tarefa. Nossa estrutura cognitiva possui uma memória de trabalho limitada para processar informações visuais e auditivas, coordenada por um sistema executivo central que interage com a memória de longo prazo. Esta última guarda esquemas cognitivos úteis para a execução das atividades. Quando sobrecarregada, a memória de trabalho pode ser impactada, afetando o desempenho na tarefa em questão (MONTACIE; CARATY, 2014).

Berthold e Jameson (2001), fizeram uma revisão em busca de evidências sobre os efeitos da carga cognitiva na fala e elaboraram um quadro com os sinais potenciais, conforme demonstrado na figura abaixo:

Figura 5 - Resumo de resultados anteriores sobre potenciais sinais de carga cognitiva na fala

Sintomas que envolvem a qualidade da produção			Sintomas que envolvem taxa de produção		
Recurso	Tendência ^a	Registros ^b	Recurso	Tendência	Registros
Fragmentos de frases (número)	+	4/5	Taxa de articulação	-	7/7
Falsos começos (número)	+	2/4	Taxa de fala	-	7/7
Erros de sintaxe (número)	+	1/1	Latencia de início (duração)	+	9/11
Auto-reparações (número) ^c	+, -	2, 1, 4	Pausas silenciosas (número)	+	4/5
			Pausas silenciosas (duração)	+	8/10
			Pausas preenchidas (número)	+	4/6
			Pausas preenchidas (duração)	+	1/2
			Repetições (número)	+	5/6

^a "+" significa que, em geral, a medida aumentou em condições de elevada carga cognitiva; "-" significa o contrário

^b "m/n" significa que de "n" estudos relevantes, "m" encontraram a tendência indicada. (Na maioria, mas não em todos os casos, a tendência foi estatisticamente significativa.)

^c Os resultados relativos à Auto-reparações mostram um padrão incoerente.

Fonte: Adaptado de Berthold e Jameson (2001)

Variáveis como taxa de elocução, taxa de articulação, proporção e duração de pausas, além de latência de início de fala são eventos de fala de alto nível sensíveis à fadiga cognitiva e podem ser potencialmente usados na identificação de nível de carga cognitiva (MONTACIE; CARATY, 2014).

Müller et al. (2001) identificaram mudanças significativas em parâmetros da organização temporal da fala de indivíduos submetidos a testes que envolvem pressão do tempo e tarefa de navegação. Entre as alterações observadas, houve um aumento de disfluências e de pausas preenchidas, acompanhado de uma diminuição na qualidade da fala. Segundo os pesquisadores, as pausas preenchidas podem servir como um indicador simples de distração devido a uma tarefa secundária. Adicionalmente, a observação dessas variáveis na fala de uma pessoa fornece insights sobre as limitações em seus recursos cognitivos no momento em questão.

Harrison e Horne (1997) exploraram os efeitos da privação de sono na fluência verbal e observaram consequências notáveis na produção da fala. Após uma única noite sem dormir, houve uma redução significativa na fluência das palavras, um achado que se alinha com pesquisas anteriores sobre o tema. Os efeitos foram ainda

mais intrigantes após 36 horas de privação de sono: as palavras eram frequentemente articuladas em sequências rápidas, ou "cadeias", intercaladas por extensos períodos de silêncio (pausas). Os autores sugerem que a falta de sono pode induzir um padrão de pensamento mais rígido. Assim, quando uma categoria semântica é ativada na memória, os indivíduos enfrentam desafios em desviar sua atenção para informações não relacionadas. Essa rigidez cognitiva pode, por sua vez, comprometer a clareza da expressão verbal, dada a alteração na disponibilidade de palavras e nas pistas mnemônicas.

Em um estudo conduzido por Kim et al. (2009), foi explorada a influência da privação de sono na capacidade de fala expressiva dos indivíduos. A escala de fala expressiva, utilizada na pesquisa, avalia a habilidade de um indivíduo em reproduzir fonemas e palavras simples, abrangendo desde fala automática até tipos de fala mais elaboradas. Os resultados revelaram que, após períodos de privação de sono, os participantes apresentaram falhas significativas em tarefas que avaliavam sua fluência verbal. Notavelmente, tarefas que exigiam a conclusão de frases complexas em um determinado tempo frequentemente não eram atendidas, indicando uma deficiência no tempo de reação. Embora a fala expressiva esteja tradicionalmente associada ao hemisfério esquerdo do cérebro, o estudo sugere que falhas recorrentes na fala espontânea podem indicar uma possível disfunção no hemisfério direito. Este achado ressalta a complexidade das funções cerebrais envolvidas na fala e como a privação de sono pode afetar essas capacidades.

No contexto da aviação, especificamente, encontra-se na literatura um corpo maior de evidências demonstrando o impacto da fadiga e privação de sono em parâmetros acústicos extraídos do sinal vocal, conforme abordamos na seção "Voz", enquanto em medidas temporais da fala os estudos ainda são escassos.

Em estudo conduzido por Vasconcelos et al. (2019), a análise detalhada dos registros de fala de um acidente aéreo fatal indicou que a fadiga e sonolência foram fatores contribuintes para o acidente e medidas da organização temporal da fala foram utilizadas como método para identificação dos sinais indicativos de fadiga, confirmando a robustez do método proposto.

3 MÉTODOS

A pesquisa em questão consiste em um estudo de natureza analítica, observacional, transversal e retrospectiva, composto de amostragem por conveniência. Aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais (COEP/UFMG) sob o CAAE: 58783822.4.0000.5149 e parecer nº 5.596.616 em 22 de agosto de 2022.

A amostra foi composta por um banco de dados de 25 pilotos de aeronaves, neurologicamente saudáveis, e falantes do português brasileiro. Tal banco de dados foi obtido por meio de coleta de dados realizada em 2017, por meio do estudo de Vasconcelos (2019), o qual também obteve aprovação ética para sua realização. Todos os participantes foram devidamente informados sobre os objetivos do estudo e deram seu consentimento voluntário e esclarecido ao assinar o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

O banco de dados era composto pelos registros das escalas psicométricas, questionário da pesquisa e gravações de fala espontânea de 25 pilotos de aeronaves, dos quais 10 foram analisados por Vasconcelos (2019) em seu estudo, e reanalisados nesta pesquisa.

Os registros dos dados foram feitos pelo próprio participante, após receberem as orientações e o protocolo de coleta impresso ou em formato eletrônico. O protocolo incluiu orientações para gravação das amostras de fala, questionário da pesquisa, no qual o participante informou o histórico do sono e outros dados gerais, escalas psicométricas de fadiga e sonolência e TCLE.

Os participantes foram instruídos a responderem às escalas e questionário e realizarem a gravação de amostras de fala em 2 momentos:

- 1) Em um dia de folga, no qual estivesse se sentindo descansado e sem queixa de fadiga ou sonolência. Neste dia, a pontuação nas escalas de Fadiga e Sonolência não deveria exceder 3 pontos (valor associado a um bom nível de alerta e ausência de cansaço nessas escalas). Esta gravação foi utilizada como amostra padrão.

- 2) Em um dia de trabalho, no qual estivesse se sentindo cansado/sonolento. Neste dia, os participantes responderam às escalas psicométricas e gravaram a fala em 3 períodos: 1h, 8h e 16h após terem acordado.

Utilizamos, nesta pesquisa, duas escalas psicométricas para avaliar o nível de fadiga e sonolência dos participantes, a Escala de Sonolência de Karolinska (*Karolinska Sleepiness Scale – KSS*) e a escala de fadiga de Samn-Perelli (*Samn Perelli Fatigue Scale – SPFS*) (ÅKERSTEDT; GILLBERG, 1990; SAMN; PERELLI, 1982). Ambas medem o estado autorreferente do indivíduo no momento da aplicação.

A primeira, KSS, foi adaptada para o português por Teixeira et al., (2007), e abrange níveis de alerta/sonolência que variam de 1 a 9, onde 1 representa 'extremamente alerta' e 9 corresponde à 'extremamente sonolento, lutando contra o sono'. A segunda escala, SPFS, adaptada para o português por Vasconcelos (2019), sugere uma relação entre os níveis da escala com a capacidade operacional do indivíduo, variando de 1 a 7. Pontuações de 1 a 3 denotam um nível satisfatório de alerta; 4 indica fadiga leve com possível comprometimento do desempenho, mas não significativo; 5-6 apontam para fadiga moderada a grave com comprometimento do desempenho e operação em serviço não recomendada; e 7 representa fadiga severa, completamente exausto, incapaz de trabalhar efetivamente.

No questionário da pesquisa, além de informações gerais como idade, sexo, escolaridade, e outras informações inerentes à atividade laboral, os participantes também registraram seu histórico de sono com data, horários de início e término do sono e a qualidade percebida (excelente, bom, regular ou ruim) das 3 últimas oportunidades de sono. O histórico do sono foi utilizado para alimentar o *software* SAFTE-FAST e realizar os cálculos de predição de fadiga, extraindo dados de efetividade e reservatório de sono dos participantes.

No que se refere à gravação das amostras de fala, os participantes foram instruídos a gravar, por meio do gravador nativo de seu celular, um relato espontâneo de 1 a 2 minutos sobre sua rotina, mantendo o aparelho a uma distância de, aproximadamente, 10 cm da boca, de preferência em um ambiente silencioso, além de registrarem no questionário a marca e modelo do aparelho utilizado.

Após a conclusão das gravações e registros no protocolo de coleta, os participantes enviaram os arquivos digitais diretamente aos pesquisadores por e-mails

para análise subsequente. Os dados foram armazenados em banco de dados próprio dos pesquisadores, garantindo a preservação da identidade dos participantes, proteção e sigilo dos dados. Esses dados foram acessados, após a autorização do pesquisador responsável, para análise nesta pesquisa.

É importante destacar que, apesar de os participantes terem realizado a coleta em 3 períodos no dia de trabalho, nesta pesquisa, apenas a última coleta deste dia foi analisada, ou seja, a gravação de fala e escalas psicométricas registradas 16 horas após terem acordado, período em que os escores das escalas e variações na fala/linguagem foram mais expressivos.

3.1 ANÁLISE ACÚSTICA DA FALA

As amostras de fala espontânea foram analisadas de forma acústica e segmentada por meio do *software* PRAAT®, versão 6.1.16 (BOERSMA; WEENINK, 2023), seguindo-se o roteiro e parâmetros a seguir, propostos por Vasconcelos et al. (2019):

- I. Inicialmente, os arquivos de áudio foram convertidos para o formato *.wav* para que fosse possível a análise no referido *software*;
- II. O conteúdo da gravação de fala foi transcrito manualmente, adotando-se o método de transcrição fonética, ou seja, transcrevendo-se o que foi de fato pronunciado pelo indivíduo;
- III. Selecionando-se o arquivo de áudio e o arquivo de texto com a transcrição da fala, foi executado um *script* automático para segmentação e anotação da fala em camadas de *TextGrid*, segmentando a fala em níveis de enunciados, palavras, sílabas e fonemas. O *script* automático utilizado foi o *EasyAlign*, uma ferramenta que realiza o alinhamento automático de segmentos de fala espontânea dentro do Praat (GOLDMAN, 2011). Apesar desta ferramenta apresentar uma acurácia de segmentação excelente, mostrando pouca diferença entre o alinhamento automático e humano, foi necessária uma etapa manual secundária para inspeção e ajustes de alguns segmentos e correção de limites de fronteiras, detalhada a seguir.

A fim de minimizar as dificuldades e diferenças encontradas na definição de segmentos, delimitação de fronteiras prosódicas e devido à alta variabilidade presente no sinal de fala até mesmo quando se compara o mesmo sujeito, foram adotados os seguintes critérios de segmentação:

1. A segmentação a nível silábico foi baseada no método fonético, que considera uma sílaba sendo a unidade de vogal a vogal, ou seja, a sílaba começa no marco acústico de uma vogal e vai até o marco acústico da próxima vogal no núcleo silábico seguinte (BARBOSA, 2019).
2. Para marcação e delimitação de pausas foram adotados os parâmetros propostos por Merlo e Barbosa (2012), com adaptações referentes à duração, a saber:
 - a. Pausa silenciosa demarcativa (fluente): silêncio entre sintagmas com mudança no movimento da curva de F0 antes e depois da pausa, com duração mínima de 200ms;
 - b. Pausa hesitativa silenciosa:
 - i. No interior de sintagmas: duração maior que 250ms, sem mudança no movimento de F0 antes e depois da pausa;
 - ii. Entre sintagmas: duração maior que 2 segundos, sem indícios de processos fisiológicos como tosse, espirro, riso ou outro motivo que justificasse a interrupção da fala;
 - c. Pausa hesitativa preenchida: interrupções no enunciado que, no português brasileiro, são preenchidos com prolongamentos de vogais e transcritos ortograficamente como “*eeh*”, “*ãn*”, “*huum...*”;
 - d. Pausa articulatória: interrupções com duração menor que 200ms dentro de sintagmas. São consideradas interrupções necessárias para articulação e remodelação do trato vocal, que precedem oclusivas, principalmente. Não foram consideradas na contagem de pausas.
3. Prolongamentos vocálicos sem função de ênfase, distorções de fonemas, erros articulatórios, repetições de segmentos, autocorreções e omissões foram considerados disfluências e foram marcados e contabilizados como sílabas disfluentes.

Além destes parâmetros e critérios adotados, concomitantemente, foi aplicada uma avaliação perceptivo-auditiva qualitativa complementar dos parâmetros de voz,

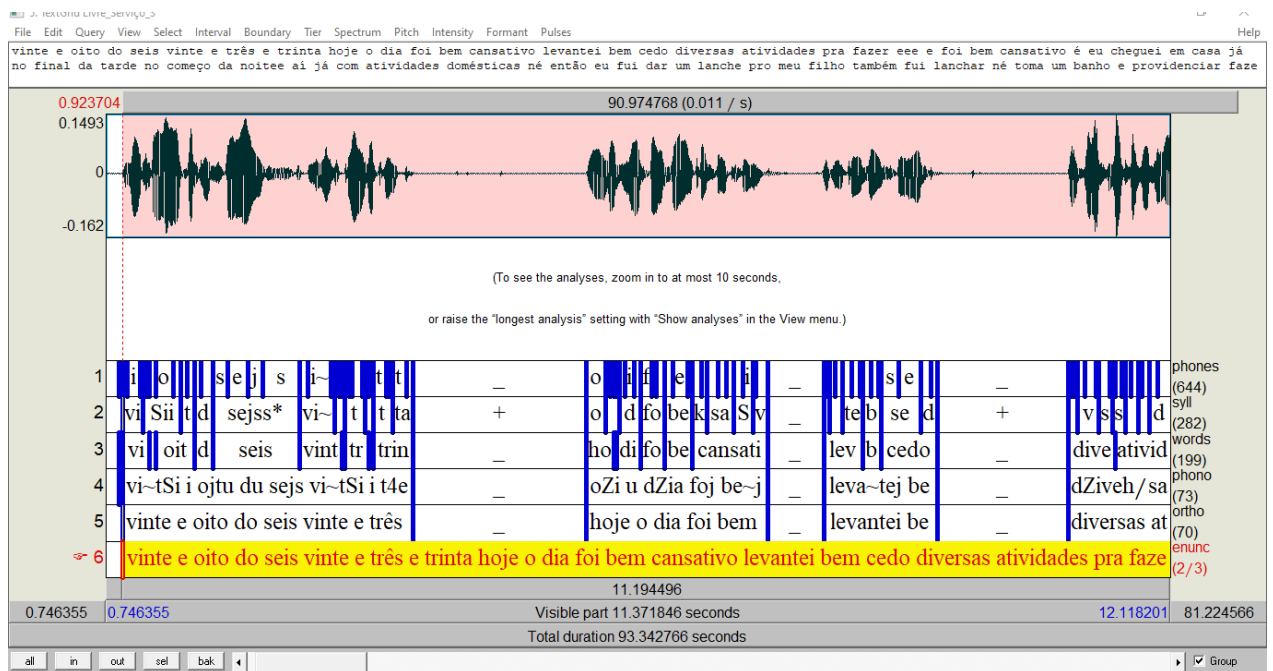
fala e linguagem que possibilitaram uma melhor classificação dos segmentos de fala e eventos linguísticos. Esta avaliação se deu por meio da análise de atos comunicativos de nível paralinguístico (variações na qualidade vocal e hesitações), não-linguístico (bocejo, inspirações prolongadas, incoordenação pneumofonoarticulatória) e do nível cognitivo de atenção expresso pelo indivíduo por meio da coerência entre os enunciados, autocorreções, demora no acesso lexical ou no resgate de informações.

Como o objetivo do estudo foi a análise acústica da fala espontânea, principalmente dos parâmetros prosódicos temporais, a análise de parâmetros vocais como a F0 e outros aspectos não foi realizada, uma vez que a extração de tais medidas requer a gravação de sinais em alta qualidade e com baixa ou nenhuma interferência de ruídos. Além disso, objetivou-se a análise de gravações de fala rotineiras, não dependente de ambiente controlado para que, de fato, fosse possível verificar a aplicação prática do método.

A etapa secundária de ajustes manuais, refinamento da segmentação automática de fala e marcação de eventos linguísticos, foi realizada por 2 pesquisadores em 40% da amostra.

À título de exemplo, apresentamos a figura abaixo com a interface do software PRAAT, as camadas de *TextGrid* com a segmentação do enunciado a nível ortográfico, fonético, em palavras, sílabas e fonemas e algumas marcações de eventos linguísticos (símbolo + : pausas hesitativas; símbolo *: disfluências).

Figura 6 - Interface do software de análise acústica da fala (PRAAT)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

IV. Após a etapa de segmentação e marcação de eventos linguísticos, foi executado um segundo *script*, desenvolvido por Vasconcelos (2019) e cedidos para o desenvolvimento dessa pesquisa, para extração automática das medidas temporais de fala a seguir:

1. **Taxa de Elocução (TE):** retrata o número de unidades linguísticas produzidas por intervalo de tempo. É obtida pela divisão do número de sílabas (todas) pelo tempo total da fala.
2. **Taxa de Articulação (TA):** também expressa em sílabas/segundo, retrata o tempo gasto pelos articuladores para a produção da fala. É obtida pela divisão do número de sílabas fluentes produzidas pelo tempo total da fala efetivamente articulado, ou seja, excluindo-se tempo de pausas e disfluências.
3. **Taxa Total de Pausas:** refere-se a qualquer interrupção da fala. Obtida pela divisão do número total de pausas pelo tempo total da fala.
4. **Taxa de Pausas Demarcativas:** número de pausas com função demarcativa dividido pelo tempo total da fala. Ressalta-se que quando o indivíduo fazia uma pausa silenciosa com indícios de hesitação, esta pausa era marcada e contabilizada como uma pausa hesitativa

silenciosa, pois, conforme abordamos na seção de organização temporal da fala, esta representa um fenômeno hesitativo.

5. **Taxa de Pausas Hesitativas (preenchidas):** número de pausas hesitativas preenchidas com “*éeh, ãn, huum...*” dividido pelo tempo total da fala.
6. **Taxa de Pausas Hesitativas (silenciosas):** subtração da taxa de pausa hesitativa do tipo preenchida da taxa de Hesitação e Disfluências.
7. **Taxa de Hesitação e Disfluências:** Taxa total de pausas excluindo-se a taxa de pausas demarcativas (fluentes).
8. **Porcentagem de Disfluência da fala:** divisão do número de hesitações/disfluências pelo número de sílabas fluentes, multiplicado por 100.
9. **Porcentagem de Pausas na fala:** divisão do tempo total de todas as pausas (demarcativas e hesitativas/disfluentes) pelo tempo total da fala; multiplicado por 100.
10. **Duração média das Pausas:** divisão do tempo de todas as pausas pelo número de pausas.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados extraídos da análise acústica da fala, bem como os registros das escalas psicométricas e o histórico do sono reportado no questionário de coleta foram tabulados em planilhas no *software* Excel 2019 e submetidos à análise estatística por meio do *software IBM SPSS Statistics* (versão 21.0).

A análise estatística das medidas de fala, bem como das escalas psicométricas e parâmetros gerados pelo *software* SAFTE-FAST teve como objetivo verificar diferenças intrasujeitos comparando-se dia de folga e dia de trabalho, por meio do Teste *t* de medidas pareadas quando a variável atendeu aos critérios de normalidade dos dados, e por meio do teste de Wilcoxon, quando o critério de normalidade foi violado (GUIMARÃES, 2018; VIEIRA, 2008).

Os dados que mostraram distribuição normal são apresentados com média e desvio padrão, enquanto os que mostraram distribuição não normal são apresentados com mediana e quartis.

Para investigar relações entre os métodos estudados utilizou-se o teste de Correlação de *Spearman* e análise de regressão linear. O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$).

A partir das análises univariadas, foram selecionadas para a regressão linear múltipla, todas as variáveis com valor-p inferior a 0,2. O modelo final identificado nesse trabalho apresenta apenas as variáveis com valor-p inferior a 0,05.

4 RESULTADOS

Os dados apresentados a seguir mostram as variações em diversos aspectos da fala de uma amostra composta por 25 pilotos de aeronaves, dos quais 23 (92%) eram do sexo masculino, com idade média de 34 anos (Desvio Padrão: 3,96; mínimo 27; máximo 43 anos).

Um resumo dos dados obtidos por meio da análise acústica da fala, das análises das escalas psicométricas e do modelo biomatemático SAFTE-FAST está sumarizado na Tabela 1. Das 10 variáveis de fala analisadas, 8 apresentaram variações estatisticamente significativas.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas da análise acústica da fala, escalas psicométricas e parâmetros do SAFTE-FAST

Variável	N	Média (DesvPad)		Valor p
		FOLGA	TRABALHO	
[1] Taxa de Elocução (sílabas/seg.)	25	3,34 (0,61)	2,89 (0,57)	< 0,001
[2] Taxa de Articulação (sílabas/seg.)	25	5,86 (0,73)	5,78 (0,82)	0,445
[3] Taxa Total de Pausas (pausas/seg.)	25	0,73 (0,16)	0,88 (0,33)	0,007
[4] Taxa Pausas Demarcativas (pausas/seg.)	25	0,21 (0,08)	0,12 (0,07)	< 0,001
[5] Taxa Pausas Hesitativas - Preenchida (pausas/seg.)	25	0,34 (0,17)	0,50 (0,31)	0,002
[6] Taxa Pausas Hesitativas - Silenciosa (pausas/seg.)	25	0,18 (0,06)	0,26 (0,09)	< 0,001
[7] Taxa Hesitação e Disfluências (eventos/seg.)	25	0,52 (0,20)	0,76 (0,37)	0,001
[8] Disfluência da Fala (%)	25	15,96 (6,9)	27,53 (14,98)	< 0,001
[9] Pausas na Fala (%)	25	43,19 (7,15)	49,6 (9,38)	0,001
[9.1] Pausas Demarcativas (%)	25	17,3 (6,05)	10,85 (6,51)	< 0,001
[9.2] Pausas Hesitativas (%)	25	25,89 (9,43)	38,75 (14,2)	< 0,001
[10] Duração Média das Pausas (seg.)	25	0,58 (0,49 - 0,72)*	0,59 (0,43 - 0,72)*	0,925**
Karolinska (KSS) (escala de 1 a 9)	25	3 (2 - 4)*	5 (5 - 7)*	< 0,001**
Samn-Perelli (SP) (escala de 1 a 7)	25	2 (1 - 3)*	4 (4 - 5)*	< 0,001**
SAFTE-FAST - Efetividade (%)	24	93,6 (90,92 - 96,97)*	85,5 (83,87 - 89,27)*	< 0,001**
SAFTE-FAST - Reservatório de Sono (%)	24	93,15 (90,37 - 96,9)*	75,75 (74,22 - 78,6)*	< 0,001**

* Valores apresentados com mediana (Q1-Q3).

** Variáveis em que foi utilizado teste Wilcoxon. Nas demais variáveis foi utilizado teste t pareado.

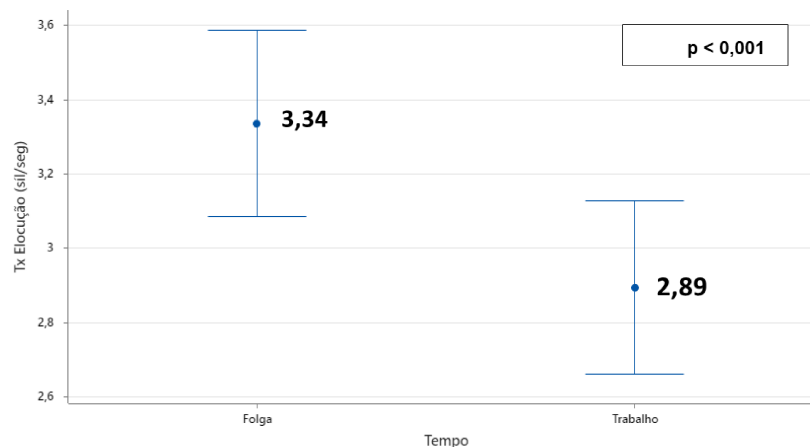
4.1 MEDIDAS DE ORGANIZAÇÃO TEMPORAL DA FALA

Por meio da análise acústica da fala observamos que as variações encontradas na comparação entre dia de folga e trabalho refletem como o estado de fadiga central e/ou sonolência pode influenciar aspectos da fala, principalmente sua organização temporal. Apresentamos a seguir, os resultados de cada aspecto analisado.

Taxa de Elocução (TE)

Observamos que, em média, a Taxa de Elocução no dia de Trabalho (média (μ) = 2,89, desvio padrão (σ) = 0,57) foi significativamente menor que a Taxa de Elocução no dia de Folga (μ = 3,33, σ = 0,61), $t(24) = 4,11$, $p < 0,001$). Por meio do Gráfico 1 é possível observar a diferença desta taxa em dia de trabalho (quando houve relato de fadiga) e em dia de folga.

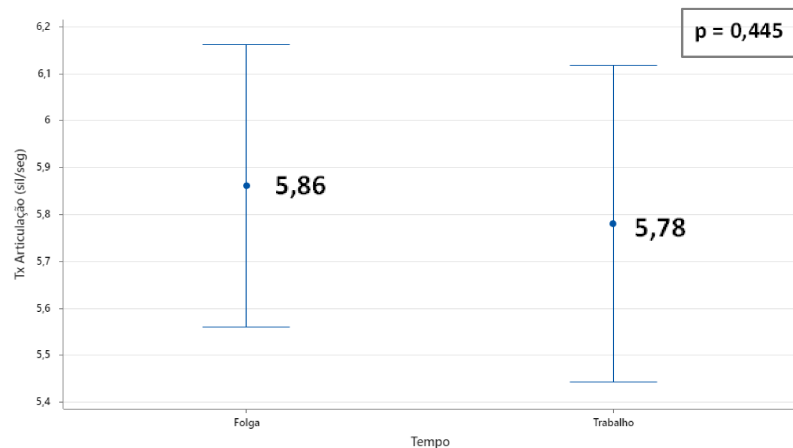
Gráfico 1 - Taxa de Elocução em dia de folga e trabalho



Taxa de Articulação (TA)

Em nossos resultados, a análise desta taxa não revelou diferenças significativas entre o dia em que havia queixa de fadiga (trabalho) comparado ao dia em que os pilotos estavam se sentindo descansados (folga).

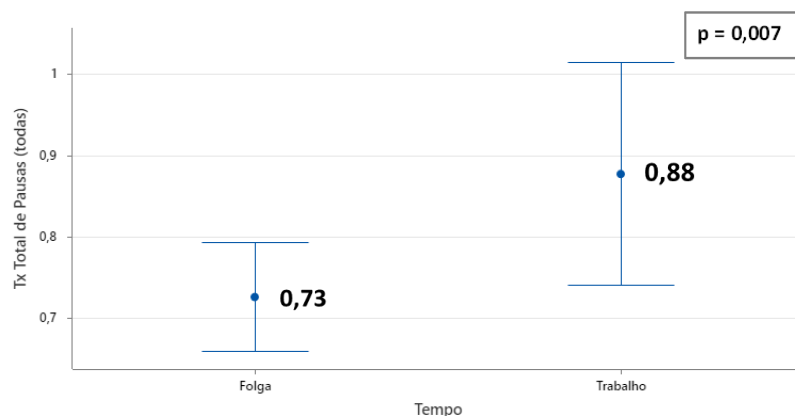
Gráfico 2 - Taxa de Articulação em dia de folga e trabalho



Taxa Total de Pausas

Os dados indicam que a Taxa Total de Pausas aumentou no dia de trabalho. É possível observar que no dia em que havia queixa de fadiga, os pilotos fizeram mais interrupções (aproximadamente 0,87 pausas/segundo) no discurso em comparação ao dia em que se sentiam descansados.

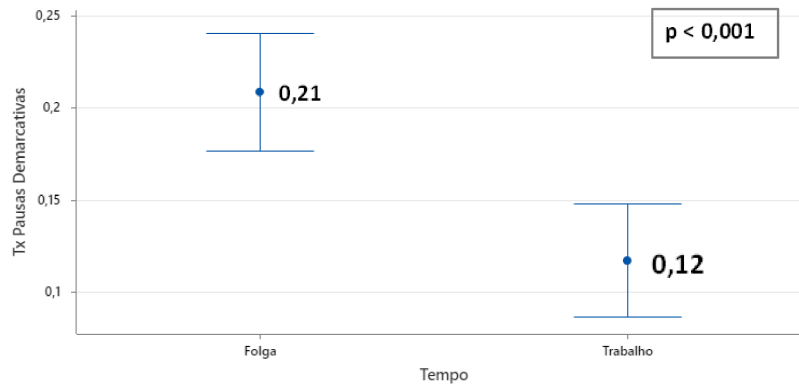
Gráfico 3 - Taxa Total de Pausas na fala em dia de folga e trabalho



Taxa de Pausas Demarcativas

O Gráfico 4 apresenta o resultado da comparação da Taxa de Pausas Demarcativas no dia de folga e dia de trabalho. É possível observar uma considerável redução no uso deste tipo de pausa no dia em que havia queixa de fadiga.

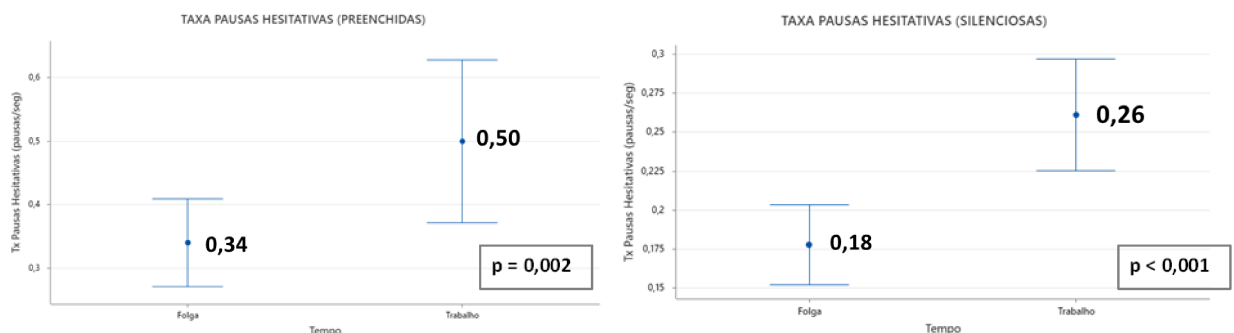
Gráfico 4 - Taxa de Pausas Demarcativas na fala em dia de folga e trabalho



Taxa de Pausas Hesitativas (preenchidas e silenciosas)

A taxa de pausas hesitativas foi analisada de forma mais detalhada, dividindo-a em pausas hesitativas do tipo silenciosas e pausas hesitativas do tipo preenchidas, para compreender qual o tipo mais predominante na fala espontânea. Ambas aumentaram no dia de trabalho, no entanto, o uso de hesitação do tipo preenchida ($\mu = 0,49$, $\sigma = 0,31$) foi superior ao uso de hesitação do tipo silenciosa ($\mu = 0,26$, $\sigma = 0,09$), conforme demonstrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Taxa de Pausas Hesitativas (preenchidas e silenciosas)

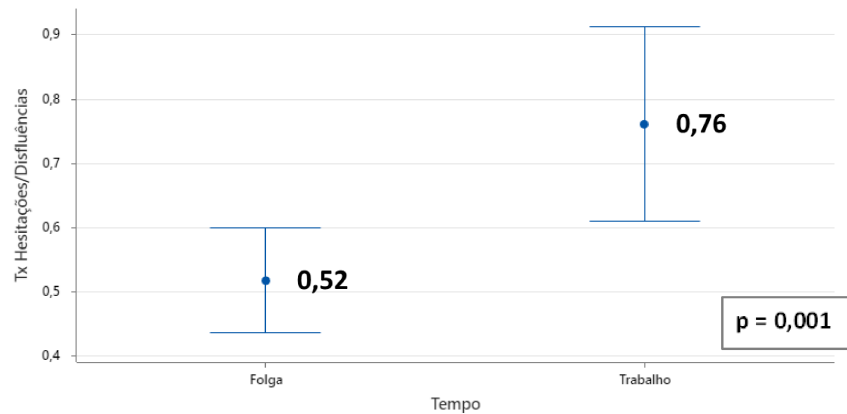


Taxa de Hesitação e Disfluências

No Gráfico 6 verifica-se que no dia de trabalho a Taxa de Hesitação e Disfluências aumentou para 0,76, enquanto no dia de folga esteve em torno de 0,51. O aumento desta taxa no dia de trabalho sugere que indivíduos fatigados apresentam

um discurso mais hesitativo e com mais disfluências comparado à quando estão descansados.

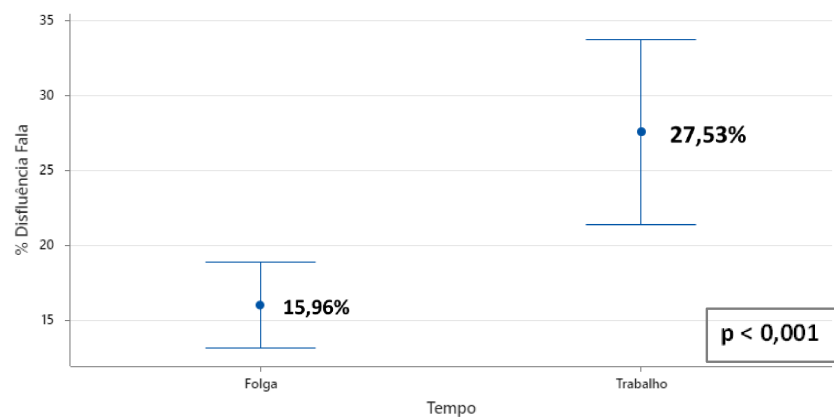
Gráfico 6 - Taxa de Hesitação e Disfluências na fala em dia de folga e de trabalho.



Porcentagem de Disfluência da Fala

A Porcentagem de Disfluência da fala no dia de Trabalho ($\mu = 27,53$, $\sigma = 14,98$) aumentou significativamente, em comparação ao dia de Folga ($\mu = 15,96$, $\sigma = 6,9$), $t(24) = -4,37$, $p < 0,001$. Os dados indicam que esta variável quase dobrou no dia de trabalho, evidenciando que a fluência da fala é significativamente comprometida em situações de fadiga/sonolência.

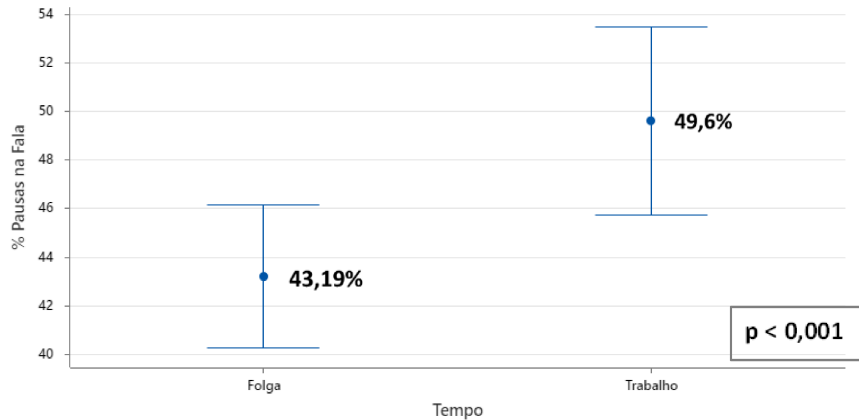
Gráfico 7 - Porcentagem de Disfluência da Fala em dia de folga e trabalho



Porcentagem de Pausas na Fala

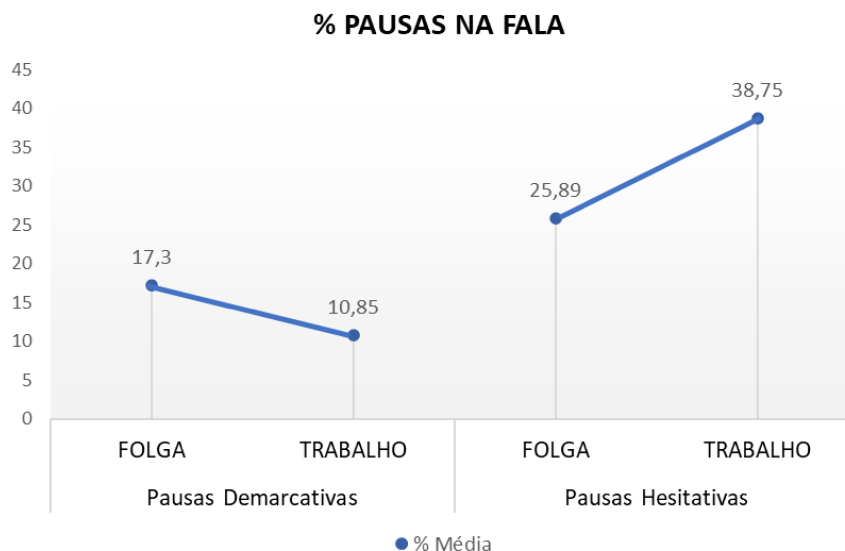
Quase 50% do tempo total de fala no dia de trabalho ($\mu = 49,6$, $\sigma = 9,38$) era composto por pausas, enquanto no dia de folga era em torno de 43%. O Gráfico 8 ilustra essa variação:

Gráfico 8 - Porcentagem de Pausas na fala em dia de folga e trabalho



Ao analisar o tipo de pausa mais predominante, observamos que o uso de pausas hesitativas ocorre com bastante frequência na fala espontânea, tanto no dia de folga, quanto no dia de trabalho, no entanto, o uso de pausas demarcativas diminuiu (10,8%) enquanto as pausas hesitativas aumentaram significativamente (38,7%) no dia em que havia queixa de fadiga (Gráfico 9).

Gráfico 9 - Tipologia das pausas na fala



Duração Média das Pausas

Nesta variável, o critério de normalidade dos dados não foi atendido, por isso, realizamos o teste não-paramétrico de Wilcoxon, por este ser o teste correspondente ao teste t pareado. Este também demonstrou não haver diferença estatisticamente significativa na comparação das duas condições (folga/trabalho).

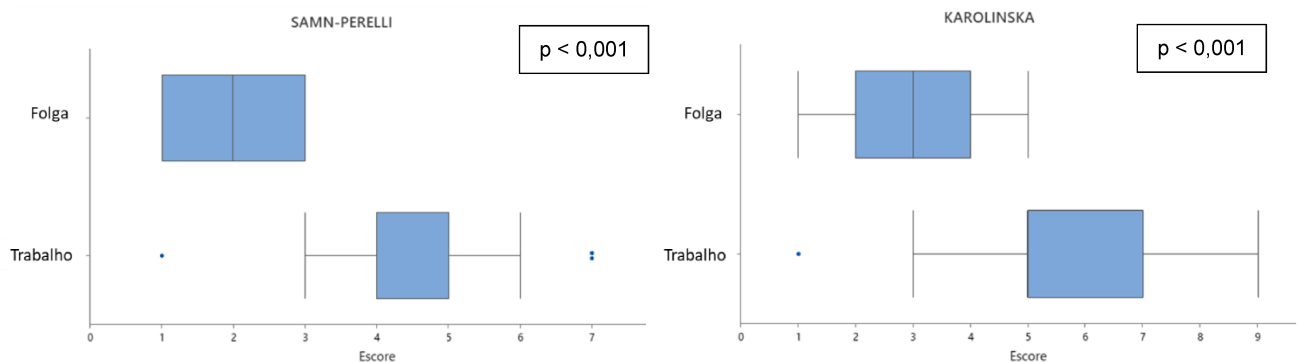
4.2 ESCALAS PSICOMÉTRICAS E SAFTE-FAST

Na escala de fadiga de SP, no dia da folga, o nível de fadiga relatado foi entre 2 e 3 pontos, o que, de acordo com a escala, pode ser considerado bom nível de alerta e disposição. No dia de trabalho, este nível subiu para 4-5 pontos, o que retrata um nível de fadiga moderado.

Na escala de sonolência – KSS – os níveis relatados eram de 2 a 4 pontos no dia de folga, o que também caracteriza bom estado de alerta, e de 5 a 7 pontos no dia de trabalho, retratando níveis de sonolência elevados. Apresentamos o gráfico abaixo (Gráfico 10) para melhor visualização desta variação.

A comparação do nível de fadiga e sonolência nos dois momentos deste estudo permitiu verificar que houve variação estatisticamente significativa ($p < 0,001$).

Gráfico 10 - Escalas psicométricas de Fadiga e Sonolência (Folga x Trabalho)

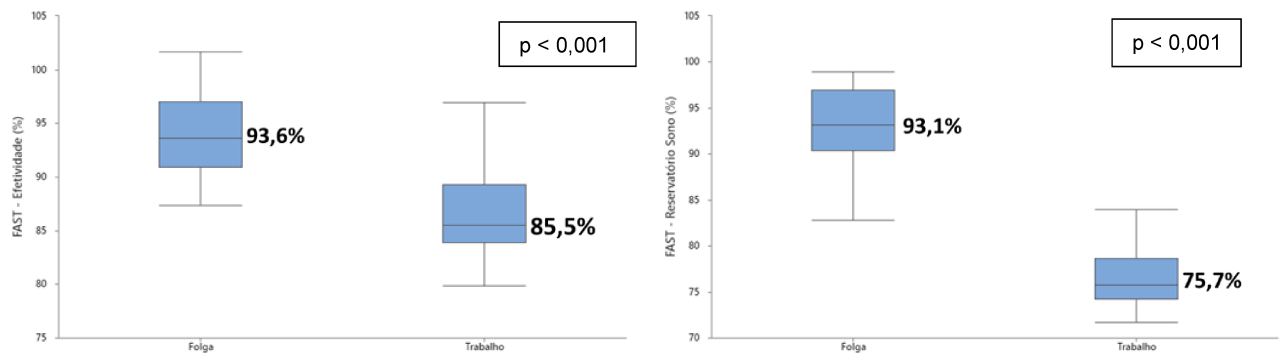


No estudo, a média de sono relatada pelo grupo nas últimas três noites, conforme registrado no questionário de coleta, foi de 7 horas e 44 minutos, com um desvio padrão de 12 minutos. O intervalo de sono variou de um mínimo de 6 horas e

20 minutos a um máximo de 9 horas e 51 minutos. No dia de folga, a média de sono foi ligeiramente maior (7h 58min) comparada ao dia de trabalho (7h 29min).

Em relação aos parâmetros de Efetividade e Reservatório de Sono, calculados pelo modelo biomatemático SAFTE-FAST, observamos uma piora dos níveis de ambos os parâmetros comparando dia de folga e trabalho (Gráfico 11), e a análise pareada também mostrou variações estatisticamente relevantes, conforme demonstrado pelo valor de $p < 0,001$.

Gráfico 11 – Parâmetros calculados pelo SAFTE-FAST - Efetividade e Reservatório de Sono



4.3 TESTES DE CORRELAÇÃO E REGRESSÃO

Verificamos as relações entre as principais variáveis de fala (TE, TA, Taxa Total de Pausas, Taxa de Hesitação e Disfluências, %Disfluência na Fala e %Pausas na Fala e as escalas psicométricas do dia de trabalho por meio do teste de correlação de *Spearman* (ρ). Conforme demonstrado na Tabela 2, observamos correlações estatisticamente significativas entre Taxa de Elocução e KSS (-0,474; $p=0,017$), Taxa de Elocução e SP (-0,430; $p=0,032$), Porcentagem de Disfluência da fala e KSS (0,440; $p=0,028$), Porcentagem de Disfluência da fala e SP (0,502; $p=0,010$), Porcentagem de Pausas na fala e KSS (0,560; $p=0,004$) e Porcentagem de Pausas na fala e SP (0,639; $p= 0,001$).

Tabela 2 - Correlação de Spearman – Fala x Escalas Psicométricas – Dia de Trabalho (n=25)

		TxEloc	TxArtic	TxTotalPausas (todas)	TxHesitDisflu	%DisfluFala	%PausasFala (todas)
ρ	KAROLINSKA						
	Correlações de coeficiente	-0,474*	0,096	0,168	0,285	0,440*	0,560**
	Valor p	0,017	0,646	0,421	0,168	0,028	0,004
	SAMN-PERELLI						
	Correlações de coeficiente	-0,430*	0,208	0,255	0,369	0,502*	0,639**
	Valor p	0,032	0,318	0,218	0,070	0,010	0,001

Testamos também a correlação dos dados de efetividade e reservatório de sono calculados pelo SAFTE-FAST com as escalas psicométricas e com as principais variáveis de fala. Encontramos correlação estatisticamente significativa apenas entre o reservatório de sono e as escalas no dia de trabalho (Tabela 3), no entanto, surpreendentemente, essa correlação foi positiva. Detalhes dos testes realizados com as demais variáveis estão dispostos no Apêndice A.

Tabela 3 – Correlação de Spearman - SAFTE-FAST x Escalas Psicométricas - Dia de Trabalho (n=24)

		Karolinska	Samn-Perelli
ρ	Efetividade		
	Correlações de coeficiente	0,134	0,115
	Valor p	0,534	0,592
	ReservSono		
	Correlações de coeficiente	0,432*	0,430*
	Valor p	0,035	0,036

Finalmente, aplicamos um modelo de regressão linear múltipla para explicar as variáveis KSS e SP a partir das variáveis de fala que apresentaram correlação significativa com essas escalas no dia de trabalho. O modelo final indica que a cada 10% de aumento na Porcentagem de Pausas na Fala, KSS aumenta em 1,13 pontos. Assim, a variável porcentagem de pausas na fala é responsável por explicar 33,1% da variação presente na escala KSS, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Modelo de regressão linear múltipla para Karolinska – Dia de Trabalho (n=25)

	Coeficiente	Erro	t	valor p	IC 95%	
Constante	0,133	1,685	0,079	0,938	-3,352	3,618
%PausasFala (todas)	0,113	0,033	3,373	0,003	0,044	0,182

Variável Dependente: Karolinska. R2 = 33,1% (p = 0,003)

Para SP, o modelo final também indica que a variável porcentagem de pausas na fala é preditiva de SP em 37,7%. A cada 10% de aumento nessa variável, SP aumenta em 0,89 pontos (Tabela 5).

Tabela 5 - Modelo de regressão linear múltipla para Samn-Perelli – Dia de Trabalho (n=25)

	Coeficiente	Erro	t	valor p	IC 95%	
Constante	0,038	1,200	0,032	0,975	-2,445	2,521
% Pausas Fala (todas)	0,089	0,024	3,730	0,001	0,040	0,138

Variável Dependente: Samn-Perelli. R2 = 37,7% (p = 0,001)

4.4 REGRESSÃO LINEAR RELACIONANDO TAXA DE ELOCUÇÃO E ESCALA DE SAMN-PERELLI

Observou-se diferença significativa entre vários parâmetros analisados nas condições de folga e de trabalho. Após uma análise das diversas possibilidades de relação quantitativa entre parâmetros objetivos (taxa de elocução e de pausas) e parâmetros subjetivos (escalas de Samn-Perelli e Karolinska) foi encontrada, por regressão linear, uma relação direta entre a escala de Samn-Perelli e a taxa de elocução.

Esse resultado é ilustrado nos Gráficos 12 e 13, nos quais os valores da escala de Samn-Perelli e da taxa de elocução foram agrupados em quatro faixas e representados pela média e desvio padrão da média de cada faixa. A dependência linear existente é evidente ($r=0,98$). No Gráfico 12, também é apresentado o gráfico de dispersão com todos os dados.

Observa-se que o desvio padrão da média em cada faixa é significativamente maior para a escala de Samn-Perelli do que para a taxa de elocução. Com base nesse resultado torna-se possível utilizar a medida objetiva definida pela taxa de elocução para inferir a fadiga medida subjetivamente pela escala de Samn-Perelli. Tal medida possui as vantagens de ser baseada em um parâmetro objetivo e de exibir uma variabilidade menor do que a observada na escala de Samn-Perelli.

Gráfico 12 - Regressão linear mostrando a escala de fadiga de Samn-Perelli em função da taxa elocução (linha vermelha). Os resultados (círculos pretos) foram obtidos para N=25 pilotos ao final de um dia de trabalho após 16 horas de vigília. A taxa de elocução foi medida para fala espontânea. Os sujeitos foram solicitados a relatar eventos que ocorreram no próprio dia ou no dia anterior. As gravações duraram entre um e dois minutos. Os resultados foram agrupados em quatro bandas indicadas pelas linhas verticais tracejadas. Para cada faixa foram calculadas as médias das amostras (quadrados pretos) e o desvio padrão das médias das amostras (barras de erro horizontais e verticais).

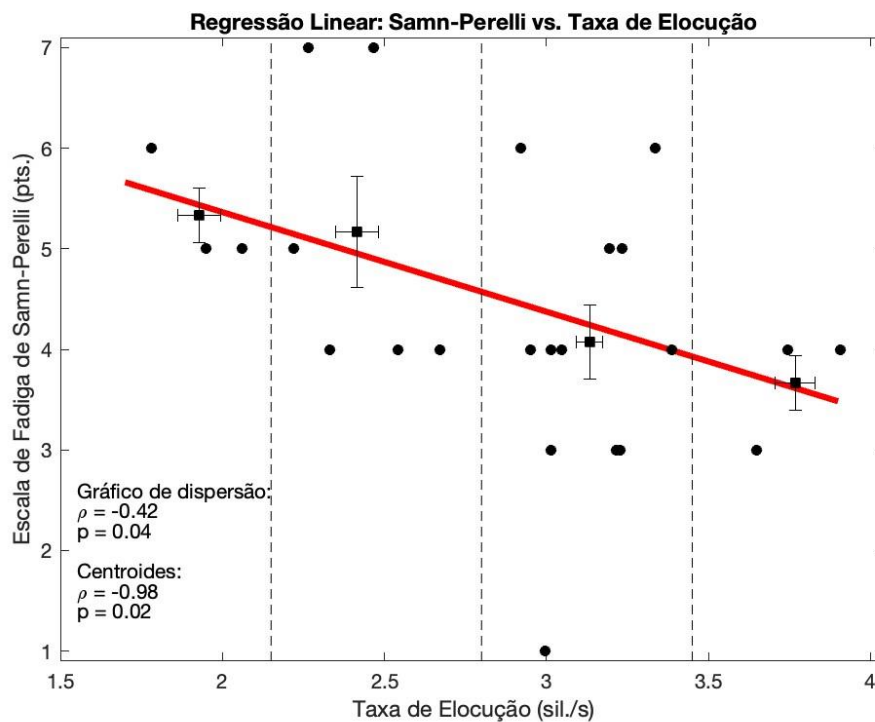
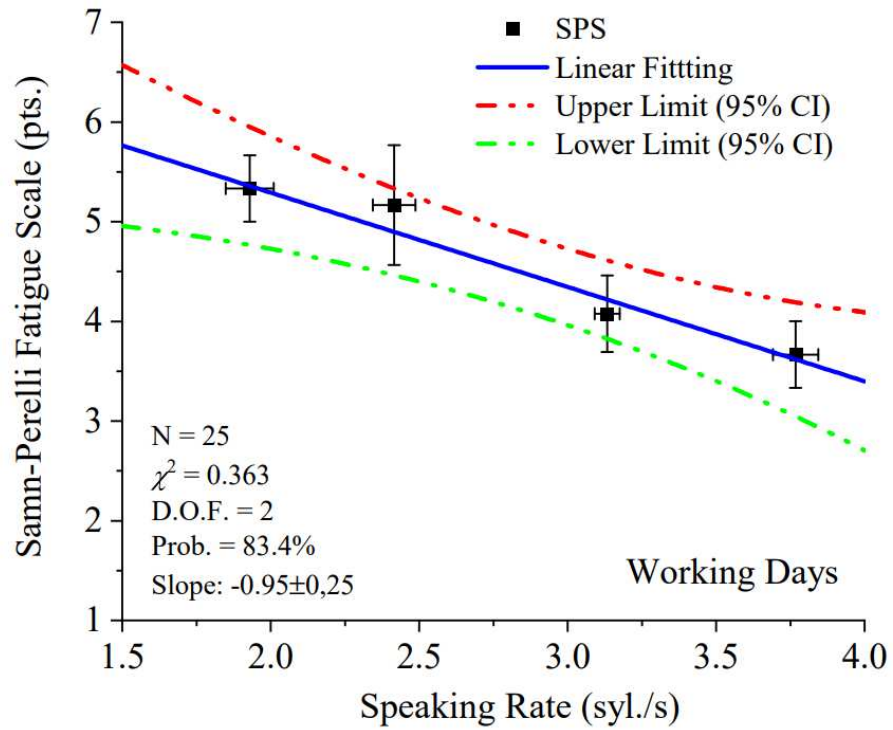


Gráfico 13 - Regressão linear (linha azul) e intervalo de confiança de 95% (limite superior em vermelho e limite inferior em verde).



5 DISCUSSÃO

5.1 MEDIDAS DE ORGANIZAÇÃO TEMPORAL DA FALA

Este estudo buscou verificar a aplicabilidade de medidas objetivas baseadas em parâmetros temporais da fala, extraídas da fala espontânea de pilotos de aeronaves, além de verificar a existência de correlação entre este método e métodos subjetivos de detecção de fadiga e sonolência.

Por meio da análise acústica da fala e sua comparação com outras medidas subjetivas de detecção de fadiga e sonolência, identificamos que as variações encontradas nas duas condições (cansado x descansado) são sugestivas de que o estado de fadiga central e sonolência podem impactar significativamente aspectos da fala, principalmente seus aspectos prosódicos.

A taxa de elocução, ou velocidade de fala, tem sido considerada uma das variáveis mais consistentes e é extensivamente empregada na avaliação e mensuração da produção da fala em diversas condições cognitivas, pois reflete tanto os aspectos motores envolvidos na produção da fala quanto os componentes cognitivos associados ao planejamento e organização da expressão linguística (POTAGAS et al., 2022). Nossa análise revelou uma diminuição significativa desta taxa no dia de trabalho, resultado em consonância com os apresentados por Vogel et al. (2010) que também observaram diminuição na velocidade de fala associada à fadiga, principalmente após 16h de vigília sustentada. Essa consistência entre os estudos reforça a ideia de que fadiga tem um impacto direto e mensurável na produção da fala.

No subestudo 5 de sua tese, Vasconcelos (2019) também observou redução significativa da taxa de elocução em uma amostra de 10 pilotos de aeronaves ao comparar o dia de folga com três momentos de um dia de trabalho. No dia de folga a média da taxa de elocução foi 4,3 sílabas/seg., enquanto no dia de trabalho verificou-se uma diminuição ao longo do tempo, com valores médios em cerca de 3,95 sílabas/seg. 1 hora após o despertar, 3,85 sílabas/seg. 8h após o despertar e 3,35 sílabas/seg. após 16h de vigília (no final do dia de trabalho). Em nosso estudo, encontramos valores inferiores, com uma média de 3,35 sílabas/seg. mesmo no dia

de folga. Essa diferença pode ser explicada pela possibilidade de presença de fadiga crônica influenciando a fala mesmo em dias de folga, no entanto, não pudemos confirmar esta hipótese devido ao fato de termos considerado apenas escalas que reportam a fadiga e sonolência momentânea do indivíduo, não avaliando, assim, a presença de fadiga crônica.

Em relação à valores médios de taxa de elocução que poderiam ser utilizados, para fins de comparação, como padrão de normalidade no português brasileiro em indivíduos saudáveis, Valente (2003) encontrou uma taxa de elocução média de 4,40 sílabas/seg. na fala espontânea de adultos fluentes, falantes do português e variação dialetal de Minas Gerais. Assim como nessa pesquisa, este estudo utilizou o método fonético de segmentação silábica.

Em um estudo brasileiro de larga escala realizado com 594 indivíduos falantes do português brasileiro de todas as faixas etárias, foi encontrada uma taxa de elocução média de 3,38 sílabas/seg. em indivíduos de 18 a 59 anos sem alterações neurológicas (MARTINS; ANDRADE, 2008). Em outro estudo brasileiro, a taxa de elocução foi avaliada em indivíduos gagos e não gagos, e a taxa foi de 3,94 sílabas/seg. em indivíduos não gagos com idade entre 17 a 48 anos (PINTO; SCHIEFER; ÁVILA, 2013) . Embora os valores sejam bem próximos ao encontrado nesta pesquisa no dia de folga, a análise comparativa requer cautela, uma vez que os autores de ambos os estudos adotaram um método de análise do número de sílabas transcritas ortograficamente, e não o de sílabas fonéticas, o que pode resultar em diferenças no número de sílabas contabilizados e, por consequência, ligeiras diferenças na taxa de elocução final. Ainda assim, são valores que servem como norteadores da taxa de elocução média de falantes saudáveis do português brasileiro.

Em comparação à TA, a TE apresentou médias inferiores, conforme também observado por Gonçalves (2017) e corroborado pela literatura de forma geral (VALENTE, 2003). A diferença se deve ao fato de que a TE pode ser tratada como um índice misto, pois incorpora tanto a articulação quanto as pausas e disfluências, estendendo o tempo total de fala. Em contraste, a TA foca exclusivamente na análise de sílabas fluentes, ou seja, considerando apenas o tempo efetivamente articulado. Assim, elementos como pausas (silenciosas ou preenchidas), sílabas distorcidas, erros articulatórios, prolongamentos vocálicos e repetições são classificados como disfluências e, conseqüentemente, não são incluídos no cálculo da TA.

Por meio da TA observamos que o tempo médio para articular sílabas foi quase o mesmo nas duas condições, ou seja, não houve diferença no tempo gasto para realizar o movimento motor articulatório entre o dia de folga e de trabalho. Isto foi evidenciado pela ausência de variação estatisticamente significativa na análise pareada desta taxa. Dado que a amostra envolveu indivíduos sem comprometimentos neurológicos ou motores específicos, essa ausência de variação era esperada e evidencia o impacto causado pelos trechos de pausa nas amostras de fala. No entanto, conforme também observado por Vasconcelos (2019), essa ausência de variação estatisticamente significativa não descarta uma possível diminuição no desempenho motor da fala, uma vez que as produções com distorções fonêmicas ou contendo hesitações foram consideradas pausas ou disfluências, sendo contabilizadas dentro dessas taxas.

A taxa total de pausas engloba qualquer interrupção na fala, sejam elas com função demarcativa (fluente), hesitativas ou provocadas por disfluências. O aumento desta taxa no dia de trabalho comparado ao dia de folga, sugere que indivíduos, quando fatigados, interrompem a fala com maior frequência. Corroborando esta constatação, Potagas et al. (2022) afirmam que a taxa de pausas reflete a necessidade do falante de interromper o enunciado para assimilar novos estímulos, modificar o que foi dito anteriormente ou devido ao esforço cognitivo necessário para expressar o pensamento inicialmente planejado.

Em relação ao esforço cognitivo especificamente, diversos estudos também constataram aumento na taxa de pausas associado a uma elevação da carga cognitiva (BETZ et al., 2023; KHAWAJA; RUIZ; CHEN, 2008; OOMEN; POSTMA, 2001; YIN; CHEN, 2007). Montacie e Caty (2014) identificaram que características relacionadas a pausas como proporção de pausas silenciosas e preenchidas foram relevantes para medição de carga cognitiva e sugerem que o nível de carga cognitiva tem maior influência nos segmentos de pausas do que nos segmentos de fones.

Além disso, uma variedade de estudos tem demonstrado o aumento no uso de pausas na fala espontânea em resposta a diversas condições que afetam o desempenho cognitivo, reforçando a sensibilidade desta métrica às variações do estado cognitivo do indivíduo (ANGELOPOULOU et al., 2018; PASTORIZA-DOMÍNGUEZ et al., 2022; PISTONO et al., 2016; POTAGAS et al., 2022; VASCONCELOS et al., 2019).

Quanto ao uso de pausas hesitativas, observou-se um aumento no uso destas no dia em que os indivíduos relataram fadiga. Detalhando ainda mais estes dados, analisamos pausas hesitativas silenciosas e preenchidas separadamente, mas ambas retratam a necessidade do indivíduo de organizar e acessar estruturas que atendam às necessidades do seu discurso. Essas pausas eram frequentemente acompanhadas de entonações de incerteza, quebras da estrutura prosódica, hesitações e atrasos no acesso lexical, bem como maior duração.

Em nossa análise, observamos uma menor ocorrência de pausas hesitativas silenciosas em comparação a pausas hesitativas preenchidas, resultado mais consistente com a literatura, mas também divergente com outros estudos. Como exemplo, em um estudo que investigou a relação entre pausas na fala e carga cognitiva e identificou maior ocorrência de pausas silenciosas, os autores discutem que quando a alça fonológica/articulatória, que é um tipo de memória de trabalho verbal, está sobrecarregada, é menos provável a emissão de uma pausa preenchida devido à demanda adicional de recursos auditivos/verbais que, devido à sobrecarga, não podem ser executados. Por outro lado, a pausa silenciosa não requer recursos extras e pode ser sintomática de alocação de recursos para processos cognitivos internos associados ao planejamento da fala (KHAWAJA; RUIZ; CHEN, 2008).

Notavelmente, as pausas do tipo preenchidas emergiram como o principal recurso utilizado quando os participantes encontravam dificuldades para prosseguir ou concluir suas declarações. Oomen e Postma (2001) afirmaram que, independentemente de fatores como idade, gênero ou língua materna, indivíduos saudáveis recorrem a pausas preenchidas durante a fala espontânea. No entanto, um uso excessivo dessas pausas está intimamente ligado ao esforço aumentado para recuperar palavras, especialmente em contextos de atenção dividida. Os autores observaram um aumento das pausas preenchidas em cenários de atenção dividida e sugerem que a divisão da atenção entre múltiplas tarefas pode reduzir os recursos atencionais disponíveis para o planejamento da fala, resultando em mais hesitações e desafios de planejamento. Considerando que os estados de fadiga e privação de sono, assim como na atenção dividida, reduzem os recursos atencionais disponíveis e afetam o desempenho cognitivo, os resultados do estudo em questão estão em consonância com nossos achados.

Em um estudo conduzido por Betz et al. (2023), foi investigado o impacto do aumento da carga cognitiva durante um jogo na frequência de pausas hesitativas na fala. Os resultados mostraram um aumento significativo nas pausas silenciosas, pausas preenchidas e prolongamentos vocálicos à medida que a carga cognitiva do jogo aumentava. Contudo, um achado surpreendente, conforme destacado pelos autores, foi a predominância de prolongamentos vocálicos sobre pausas preenchidas e a alta frequência de pausas silenciosas, contrariando a tendência geral da literatura que indica uma maior recorrência de pausas preenchidas.

Uma limitação na análise dessa métrica é a ausência de consenso na literatura sobre os critérios e limites estabelecidos para sua classificação. Angelopoulou et al. (2018), defende que qualquer pausa, independente da sua duração, deve ser considerada para análise, argumentando que estabelecer um limite é arbitrário e reflete apenas um consenso ou intuição de um pesquisador isolado, além da variabilidade destes limites dificultar a utilização dos dados em metanálises. Em contrapartida, Merlo (2012) sugere que interrupções inferiores a 200ms não sejam classificadas como pausas, pois correspondem ao tempo necessário à modulação do trato vocal para articulação de oclusivas. Sua pesquisa foi realizada com falantes do português brasileiro. Considerando que o objetivo deste estudo foi identificar características da fala associadas a processos cognitivos de alto nível prejudicadas pelo estado de fadiga e sonolência, adotamos o limiar proposto por Merlo (2012), por também se tratar de um estudo com falantes do português brasileiro e para evitar a classificação equivocada de interrupções que são naturais ao processo de articulação da fala e não tem relação com fadiga e sonolência.

Nossos resultados indicam um aumento na taxa de hesitação e disfluências no dia de trabalho, sustentando a hipótese de que após 16h de vigília sustentada e estado de fadiga mental, a organização e planejamento da fala sofrem efeitos negativos decorrentes deste estado. Esta observação é corroborada por Betz et al. (2023), que identificaram um aumento nas hesitações em contextos de alta carga cognitiva. No entanto, é importante notar que a taxa de hesitação registrada por eles (14,9 hesitações por minuto, ou, 0,24 por segundo) é inferior à nossa (0,76 hesitações por segundo). Esta diferença pode ser explicada pela nossa abordagem mais abrangente na quantificação de disfluências, que além de pausas hesitativas e prolongamentos

vocálicos, também considera distorções de fonemas, erros articulatórios, repetições de segmentos, autocorreções e omissões.

Interessantemente, um estudo que também utilizou análise acústica da fala para investigar os efeitos cognitivos de um medicamento antiepiléptico (topiramato) sobre a fala em indivíduos saudáveis, fornece *insights* adicionais sobre a relação entre déficits cognitivos temporários e fluência da fala. Segundo os autores, o medicamento, apesar de eficaz no controle da epilepsia, pode causar efeitos colaterais como déficits na atenção, memória e, mais notavelmente, dificuldades no acesso lexical. Por meio da análise de medidas como duração de pausas silenciosas, prolongamentos vocálicos e taxas de disfluência, eles observaram um aumento de disfluências na fala proporcional à concentração do medicamento na corrente sanguínea (PAKHOMOV; MARINO; BIRNBAUM, 2013). Estes déficits, em muitos aspectos, assemelham-se aos efeitos da fadiga mental e sugerem um possível impacto em áreas ou funções cerebrais que são cruciais para a produção de fala fluente. De maneira similar, a fadiga mental e efeitos da privação de sono, após um longo dia de trabalho, pode afetar essas mesmas áreas ou funções cerebrais, levando a um aumento nas hesitações e disfluências

Incluimos em nossa análise o cálculo de porcentagem de disfluências e de pausas na fala com o objetivo de visualizar, de maneira mais clara, a proporção destes eventos no tempo total de fala. Conforme apontam nossos resultados, a porcentagem de disfluência da fala quase dobrou no dia de trabalho em comparação ao dia de folga, sugerindo uma relação entre a fadiga central e comprometimento da fluência da fala. Este aumento na proporção de disfluência pode ser atribuído à redução nos recursos cognitivos levando a uma lentidão no processamento da informação e comprometimento da função cognitiva que sustenta a fala, devido à fadiga ou sonolência, conforme já discutido nos parágrafos anteriores.

Além disso, a análise da proporção de pausas revelou que quase metade do tempo total de fala no dia de trabalho era composto por pausas, com um aumento notável das pausas do tipo hesitativas. Este padrão sugere também que, sob fadiga, os indivíduos podem enfrentar desafios no planejamento da fala, levando a hesitações mais frequentes. A diminuição das pausas demarcativas reforça esta dificuldade e pode indicar uma mudança na forma como os falantes estruturam seus enunciados quando fatigados.

Em nosso estudo observamos uma porcentagem de disfluência de aproximadamente 15% no dia de folga. A comparação desse achado com outros estudos é desafiadora, devido à falta de consenso sobre quais disfluências considerar e a ausência de um método padrão para contagem de sílabas e disfluências, o que pode levar a variações significativas entre estudos. No estudo mais abrangente realizado atualmente com falantes do português brasileiro, os autores reportaram uma porcentagem média de descontinuidade da fala de 8,67% em indivíduos saudáveis de 18 a 59 anos (MARTINS; ANDRADE, 2008). Em outro estudo a média da taxa de disfluência típica encontrada em indivíduos saudáveis foi de 8,4% (PINTO; SCHIEFER; ÁVILA, 2013). Jakubovicz (2009) argumenta que, em geral, os estudos indicam uma taxa entre 10 a 15%, no entanto sua análise se concentra na fala de crianças.

Vasconcelos et al. (2019) conduziram uma análise retrospectiva da fala de um piloto envolvido em um acidente aéreo fatal. A análise comparou amostras de fala do piloto em três momentos distintos: em um dia de folga, em um dia de trabalho e no dia do acidente, utilizando registros de comunicação com a torre de controle pouco antes do trágico evento. Os achados revelaram uma redução na TE e TA no dia do acidente em comparação com os outros dias, bem como um aumento no número de pausas, resultando em maior disfluência da fala.

Em sua tese, Vasconcelos (2019) apresenta 5 subestudos nos quais analisou a fala de pilotos em situações de descanso e fadiga, observando uma piora nos valores das taxas de elocução, taxa total de pausas, taxa de pausas fluentes e disfluentes, além da duração média das pausas quando havia queixa de fadiga e sonolência. Segundo a autora, o declínio nos valores das taxas mencionadas indica um aumento da instabilidade na fala à medida que o participante torna-se mais sonolento ou fatigado. Esse fenômeno sugere um impacto negativo no controle neuromotor, afetando diretamente a organização temporal do discurso. Essas mudanças não se limitam apenas ao nível estrutural da fala, mas também afetam a comunicação em nível prosódico, paralinguístico e não-linguístico, evidenciando um impacto perceptível no controle segmental da fala e nas habilidades linguísticas relacionadas à atenção, concentração e memória.

Os resultados obtidos em nossa pesquisa apresentam semelhança significativa com os achados do referido estudo. O fato de termos empregado os métodos

propostos por Vasconcelos (2019) reforça a robustez e replicabilidade de seus procedimentos e resultados. A consistência observada entre ambas as pesquisas sugere que alterações na organização temporal da fala podem ser indicativas de estados cognitivos alterados, como no caso de fadiga e sonolência. Esta convergência reitera a relevância de monitorar sutis variações na fala em profissionais que operam em ambientes de alto risco, já que tais modificações podem servir como alertas precoces de potenciais comprometimentos na performance e segurança.

Parâmetros vocais como a F0, apesar de ser de fácil extração no material estudado, não foram analisados objetivamente devido às gravações de fala não terem sido controladas tendo em vista que o objetivo era a coleta de amostras em situações reais de trabalho dos pilotos. Contudo, por meio da análise perceptivo-auditiva, notavelmente, mudanças no padrão vocal dos indivíduos no dia de trabalho, como redução da intensidade e energia vocal, além de voz mais grave eram evidentes.

Warthe e Sharma (2022) observaram uma mudança significativa na porcentagem média de brilho (clareza) vocal após apenas 2 horas de privação de sono e argumentam que a fadiga causada pela privação do sono diminui a tensão muscular e a temperatura corporal, afetando a respiração, articulação, fonação e a projeção da voz. Concluem que tais fatores comprometem a qualidade vocal, alterando a amplitude e clareza do som e que a análise destes parâmetros pode ser potencialmente aplicada na aviação para identificar precocemente a fadiga em longos períodos de vigília.

5.2 ESCALAS PSICOMÉTRICAS E SAFTE-FAST

Em relação à análise pareada dos níveis de fadiga e sonolência reportados nas escalas KSS e SP, no dia de folga, os pilotos relataram níveis que indicam bom estado de alerta e disposição. Estes resultados são consistentes com a expectativa de que, durante períodos de descanso, os indivíduos tem a oportunidade de recuperar-se física e mentalmente, levando a níveis reduzidos de fadiga e sonolência. Estudos apontam que um cochilo de apenas 20 minutos já pode ser útil tanto para recuperação da fadiga quanto para prevenção em contextos de trabalho contínuo, além de contribuir para redução da sonolência e melhoria do desempenho neuropsicológico (HAYASHI; CHIKAZAWA; HORI, 2004; KHAROUFAH et al., 2018)

No entanto, no dia de trabalho, observou-se um aumento nos níveis tanto de fadiga, quanto de sonolência. Este aumento pode ser atribuído a vários fatores associados à natureza do trabalho dos pilotos, incluindo carga horária elevada, exposição a condições estressantes e a necessidade de manter altos níveis de concentração e atenção. A literatura tem consistentemente mostrado que profissões que exigem alta responsabilidade e concentração, como a de pilotos, estão associadas a níveis elevados de fadiga e sonolência, especialmente quando os indivíduos são submetidos a jornadas de trabalho prolongadas ou a horários irregulares (ALAMINOS-TORRES et al., 2023; JACKSON; EARL, 2006). Assim, é plausível que os pilotos analisados nessa pesquisa, que também enfrentam condições de trabalho desafiadoras e horários irregulares, experimentem níveis semelhantes de fadiga e sonolência.

Sallinen et al. (2021) observaram que o período de serviço de voo e o sono inadequado devido às horas de trabalho são os principais fatores indutores de sonolência. Além disso, a ênfase na influência circadiana ressalta a importância de considerar o ritmo biológico natural dos pilotos ao planejar horários de trabalho e períodos de descanso.

Verificamos em nosso grupo uma média de sono por noite de 7h e 44 minutos, quantidade levemente inferior ao geralmente recomendado. Estudos sugerem que, ainda que difiram na quantidade de sono que necessitam, a maioria dos indivíduos requer de 8 a 9 horas de sono por noite. Esta recomendação enfatiza não apenas a quantidade, mas também a qualidade do sono, que é crucial para uma recuperação adequada e eficácia do descanso. Fatores como fragmentação do sono, dificuldades em iniciá-lo e insônia podem comprometer significativamente a qualidade, afetando assim a saúde e o bem estar (CALDWELL et al., 2019; JACKSON; EARL, 2006).

A observação de uma piora nos parâmetros de Efetividade e Reservatório de Sono calculados pelo SAFTE-FAST é indicativa do impacto significativo das demandas laborais nos padrões de sono. Mesmo com variação significativa entre dia de folga e dia de trabalho, a Efetividade manteve-se em um nível acima de 86%, em contrapartida, o Reservatório de Sono atingiu um nível abaixo de 77% no dia de trabalho. De acordo com Licati et al. (2010), níveis de desempenho abaixo de 77,5% já demandam contramedidas de gerenciamento de risco, enquanto níveis inferiores a 65% representam alto risco. A deterioração desses parâmetros no dia de trabalho

sugere que os pilotos podem estar enfrentando privação ou interrupções no sono devido às demandas ocupacionais. Tal observação também está alinhada com pesquisas anteriores que destacam os desafios do sono associados a carga horária de trabalho irregulares e estressores laborais (ALAMINOS-TORRES et al., 2023; SALLINEN et al., 2021).

5.3 TESTES DE CORRELAÇÃO E REGRESSÃO

Buscamos explorar as relações entre as principais variáveis de fala e os níveis de fadiga e sonolência reportados nas escalas KSS e SP no dia de trabalho. A correlação negativa estatisticamente significativa entre a TE e ambas as escalas sugere que conforme aumentam a fadiga ou sonolência, a taxa com que as palavras são emitidas tende a diminuir, principalmente devido ao tempo gasto com pausas e interrupções na fala. Isto pode ser explicado pelo fato de que, à medida que uma pessoa se sente mais cansada ou sonolenta, suas funções cognitivas diminuem, o que pode resultar em uma taxa de fala mais lenta (VOGEL; FLETCHER; MARUFF, 2010). O modelo de regressão linear com dados agrupados indicou uma correlação linear negativa forte entre as duas variáveis, com quase 98% da variabilidade na escala de SP podendo ser explicada pela TE.

A correlação positiva estatisticamente significativa entre a porcentagem de disfluência e de pausas na fala e as escalas KSS e SP indicam que quanto maior o estado de fadiga, maior a ocorrência de disfluências e interrupções no discurso falado, com uma tendência ao aumento no número de pausas. Pausas prolongadas podem ser uma tentativa do falante de ganhar tempo para processar informações ou formular o que vai ser dito a seguir. Como também já discutimos nos parágrafos anteriores, isso pode ocorrer porque a fadiga e privação de sono interferem em funções cognitivas e motoras necessárias para uma fala fluente (KIM et al., 2001; KRAJEWSKI et al., 2009).

A regressão linear múltipla aplicada em nossa amostra mostrou que a variável porcentagem de pausas na fala é a mais relevante do modelo e consegue prever corretamente 37,7% da variação na escala de SP, e 33,1% da escala de KSS.

Em relação aos testes de correlação dos parâmetros de efetividade e reservatório de sono calculados pelo SAFTE-FAST com as variáveis de fala e com as escalas psicométricas, esperávamos que houvesse correlação significativa entre essas variáveis. No entanto, nesse estudo, observamos correlação relevante apenas entre o reservatório de sono e as escalas psicométricas no dia de trabalho. Contudo, essa correlação foi positiva, ou seja, quanto maiores os escores nas escalas KSS e SP, maior o reservatório de sono. Este é um resultado surpreendente, uma vez que esperava-se que houvesse uma correlação negativa, ou seja, quanto maiores os escores de KSS e SP, menor a porcentagem do reservatório de sono. Uma possível explicação para esse resultado é que as escalas psicométricas estão mais relacionadas à carga de trabalho do que à privação de sono, enquanto o SAFTE-FAST se baseia na quantidade reportada de sono e a hora do dia em que a resposta está sendo registrada (por exemplo, se é um horário favorável a picos de sonolência ou não) e, para os cálculos de efetividade e reservatório de sono especificamente, o modelo não leva em conta a carga horária de trabalho. Portanto, o que observamos nesse estudo é que mesmo com KSS e SP em níveis elevados, o SAFTE-FAST não apontou queda na efetividade e reservatório de sono.

Ainda neste sentido, estudos tem destacado as significativas limitações de modelos biomatemáticos na avaliação da fadiga e do desempenho no trabalho. Um documento elaborado pela *Civil Aviation Safety Authority* (CASA), trata de algumas destas limitações e retrata que, embora úteis para comparar horários de trabalho, esses modelos falham em prever com precisão efeitos de longo prazo (crônicos) e circadianos da fadiga, além de não considerar as diferenças individuais nos padrões de sono e na resposta à fadiga (CIVIL AVIATION SAFETY AUTHORITY - CASA, 2014). Também de acordo com Darwent et al. (2015), os modelos tendem a basear-se no “indivíduo médio”, não capturando a variabilidade entre os trabalhadores, levando tanto à subestimação quanto à superestimação da fadiga em diferentes indivíduos.

Devine et al. (2023) realizaram um estudo com 254 bombeiros que trabalhavam por turnos e observou uma correlação fraca entre a eficácia do sono (parâmetro *Autosleep*) prevista pelo SAFTE-FAST e a eficácia real medida pelo PVT, mostrando que o modelo nem sempre prevê corretamente quão bem os indivíduos dormiram e como isso afeta o desempenho. Além disso, o modelo apresentou uma tendência a

superestimar o desempenho dos bombeiros quando eles estavam mais cansados, e subestimar o desempenho quando estavam melhores. Estas evidências mostram que apesar de serem ferramentas valiosas, modelos biomatemáticos devem ser utilizados com cautela e em conjunto com outros métodos de avaliação para garantir a segurança e bem estar dos profissionais envolvidos.

Por fim, embora nossos resultados mostrem associação entre algumas variáveis de fala e as escalas psicométricas, devemos ter cautela na interpretação desses resultados, pois existem outras variáveis potenciais que não foram consideradas neste estudo e que podem influenciar ambos os aspectos tais como: fatores psicológicos, uso de medicamentos ou psicoestimulantes, entre outros. É importante que pesquisas futuras sejam realizadas, especialmente com amostras maiores, para também analisarem esse método de extração de medidas e, assim, o validarem para detecção de fadiga e sonolência.

Uma limitação em relação ao método de análise acústica da fala é que este ainda demanda muito tempo e esforço manual, além da experiência linguística do avaliador, o que dificulta a aplicação deste método em pesquisas com maior número de sujeitos. A utilização de recursos computacionais e inteligência artificial vem ganhando cada vez mais relevância em áreas de estudo de reconhecimento de voz e fala, e será essencial para sistematizar e automatizar a análise de variáveis de fala para aplicação em diversos contextos.

Em conclusão, destacamos a relevância das medidas temporais da fala como potenciais indicadores de fadiga e sonolência em profissionais, sobretudo aqueles que exercem funções de alto risco, de alta demanda cognitiva e com turnos irregulares. A monitorização da taxa de elocução e taxa de pausas, por exemplo, podem ser usadas como indicadores em tempo real, ajudando a prevenir erros relacionados ao estado de fadiga e sonolência. Se corroborado por estudos adicionais, essas descobertas poderão ter implicações práticas significativas.

6 CONCLUSÕES

Essa pesquisa apresentou a aplicabilidade de medidas baseadas na organização temporal da fala como ferramenta objetiva para detecção de fadiga e sonolência em pilotos de aeronaves. Procurou-se verificar diferenças significativas na fala dos indivíduos comparando-se dia de folga e dia de trabalho. A partir da análise estatística e crítica dos resultados, foi possível traçar algumas conclusões em relação aos aspectos estudados.

Observamos que os aspectos de organização temporal da fala, em especial a taxa de elocução, a porcentagem de disfluências e de pausas na fala, são medidas objetivas que refletem o nível de planejamento cognitivo do discurso.

A alta variabilidade da taxa de elocução, taxa de pausas, taxa de disfluência e porcentagem de pausas e disfluências na fala em resposta à fadiga sugere que estes podem ser indicadores do estado de alerta e bem-estar de um indivíduo, com implicações potenciais para áreas que vão desde a saúde ocupacional até a segurança de voo e operações de trânsito.

Por meio dos testes de correlação e regressão, identificamos uma conexão clara entre alguns parâmetros de fala e níveis de fadiga e sonolência reportados nas escalas KSS e SP. Verificou-se existir uma correlação elevada ($r=0,98$) entre a taxa de elocução e a escala de Samn-Perelli, representada pelas médias de quatro faixas. Tal resultado permite inferir o nível de fadiga usando-se uma medida objetiva (taxa de elocução) em lugar de uma medida subjetiva (escala de Samn-Perelli).

Em conjunto, os dados analisados neste estudo destacam a importância de considerar os parâmetros temporais da fala ao avaliar o bem estar físico e mental e fornecem insights sobre como a fadiga e sonolência podem influenciar a comunicação verbal. Demonstaram também que a análise acústica da fala é uma ferramenta simples e objetiva para detectar fadiga e sonolência.

REFERÊNCIAS

- ÅKERSTEDT, T.; GILLBERG, M. **Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual**. *International Journal of Neuroscience*, v. 52, n. 1–2, p. 29–37, 1990.
- ALAMINOS-TORRES, A. et al. **Fatigue, Work Overload, and Sleepiness in a Sample of Spanish Commercial Airline Pilots**. *Behavioral Sciences*, v. 13, n. 4, 2023.
- ANGELOPOULOU, G. et al. **Silent pauses in aphasia**. *Neuropsychologia*, v. 114, 2018.
- ARSINTESCU, L. et al. **The relationship between workload, performance and fatigue in a short-haul airline**. *Chronobiology International*, v. 37, n. 9–10, p. 1492–1494, 2 out. 2020.
- BARBOSA, P. A. **Prosodia**. 1. ed. São Paulo: Parábola, 2019.
- BEAR, M. F.; CONNORS, B. W.; PARADISO, M. A. **Neurociências: desvendando o sistema nervoso**. 4. ed ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- BEHRENS, M. et al. **Fatigue and Human Performance: An Updated Framework**. *Sports Medicine (Auckland, N.z.)*, v. 53, n. 1, p. 7, 1 jan. 2023.
- BELTRAMI, D. et al. **Speech analysis by natural language processing techniques: A possible tool for very early detection of cognitive decline?** *Frontiers in Aging Neuroscience*, v. 10, 2018.
- BERTHOLD, A.; JAMESON, A. **Interpreting Symptoms of Cognitive Load in Speech Input**. In: Kay, J. (eds) *UM99 User Modeling*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, v. 407p. 235–244.
- BETZ, S. et al. **Cognitive Load Increases Spoken and Gestural Hesitation Frequency**. *Languages*, v. 8, n. 1, 2023.
- BOERSMA, P.; WEENINK, D. **Praat: doing phonetics by computer**. Amsterdam University, 2023. Disponível em: <<https://www.fon.hum.uva.nl/praat/>>. Acesso em: 4 ago. 2023
- BORGHINI, G. et al. **Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness**. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, v. 44, p. 58–75, 1 jul. 2014.
- BOUALOULOU N. et al. **Speech analysis for the detection of Parkinson's disease by combined use of empirical mode decomposition, Mel frequency cepstral coefficients, and the K-nearest neighbor classifier**. *ITM Web Conf.*, v. 43, p. 1019, 2022.

BOYER, S. et al. **Human Voice as a Measure of Mental Load Level**. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, v. 61, n. 11, p. 2722–2734, 8 nov. 2018.

BRIEND, F. et al. **Voice acoustics allow classifying autism spectrum disorder with high accuracy**. Translational psychiatry, v. 13, n. 1, 2023.

CAGLIARI, L. C. **Prosódia: algumas funções dos supra-segmentos**. Cadernos de Estudos Linguísticos, v. 23, n. 0, p. 137–151, 26 out. 2012.

CALDWELL, J. A. et al. **Fatigue and its management in the workplace**. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, v. 96, p. 272–289, 2019.

CAÑAS, J. J.; MUÑOZ-DE-ESCALONA, E.; MORALES-GUAMAN, J. F. **Fundamental Frequency as an Alternative Method for Assessing Mental Fatigue**. Communications in Computer and Information Science, v. 1493, 2021.

CASSIANO, S. K. **A Fadiga em Foco na Aviação: Adaptação Brasileira da Samn Perelli Scale**. Revista Conexão SIPAER, v. 8, n. 3, p. 19–28, 2017.

CASSIANO, S. K. **Fadiga na aviação civil: um desafio à investigação e prevenção de acidentes aeronáuticos**. Revista Conexão Sipaer, v. 9, n. 3, p. 12–21, 2018.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CENIPA. **Painel Sipaer - Ocorrências Aeronáuticas na Aviação Civil Brasileira**. Disponível em: <<https://painelsipaer.cenipa.fab.mil.br/extensions/Sipaer/home.html>>. Acesso em: 19 ago. 2023.

CHARTIER, J. et al. **Encoding of Articulatory Kinematic Trajectories in Human Speech Sensorimotor Cortex**. Neuron, v. 98, n. 5, 2018.

CIVIL AVIATION SAFETY AUTHORITY - CASA. **Biomathematical Fatigue Models. Civil Aviation Safety Authority**. Australia Government. 2014. Disponível em: <https://ifalpa.org/media/2285/fatigue_modelling.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2023

COMISSÃO NACIONAL DE FADIGA HUMANA - CNFH. **Manual de Orientações para a Investigação da Fadiga Humana em Ocorrências Aeronáuticas**. 2020. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/cenipa/images/Anexos/Manual_Fadiga2020_por.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2023

COMISSÃO NACIONAL DE FADIGA HUMANA- CNFH; COMITÊ NACIONAL DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CNPAA. **Guia de investigação da fadiga humana em ocorrências aeronáuticas**. Brasília, 2017. Disponível em: <<https://www.icao.int/SAM/Documents/2018-INVESTIGARCM/REVISTA%20CNFH.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2023

COMITÊ NACIONAL DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS - CNPAA; COMISSÃO NACIONAL DE TREINAMENTO - CNT. **Manual do instrutor de voo**. 2016. Disponível em: <<https://www2.fab.mil.br/cenipa/images/Anexos/MIV-rev-2016.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2023

DARNAI, G. et al. **The neural correlates of mental fatigue and reward processing: A task-based fMRI study**. *NeuroImage*, v. 265, p. 119–812, 2023.

DARWENT, D. et al. **Managing fatigue: It really is about sleep**. *Accident Analysis & Prevention*, v. 82, p. 20–26, 2015.

DEVINE, J. K. et al. **Biomathematical modeling for the prediction of sleep behavior and comparison against cognitive performance in firefighters**. *Safety Science*, v. 163, p. 106128, 2023.

DUEZ, D. **Organisation temporelle de la parole et dysarthrie parkinsonienne**. In: OZSANCAK, C.; AUZOU, P. *Les troubles de la parole et de la déglutition dans la maladie de Parkinson*, p. 195–211, 2005.

FAGHERAZZI, G. et al. **Voice for Health: The Use of Vocal Biomarkers from Research to Clinical Practice**. *Digital Biomarkers*, v. 5, n. 1, p. 78–88, 16 abr. 2021.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. **Pilot Judgment Training and Evaluation**. 1982. Disponível em: <<https://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ct82-56-1.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2023

FUJISAKI, H. **Information, prosody, and modeling-with emphasis on tonal features of speech**. *Scientific Programming - SP*, 1 jan. 2004.

GAO, X. et al. **A rapid, non-invasive method for fatigue detection based on voice information**. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, v. 10, 2022.

GAWRON, V. J. **Overview of Self-Reported Measures of Fatigue**. *The International Journal of Aviation Psychology*, v. 26, n. 3–4, p. 120–131, 1 out. 2016.

GOLDMAN, J. P. **EasyAlign: An automatic phonetic alignment tool under Praat**. *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH*, p. 28–31, 2011.

GONÇALVES, A. P. B. et al. **Executive functions assessment in patients with language impairment A systematic review**. *Dementia & Neuropsychologia*, v. 12, n. 3, p. 272–283, set. 2018.

GONÇALVES, C. S. **Taxa de elocução e taxa de articulação em corpus utilizado na perícia de Comparação de Locutores**. *Letras de Hoje*, v. 52, n. 1, p. 15, 21 jun. 2017.

GREELEY, H. P. et al. **Fatigue estimation using voice analysis**. *Behavior Research Methods*, v. 39, n. 3, p. 610–619, 2007.

GREELEY, H. P. et al. **Field Study Evaluation of Cepstrum Coefficient Speech Analysis for Fatigue in Aviation Cabin Crew**. *Rosap - Repository & open science*, p. 13–19, out. 2013.

GUIMARÃES, P. R. B. **Métodos quantitativos estatísticos**. 2. ed. Curitiba [PR]: IESDE Brasill, 2018. v. 1

HAIDER, F.; DE LA FUENTE, S.; LUZ, S. **An Assessment of Paralinguistic Acoustic Features for Detection of Alzheimer's Dementia in Spontaneous Speech**. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, v. 14, p. 272–281, 2020.

HARRISON, Y.; HORNE, J. A. **Sleep Deprivation Affects Speech**. Sleep, v. 20, n. 10, p. 871–877, 1 out. 1997.

HAYASHI, M.; CHIKAZAWA, Y.; HORI, T. **Short nap versus short rest: recuperative effects during VDT work**. Ergonomics, v. 47, n. 14, p. 1549–1560, 1 nov. 2004.

HURSH, S. R. et al. **The Fatigue Avoidance Scheduling Tool: Modeling to Minimize the Effects of Fatigue on Cognitive Performance**. SAE Transactions, v. 113, p. 111–119, 2004.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. **Doc 9966: Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches**. Montreal, 2016. Disponível em: <[https://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/FRMS%20Tools/Doc%209966.FRM S.2016%20Edition.en.pdf](https://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/FRMS%20Tools/Doc%209966.FRM%20S.2016%20Edition.en.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2023

ISHII, A.; TANAKA, M.; WATANABE, Y. **Neural mechanisms of mental fatigue. Reviews in the Neurosciences**. v. 25, n. 4, p. 469–479, 2014.

JACKSON, C. A.; EARL, L. **Prevalence of fatigue among commercial pilots**. Occupational Medicine, v. 56, n. 4, p. 263–268, 1 jun. 2006.

JAKUBOVICZ, R. **Gagueira**. 6. ed. Rio de Janeiro: Revinter, 2009.

JIANG, Y. et al. **0218 Effects Of Sleep Deprivation And Recovery Sleep On Human Brain Network Organization**. Sleep, v. 41, n. suppl_1, p. A85–A86, 27 abr. 2018.

KAIDA, K. et al. **Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables**. Clinical Neurophysiology, v. 117, n. 7, p. 1574–1581, 2006.

KHAROUFAH, H. et al. **A review of human factors causations in commercial air transport accidents and incidents: From to 2000–2016**. Progress in Aerospace Sciences, v. 99, p. 1–13, 1 maio 2018.

KHAWAJA, M. A.; RUIZ, N.; CHEN, F. **Think before you talk: An empirical study of relationship between speech pauses and cognitive load**. Proceedings of the 20th Australasian Conference on Computer-Human Interaction: Designing for Habitus and Habitat, OZCHI'08, p. 335–338, 2008.

KIM, D.-J. et al. **The Effect of Total Sleep Deprivation on Cognitive Functions in Normal Adult Male Subjects**. International Journal of Neuroscience, v. 109, n. 1–2, p. 127–137, 1 jan. 2001.

KINOSHITA, C. et al. **MicroRNA: A Key Player for the Interplay of Circadian Rhythm Abnormalities, Sleep Disorders and Neurodegenerative Diseases**. Clocks & Sleep, v. 2, n. 3, p. 282–307, 2020.

- KRAJEWSKI, J. et al. **Estimating Fatigue from Predetermined Speech Samples Transmitted by Operator Communication Systems**. Proceedings of the 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design: Driving Assessment 2009, v. 5, n. 2009, p. 468–474, 9 out. 2009.
- LEVELT, W. J. M. **Speaking: From intention to articulation**. MIT Press, 1993.
- LICATI, P. R. et al. **Ferramenta de apoio ao gerenciamento de risco da fadiga para pilotos da aviação comercial brasileira**. Conexão Sipaer, v. 1, p. 112–126, 2010.
- LICATI, P. R. et al. **Correlação dos prognósticos do programa FAST com relatos de fadiga de pilotos da aviação civil brasileira**. Revista Conexão Sipaer, v. 6, n. 1, p. 7–17, 2015.
- LIMA, P. L. C.; FRANÇOZO, E. **Memória de trabalho e produção oral da linguagem**. Cadernos de Estudos Linguísticos, v. 40, n. 0, p. 93–106, 10 ago. 2011.
- MACGREGOR, L. J.; CORLEY, M.; DONALDSON, D. I. **Listening to the sound of silence: disfluent silent pauses in speech have consequences for listeners**. Neuropsychologia, v. 48, n. 14, p. 3982–3992, 2010.
- MACHADO, T. H. **Organização Temporal na fala disártrica - Comparação entre populações com distúrbios nos núcleos da base**. Tese de Doutorado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- MANSUR, L. L.; RADANOVIC, M. **Neurolingüística: princípios para a prática clínica**. São Paulo: EI- Edições Inteligentes, 2004.
- MARTINS, V. DE O.; ANDRADE, C. R. F. DE. **Perfil evolutivo da fluência da fala de falantes do português brasileiro**. Pró-Fono Revista de Atualização Científica, v. 20, n. 1, p. 7–12, mar. 2008.
- MASSINI-CAGLIARI, G.; CAGLIARI, L. C. **Fonética**. In: MUSSALIM, F.; BENTES, A. C. (Eds.). Introdução à Linguística: domínios e fronteiras. 6ed. ed. São Paulo: Cortez, 2006.
- MELLO, M. T. DE et al. **Relationship between Brazilian airline pilot errors and time of day**. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v. 41, n. 12, p. 1129–1131, dez. 2008.
- MERLO, S. **Hesitações na fala semi-espontânea: análise por séries temporais**. Dissertação—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- MERLO, S. **Dinâmica temporal de pausas e hesitações na fala semi-espontânea**. Tese de Doutorado—Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- MERLO, S.; BARBOSA, P. A. **Séries temporais de pausas e de hesitações na fala espontânea**. Cadernos de Estudos Linguísticos, v. 54, n. 1, p. 11–24, 2012.
- MONTACIE, C.; CARATY, M.-J. **High-level speech event analysis for cognitive load classification**. Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH, p. 731–735, 1 jan. 2014.

MÜLLER, C. et al. **Recognizing time pressure and cognitive load on the basis of speech: An experimental study**. Lecture Notes in Computer Science, v. 2109, 2001.

OKECHUKWU, C. E. **The neurophysiologic basis of the human sleep–wake cycle and the physiopathology of the circadian clock: a narrative review**. The Egyptian Journal of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery, v. 58, n. 1, p. 34, 2022.

OLIVEIRA, A. M. DO C. C. DE et al. **O que fonoaudiólogos e estudantes de fonoaudiologia entendem por fluência e disfluência**. Revista CEFAC, v. 9, n. 1, p. 40–46, mar. 2007.

OOMEN, C. C. E.; POSTMA, A. **Effects of Divided Attention on the Production of Filled Pauses and Repetitions**. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, v. 44, n. 5, p. 997–1004, out. 2001.

PAKHOMOV, S. V. S.; MARINO, S. E.; BIRNBAUM, A. K. **Quantification of speech disfluency as a marker of medication-induced cognitive impairment: An application of computerized speech analysis in neuropharmacology**. Computer Speech and Language, v. 27, n. 1, 2013.

PASTORIZA-DOMÍNGUEZ, P. et al. **Speech pause distribution as an early marker for Alzheimer’s disease**. Speech Communication, v. 136, 2022.

PELLEGRINO, P.; MARQUEZE, E. C. **Aspects of work and sleep associated with work ability in regular aviation pilots**. Revista de Saúde Pública, v. 53, p. 16, 30 jan. 2019.

PINTO, J. C. B. R.; SCHIEFER, A. M.; ÁVILA, C. R. B. DE. **Disfluências e velocidade de fala em produção espontânea e em leitura oral em indivíduos gagos e não gagos**. Audiology - Communication Research, v. 18, n. 2, p. 63–70, 2013.

PISTONO, A. et al. **Pauses during Autobiographical Discourse Reflect Episodic Memory Processes in Early Alzheimer’s Disease**. Journal of Alzheimer’s Disease, v. 50, n. 3, 2016.

POTAGAS, C. et al. **Silent Pauses and Speech Indices as Biomarkers for Primary Progressive Aphasia**. Medicina (Lithuania), v. 58, n. 10, 2022.

RODRIGUES, T. E. et al. **Seasonal variation in fatigue indicators in Brazilian civil aviation crew rosters**. Revista Brasileira de Medicina do Trabalho, v. 18, n. 1, p. 2–10, 16 jul. 2020.

RODRIGUES, T. E.; FAZÃO, A.; FISCHER, F. M. **Fadigômetro - Projeto de pesquisa sobre o estado de alerta e fadiga das tripulações da aviação civil brasileira**. Disponível em: <<https://www.fadigometro.com.br>>. Acesso em: 31 ago. 2023.

RUAN, W.; YUAN, X.; ELTZSCHIG, H. K. **Circadian rhythm as a therapeutic target**. Nature Reviews Drug Discovery, v. 20, n. 4, p. 287–307, 2021.

SALIHU, A. T.; HILL, K. D.; JABERZADEH, S. **Neural mechanisms underlying state mental fatigue: a systematic review and activation likelihood estimation meta-analysis**. Reviews in the Neurosciences. v. 33, n. 8, p. 889–917, 2022.

SALLINEN, M. et al. **Self-reported reasons for on-duty sleepiness among commercial airline pilots**. *Chronobiology International*, v. 38, n. 9, 2021.

SAMN, S.; PERELLI, L. P. **Estimating Aircrew Fatigue: A Technique with Application to Airlift Operations**. *USAF School of Aerospace Medicine*, p. 1–29, 1982.

SHAHID, A.; SHEN, J.; SHAPIRO, C. M. **Measurements of sleepiness and fatigue**. *Journal of Psychosomatic Research*, v. 69, n. 1, p. 81–89, 2010.

SHEN, J.; BARBERA, J.; SHAPIRO, C. M. **Distinguishing sleepiness and fatigue: Focus on definition and measurement**. *Sleep Medicine Reviews*, 2006.

SIMONYAN, K.; HORWITZ, B. **Laryngeal motor cortex and control of speech in humans**. *Neuroscientist*, v. 17, n. 2, 2011.

TEIXEIRA, L. R. et al. **Sleep and Sleepiness among Working and Non-Working High School Evening Students**. *Chronobiology International*, v. 24, n. 1, p. 99–113, 2007.

TREJO, L. J. et al. **EEG-Based Estimation and Classification of Mental Fatigue**. *Psychology*, v. 06, n. 05, p. 572–589, 2015.

VALENTE, P. M. C. **Aspectos prosódicos da leitura oral**. *Dissertação—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais*, 2003.

VASCONCELOS, C. A. DE et al. **Speech Analysis for Fatigue and Sleepiness Detection of a Pilot**. *Aerospace Medicine and Human Performance*, v. 90, n. 4, p. 415–418, 1 abr. 2019.

VASCONCELOS, C. A. DE. **Fadiga e sonolência em aviadores: análise de variações da voz, fala e linguagem**. *Tese de Doutorado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais*, 5 dez. 2019.

VIEIRA, S. **Introdução a Bioestatística**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2008.

VOGEL, A. P.; FLETCHER, J.; MARUFF, P. **Acoustic analysis of the effects of sustained wakefulness on speech**. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 128, n. 6, p. 3747–3756, 1 dez. 2010.

WANG, D.; NARAYANAN, S. S. **Robust Speech Rate Estimation for Spontaneous Speech**. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, v. 15, n. 8, p. 2190–2201, nov. 2007.

WARTHE, A. B.; SHARMA, V. **Changes in speech and voice characteristics following two hours and eight hours of acute sleep deprivation**. *Indian Journal of Aerospace Medicine*, v. 66, p. 15–20, 2022.

WEN, C. C. Y. et al. **Fatigue and Sleep in Airline Cabin Crew: A Scoping Review**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 3, p. 2652, 1 fev. 2023.

WINGELAAR-JAGT, Y. Q. et al. **Fatigue in Aviation: Safety Risks, Preventive Strategies and Pharmacological Interventions**. *Frontiers in Physiology*, v. 12, 6 set. 2021.

WOLTERS, M. K. et al. **Prosodic and Linguistic Analysis of Semantic Fluency Data: A Window into Speech Production and Cognition**. *Interspeech 2016*, p. 2085–2089, 8 set. 2016.

WU, N.; SUN, J. **Fatigue Detection of Air Traffic Controllers Based on Radiotelephony Communications and Self-Adaption Quantum Genetic Algorithm Optimization Ensemble Learning**. *Applied Sciences*, v. 12, n. 20, 2022.

YANG, S. et al. **The physical significance of acoustic parameters and its clinical significance of dysarthria in Parkinson's disease**. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 2020.

YIN, B.; CHEN, F. **Towards Automatic Cognitive Load Measurement from Speech Analysis**. In: JACKO, J. A. (Ed.). *Human-Computer Interaction. Interaction Design and Usability*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. v. 4550p. 1011–1020.

GLOSSÁRIO

Taxa de Elocução: refere-se à velocidade da fala, medida em sílabas por segundo.

Taxa de Articulação: refere-se à velocidade de articulação, excluindo-se as pausas e sílabas disfluentes, medida em sílabas por segundo.

Taxa Total de Pausas: representa qualquer interrupção na fala, fluente ou disfluente. Obtida pelo número total de pausas dividido pelo tempo total da fala, medida em número de pausas por segundo.

Taxa de Pausas Demarcativas: número de pausas com função demarcativa (fluentes) dividido pelo tempo total da fala;

Taxa de Pausas Hesitativas (preenchidas): pausas hesitativas preenchidas com “*éeh, ãn, huum...*”. Obtida pelo número de pausas dividido pelo tempo total da fala. Medida em número de pausas por segundo.

Taxa de Pausas Hesitativas (silenciosas): pausas que apresentaram indícios de hesitação, seja pela duração ou pela sua posição no enunciado. Obtida pela subtração da taxa de pausa hesitativa preenchida da taxa de hesitação e disfluências. Medida em número de pausas por segundo.

Taxa de Hesitação e Disfluências: representa as interrupções na fala que alteram a prosódia e

Porcentagem de Disfluência da fala: divisão do número de hesitações/disfluências pelo número de sílabas fluentes, multiplicado por 100;

Porcentagem de Pausas na fala: divisão do tempo total de todas as pausas (demarcativas e hesitativas/disfluentes) pelo tempo total da fala; multiplicado por 100;

Duração média das Pausas (DMP): divisão do tempo de todas as pausas pelo número de pausas.

APÊNDICE A – RESULTADOS COMPLEMENTARES

Apresentamos nesta seção detalhes de análises estatísticas realizadas com os resultados do SAFTE-FAST que não apresentaram relevância estatística.

Não foram encontradas correlações significativas entre os dados de efetividade e reservatório de sono gerados pelo *software* SAFTE-FAST e as escalas psicométricas no dia de folga, conforme demonstrado na Tabela 6, nem com as variáveis de fala (Tabela 7 e 8).

Tabela 6 - Correlação SAFTE-FAST x Escalas psicométricas – Dia de Folga (n=24)

		Karolinska	Samn-Perelli
ρ	Efetividade		
	Correlações de coeficiente	-0,272	-0,175
	Valor p	0,199	0,413
	ReservSono		
	Correlações de coeficiente	-0,358433	-0,14589561
	Valor p	0,085	0,496

Tabela 7 – Correlação SAFTE-FAST x Fala – Dia de Trabalho (n=24)

		TxEloc	TxArtic	TxTotalPausas (todas)	TxHesitDisflu	%DisfluFala	%PausasFala (todas)
ρ	Efetividade						
	Correlações de coeficiente	-0,169	-0,167	0,032	-0,004	0,027	0,075
	Valor p	0,429	0,437	0,881	0,984	0,900	0,728
	ReservSono						
	Correlações de coeficiente	-0,297	-0,097	0,210	0,212	0,291	0,262
	Valor p	0,159	0,652	0,325	0,320	0,168	0,216

Tabela 8 - Correlação SAFTE-FAST x Fala - Dia de Folga (n=24)

		TxEloc	TxArtic	TxTotalPausas (todas)	TxHesitDisflu	%DisfluFala	%PausasFala (todas)
p	Efetividade						
	Correlações de coeficiente	0,073	-0,152	0,015	0,121	0,138	-0,100
	Valor p	0,736	0,479	0,944	0,574	0,521	0,642
	ReservSono						
	Correlações de coeficiente	0,204	-0,089	-0,017	0,088	0,013	-0,223
	Valor p	0,338	0,680	0,937	0,682	0,952	0,294

ANEXO A – INSTRUMENTOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Escala de Fadiga de Samn-Perelli:

ESCALA DE FADIGA DE SAMN-PERELLI		
FORMULÁRIO DE PREENCHIMENTO		
Nome:		Nº Registro ANAC:
Nº Coleta:	Data / Hora da Coleta:	A coleta está sendo realizada em um: <input type="checkbox"/> Dia de folga <input type="checkbox"/> Dia de trabalho
Assinale a sentença que descreve como você está se sentindo nesse exato momento :		
Opção	Descrição	
	1. Totalmente alerta, bem desperto, extremamente disposto	
	2. Muito ativo, responsivo, mas não em nível máximo	
	3. Bem, relativamente revigorado	
	4. Um pouco cansado, não totalmente disposto	
	5. Moderadamente cansado, enfraquecido	
	6. Muito cansado, com dificuldade de concentração	
	7. Completamente exausto, incapaz de trabalhar efetivamente	

Escala de Sonolência de Karolinska:

ESCALA DE SONOLÊNCIA DE KAROLINSKA		
FORMULÁRIO DE PREENCHIMENTO		
Nome:		Nº Registro ANAC:
Nº Coleta:	Data / Hora da Coleta:	A coleta está sendo realizada em um: <input type="checkbox"/> Dia de folga <input type="checkbox"/> Dia de trabalho
Como estou me sentindo agora? Pode-se marcar qualquer um dos valores de 1 a 9 (não apenas aquele que apresentem descrições), sendo que os que estão sem descrição são estágios intermediários.		
Opção	Descrição	
	1. Extremamente alerta.	
	2.	
	3. Alerta	
	4.	
	5. Nem sonolento, nem alerta.	
	6.	
	7. Sonolento, mas sem dificuldade para permanecer acordado.	
	8.	
	9. Extremamente sonolento, lutando contra o sono.	

Questionário de coleta:

QUESTIONÁRIO DA PESQUISA		
NOME:		Nº REGISTRO ANAC:
Nº COLETA:	DATA E HORA DA COLETA:	A COLETA ESTÁ SENDO REALIZADA EM UM: <input type="checkbox"/> DIA DE DESCANSO <input type="checkbox"/> DIA DE PROVA
HISTÓRICO DO SONO		
Informe os horários que você dormiu e acordou nas três últimas principais oportunidades que você teve:		
ÚLTIMA OPORTUNIDADE DE SONO		
Dia da semana:	A que horas você dormiu:	A que horas você acordou:
Qualidade do sono:	<input type="checkbox"/> Excelente <input type="checkbox"/> Bom <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim	
PENÚLTIMA OPORTUNIDADE DE SONO		
Dia da semana:	A que horas você dormiu:	A que horas você acordou:
Qualidade do sono:	<input type="checkbox"/> Excelente <input type="checkbox"/> Bom <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim	
ANTEPENÚLTIMA OPORTUNIDADE DE SONO		
Dia da semana:	A que horas você dormiu:	A que horas você acordou:
Qualidade do sono:	<input type="checkbox"/> Excelente <input type="checkbox"/> Bom <input type="checkbox"/> Regular <input type="checkbox"/> Ruim	
QUESTIONÁRIO		
1. Qual o horário da primeira coleta no dia de trabalho?		
2. Qual a classificação de sua empresa?		
3. Tipo de aeronave:		
4. Função:		
5. Idade:		
6. Escolaridade:		
7. Marca e modelo do celular usado para gravar o áudio:		
8. Tipo de tripulação:		
9. Quantos dias de programação?		
ATIVIDADE FÍSICA		
Você pratica atividade física? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não		
Se sim, com que frequência? (por semana) <input type="checkbox"/> 1 a 2 dias <input type="checkbox"/> 3 a 5 dias <input type="checkbox"/> 6 a 7 dias		
Praticou no dia da coleta? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não		
Fez uso de alguma das seguintes substâncias no dia da coleta? (mais de uma opção pode ser marcada)		
<input type="checkbox"/> Cafeína		
<input type="checkbox"/> Energéticos		
<input type="checkbox"/> Chocolate		
<input type="checkbox"/> Outras substâncias estimulantes. Informe quais:		