.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

Inducción de Estrés Fisiológico Mediante Realidad Virtual en Entornos Controlados

Nombre del alumno:	Ing. Miguel Ángel Hernández Marín
Director de tesis:	Dr. Jorge Rodríguez Arce
Codirector de tesis:	Dr. Giorgio Mackenzie Cruz Martínez
Tutor Adjunto:	Dra. Adriana Herlinda Vilchis González
Línea de Acentuación:	*Dinámica de Sistemas de Control*

Resumen

El estrés es una respuesta fisiológica y psicológica ante estímulos externos que, en niveles elevados o prolongados, puede afectar negativamente la salud y el rendimiento de los individuos. La Realidad Virtual (RV) ha surgido como una herramienta innovadora para inducir estrés de forma controlada en entornos seguros y replicables. Este estudio tiene como objetivo desarrollar un sistema de RV capaz de inducir estrés mediante la integración de estresores visuales y auditivos, y medir sus efectos mediante indicadores fisiológicos y psicológicos.

Se diseñaron tres entornos virtuales: uno de familiarización, otro neutro sin estresores y un tercero con estresores visuales y auditivos, para evaluar las respuestas de los participantes. La medición del estrés se realiza mediante la fotopletismografía (PPG) para obtener la variabilidad de la frecuencia del pulso (PRV),una medida que estima la variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV), así como cuestionarios estandarizados para evaluar la percepción subjetiva del estrés.

La metodología incluye la investigación del estado del arte, el diseño del sistema de RV, la experimentación con participantes y la validación de los resultados. Los hallazgos de este estudio contribuirán al desarrollo de nuevas aplicaciones basadas en tecnologías emergentes, como la RV, en la evaluación y el manejo del estrés, con posibles aplicaciones en ámbitos como la salud, la psicología y el entrenamiento profesional.

Índice general

Resumen 2

Acrónimos 10

1. Introducción **12**

1.1. Planteamiento del problema 12

1.2. Justificación 13

1.3. Hipótesis 15

1.4. Objetivos 15

1.4.1. Objetivo general 15

1.4.2. Objetivos específicos 15

1.5. Alcances y limitaciones 16

1.5.1. Alcances 16

1.5.2. Limitaciones 16

2. Antecedentes **18**

2.1. Marco Teórico 18

2.1.1. Estrés 18

2.1.2. Fisiología del estrés 18

2.1.3. Medición del estrés 19

2.1.4. Variabilidad de la frecuencia cardiaca, un indicador de estrés 21

2.1.5. Fotopletismografía 21

2.1.6. La PRV como indicador indirecto de la HRV 22

2.1.7. Medición de PRV mediante PPG 23

2.1.8. Herramientas para inducción de estrés 24

2.1.9. RV como herramienta para inducción de estrés 25

2.1.10. Ansiedad estado y rasgo: fundamentos y relación con el desempeño 26

2.1.11. Estado del arte 27

3. Metodología **37**

3.1. Desarrollo del sistema 39

3.1.1. Primera Etapa: selección de la muestra y especificaciones de diseño del sistema . . . 40
3.1.2. Segunda etapa: diseño de entornos virtuales . . . 42
3.1.3. Tercera etapa: integración PPG-RV . . . 46
3.1.4. Cuarta etapa: experimentación . . . 49
3.1.5. Quinta etapa: adquisición, procesamiento y análisis integral de datos 53
3.2. Análisis estadístico . . . 58

4. Resultados y discusión 62

4.1. Relación entre objetos recolectados y estrés percibido . . . 63
4.1.1. Comparación del desempeño entre escenarios . . . 65
4.1.2. Métricas de desempeño . . . 66
4.1.3. Análisis individual integrado: estrés percibido, desempeño y ansiedad 67
4.2. Resultados psicológicos y de desempeño . . . 70
4.2.1. Cambios en ansiedad estado según ansiedad rasgo . . . 70
4.2.2. Visualización de cambios individuales y distribuciones . . . 71
4.2.3. Relación entre ansiedad estado y desempeño . . . 72
4.2.4. Síntesis de resultados . . . 74
4.3. Resultados de análisis de señal de PPG . . . 74
4.3.1. Resutados de variabilidad individual . . . 76
4.3.2. Resultados del análisis espectral de IPI . . . 77
4.3.3. Visualización de cambios individuales (gráficas de pendiente) . . . 79
4.4. Síntesis de hallazgos cruzados . . . 83
4.5. Discusión . . . 85
4.5.1. Respuestas psicológicas: ansiedad estado y rasgo . . . 85
4.5.2. Relación entre ansiedad y desempeño . . . 85
4.5.3. Respuestas fisiológicas: análisis de señal PPG . . . 86
4.5.4. Relación entre estrés percibido y movilidad en entornos virtuales . . 86
4.5.5. Implicaciones y consideraciones metodológicas . . . 88
4.5.6. Perspectivas futuras . . . 88

5. Conclusiones **89**

5.1. Trabajos futuros 90

Agradecimientos **92**

6. Referencias **93**

A. Formato de registro de participantes **105**

B. Aprobación ética del estudio **106**

C. Carta de consentimiento informado **107**

D. Cuestionario de salud general **111**

E. Cuestionarios subjetivos tipo Likert **112**

F. Script MATLAB para Procesamiento de señal PPG **115**

G. Script MATLAB para Procesamiento de IDARE **124**

H. Script MATLAB para análisis espectral **127**

I. Script MATLAB para slope plots **132**

J. Script MATLAB para métricas conductuales **135**

Índice de cuadros

2.1. Características y técnicas para inducir estrés mediante RV. 35

3.1. Fragmento de los datos registrados en formato CSV para el participante 4 durante el escenario neutro. 54

4.1. Correlaciones entre objetos recolectados y estrés percibido 63

4.2. Participantes con alto estrés percibido (4) y bajo desempeño (objetos recolectados $\leq$ mediana) en el Escenario 2 65

4.3. Comparación del desempeño (objetos recolectados) entre Escenario Neutral y Escenario de Estrés 66

4.4. Cambios individuales en estrés percibido y distancia recorrida entre el escenario neutro (E1) y el escenario con estresores (E2). 68

4.5. Métricas de desempeño: comparación entre Escenario Neutral (E1) y Escenario de Estrés (E2). 69

4.6. Correlaciones entre desempeño (E2–E1) y Ansiedad Estado (AE2–AE1). . 69

4.7. Promedio del cambio en ansiedad estado (AE2 - AE1) por grupo de ansiedad rasgo 71

4.8. Resultados de la prueba de Wilcoxon (AE1 vs AE2) por grupo de ansiedad rasgo 71

4.9. Resultados de las Pruebas Estadísticas para Métricas de PRV (SE vs. SN) 75

4.10. Sensibilidad al estrés por sujeto (SN vs. SE) - Métricas temporales de PRV 77

4.11. Resultados del análisis espectral de IPI: potencia absoluta (ms^2) y razón LF/HF por sujeto en los escenarios SN y SE. La última columna indica si el cambio relativo en LF/HF entre escenarios supera el 10 %. 78

4.12. Resumen cruzado de hallazgos: ansiedad, desempeño y señales fisiológicas . 84

Índice de figuras

2.1. Ejemplo del efecto de la luz que incide en la piel para la adquisició de señales de PPG tipo reflectivo. Imagen propia. 22
2.2. Sistema de RV de comité frente a un participante, (Liu & Zhang, 2020). . . 28
2.3. Interfaz de selección de escenarios, (Jin et al., 2023). 29
2.4. a) sistema de RV, aula no biofílica, b) sistema de RV, aula biofílica,(Yin et al., 2018). 29
2.5. Figura 5. a) sistema de RV de aula reducida. b) sistema de RV de aula grande con ventana, (Cha, 2023). 30
2.6. Representación de sistema de RV construido. b) Representación de sistema de RV natural, (Chen et al., 2024). 31
2.7. a) Imagen de video de RV. b) Instantánea de sesión de retroalimentación,(H. Kim, Kim et al., 2021). 32
2.8. Estructura del sistema propuesto, (Mateos-García et al., 2023). 33
2.9. Vista del sistema de RV de terapia de exposición donde se expone información de biofeedback, (Rahman et al., 2023). 33
2.10. Implementación del Biofeedback como modulación de la visión periférica,(Michela et al., 2022). 34
2.11. Audiencia virtual, (Slater et al., 1999). 34

3.1. Diagrama de flujo de la metodología general empleada en el desarrollo del estudio. 38
3.2. Diagrama de flujo del proceso de desarrollo del sistema experimental utilizado para la implementación de los escenarios de realidad virtual y la adquisición de datos fisiológicos. 39
3.3. Colorimetría del entorno con estresores. La paleta gris-azul refuerza la sensación de aislamiento, mientras que los engranajes dorados generan un contraste motivacional. 43
3.4. Interfaz de usuario: visualización simultánea del tiempo transcurrido, frecuencia cardíaca y objetos restantes. 44

3.5. Trayectoria 3D del participante 4 en el escenario neutro. Se indican los puntos críticos del recorrido y las zonas de interacción. 45
3.6. Diagrama a bloques del sistema electrónico para adquisición de la señal de PPG. Imagen propia. 47
3.7. Representación de participante equipado con gafas de RV y controles en sala experimental. 49
3.8. Región contemplada para la adquisición de la señal de PPG. 51

4.1. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el estrés percibido y el desempeño en la recolección de objetos en entorno virtual (Escenario E2). La línea sólida representa la regresión lineal, mientras que el área sombreada indica el intervalo de confianza del 95 %. 64
4.2. Diferencia promedio de ansiedad estado (AE2 - AE1) por grupo de ansiedad rasgo. 71
4.3. Cambio individual en los puntajes de ansiedad estado (AE1 y AE2) por nivel de ansiedad rasgo. 72
4.4. Distribución de puntajes de IDARE Estado (AE1 y AE2) por nivel de ansiedad rasgo. 72
4.5. Relación entre cambio en ansiedad estado (ΔAE) y cambio en desempeño (ΔE) por grupo de ansiedad rasgo. 73
4.6. Distribución del cambio en desempeño (ΔE) según nivel de ansiedad rasgo. 73
4.7. Densidad espectral de potencia (PSD) de los intervalos entre pulsos (IPI) para el sujeto ID4 en la ventana única (5–10 min). Las curvas muestran las diferencias en la distribución de potencia entre los escenarios sin estrés (SN, azul) y con estrés (SE, rojo) en las bandas LF (0.04–0.15 Hz) y HF (0.15–0.4 Hz). 79
4.8. Cambios individuales del RMSSD (ms) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). Las líneas rojas indican un aumento, las azules una disminución, y las grises un cambio insignificante de SN a SE. 80

4.9. Cambios individuales de la Frecuencia Cardíaca Media (lpm) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). Las líneas rojas indican un aumento, las azules una disminución, y las grises un cambio insignificante de SN a SE. 80
4.10. Cambios individuales de la Desviación Estándar de IBI (ms) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). 81
4.11. Cambios individuales del Coeficiente de Variación (%) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). 81
4.12. Cambios individuales del Ratio LF/HF de los IBI entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). Las líneas rojas indican un aumento, las azules una disminución, y las grises un cambio insignificante de SN a SE. . 82
4.13. Cambios individuales de la Potencia LF (ms^2) de los IBI entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). 82
4.14. Cambios individuales de la Potencia HF (ms^2) de los IBI entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). 83

Acrónimos

BAI. Inventario de Ansiedad de Beck (Beck Anxiety Inventory).

BDI. Inventario de Depresión de Beck (Beck Depression Inventory).

CBT. Prueba de Bloques de Corsi (Corsi Block Test).

DCCS. Tarea de Clasificación de Tarjetas de Cambio Dimensional (Dimensional Change Card Sort).

DCE. Experimento de Elección Discreta (Discrete Choice Experiment).

ECG. Electrocardiograma.

EEG. Electroencefalografía.

EF. Funciones Ejecutivas.

EMG. Electromiografía.

EVA. Escala Analógica Visual.

FC. Frecuencia Cardíaca.

FPS. Cuadros por Segundo (Frames Per Second).

GSR. Respuesta Galvánica de la Piel.

HCI. Interacción Humano-Computadora (Human-Computer Interaction).

HF. Alta Frecuencia (High Frequency).

HMD. Dispositivos Montados en la Cabeza (Head-Mounted Displays).

HR/BVP. Frecuencia Cardíaca/Presión de los Vasos Sanguíneos (Heart Rate/Blood Volume Pulse).

HRV. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (Heart Rate Variability).

IBI. Intervalo entre Latidos (Inter-Beat Interval).

IDARE. Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo.

IPI. Intervalo entre Pulsos (Inter-Pulse Interval).

LF. Baja Frecuencia (Low Frequency).

LF/HF. Relación de bandas de frecuencia baja y alta.

MAST. Prueba de Estrés Agudo de Maastricht (Maastricht Acute Stress Test).

ML. Aprendizaje Automático (Machine Learning).

PA. Presión Arterial.

PANAS. Escalas de Afecto Positivo y Negativo (Positive and Negative Affect Schedule).

PHQ. Cuestionario de Salud del Paciente (Patient Health Questionnaire).

POMS. Perfil de Estados de Ánimo (Profile of Mood States).

PPG. Fotopletismografía.

PRV. Variabilidad de la Frecuencia del Pulso (Pulse Rate Variability).

PSD. Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density).

PSS. Escala de Estrés Percibido (Perceived Stress Scale).

RMSSD. Raíz Cuadrada de la Media de las Diferencias Sucesivas (Root Mean Square of Successive Differences).

RV. Realidad Virtual.

SCSQ. Cuestionario Simplificado de Estrés y Afrontamiento (Simplified Coping Style Questionnaire).

SDNN. Desviación Estándar de los Intervalos Normales (Standard Deviation of Normal-to-Normal Intervals).

SECPT. Prueba de Estimulación por Frío (Socially Evaluated Cold Pressor Test).

SNA. Sistema Nervioso Autónomo.

SRRS. Escala de Reajuste Social (Social Readjustment Rating Scale).

STAI. Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo (State-Trait Anxiety Inventory).

SXE. Ansiedad Estado (en el contexto del IDARE).

SXR. Ansiedad Rasgo (en el contexto del IDARE).

TSST. Prueba de Estrés Social de Trier (Trier Social Stress Test).

VLF. Muy Baja Frecuencia (Very Low Frequency).

VR. Realidad Virtual.

Capítulo 1
Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Las nuevas generaciones enfrentan niveles cada vez mayores de estrés en diversos ámbitos, como el laboral, el familiar y el social. Este estrés puede derivar de múltiples fuentes, entre ellas exigencias profesionales, responsabilidades personales y presiones sociales. Es bien sabido que el estrés prolongado puede desencadenar una serie de trastornos fisiológicos como colitis, gastritis, taquicardia, insomnio, dolores de cabeza, y en casos extremos, úlceras estomacales o desmayos (Zafar, 2021).

Monitorear los niveles de estrés en individuos es fundamental para mejorar su bienestar general, ya que una exposición prolongada puede llevar a problemas graves de salud mental, como ansiedad y depresión (Iqbal, 2024). Sin embargo, los sistemas actuales para medir el estrés presentan limitaciones para proporcionar datos precisos y confiables. El problema central radica en la falta de métodos eficaces para inducir estrés en un entorno controlado. Tanto los métodos de medición de estrés invasivos como los no invasivos pueden generar respuestas de estrés adicionales durante la medición, afectando la precisión de los resultados (Jiang, 2015). Por otro lado, los métodos subjetivos, como autorreportes y entrevistas clínicas, presentan limitaciones significativas, ya que dependen de la percepción, la sinceridad y la interpretación del individuo (Rauch & Foa, 2006).

Además, los métodos actuales para inducir estrés a menudo no logran reproducir situaciones reales que las personas enfrentan en su vida cotidiana, lo que limita su aplicabilidad. La implementación de la RV como herramienta para inducir estrés en un entorno controlado se presenta como una alternativa innovadora y prometedora (Martens et al., 2019), (Hanshans et al., 2024), (Shirtcliff et al., 2024). La RV tiene la capacidad de simular escenarios realistas de forma segura y personalizada, ofreciendo un medio eficaz para investigar, medir y manejar el estrés en la vida diaria (Diemer et al., 2015).

1.2. Justificación

El estrés afecta a la población en todo el mundo, impactando la salud mental y el bienestar debido a presiones laborales, personales y la incertidumbre sobre el futuro. Evaluar el estrés con precisión es fundamental para desarrollar intervenciones efectivas. Tradicionalmente, la inducción y medición del estrés se han basado en métodos subjetivos, como cuestionarios y pruebas psicológicas, que presentan limitaciones debido a su dependencia de la percepción personal, el sesgo y la variabilidad individual (Dorsey et al., 2022), (Weckesser et al., 2019), (Thoen et al., 2023).

Los métodos tradicionales incluyen pruebas de desempeño bajo presión, exposición a ruidos molestos y situaciones sociales estresantes. Aunque estos enfoques son útiles, a menudo carecen de control sobre la intensidad y duración de los estresores, y los escenarios no siempre son replicables, incluso en entornos controlados. La variabilidad en la administración y la respuesta a estos estresores puede afectar la fiabilidad y la validez de los resultados (Schwabe & Schächinger, 2018), (H. Ernst et al., 2023), (Mishra et al., 2020) .

La RV emerge como una solución al permitir la inclusión de diversos estresores que generan experiencias inmersivas y adaptables. Estos estresores pueden ser visuales, como escenarios amenazantes o entornos de alta presión; sonoros, como ruidos molestos o sonidos ambientales; físicos, como simulaciones de espacios confinados o cambios en la gravedad; psicológicos, como desafíos cognitivos, interacciones sociales conflictivas o situaciones de incertidumbre; e incluso relacionados con el tiempo, como la presión por completar tareas rápidamente o ser interrumpido con frecuencia. La combinación de estos elementos posibilita el diseño de experiencias personalizables y controladas, que no solo replican situaciones específicas de estrés, sino que también permiten ajustar la intensidad para satisfacer objetivos investigativos o terapéuticos.

Además, la RV ofrece ventajas sobre los métodos tradicionales, como el control preciso del entorno y la capacidad de replicar escenarios estresantes de manera consistente, lo que contribuye a una evaluación más detallada y eficiente del estrés.

Los entornos virtuales son replicables, lo que mejora la fiabilidad y la consistencia

de los estudios. Además, la RV proporciona un entorno seguro y controlado, evitando los riesgos físicos y emocionales asociados con situaciones reales (Freeman et al., 2017), (Maples-Keller et al., 2017). Al combinarse con tecnologías de medición fisiológica, la RV ofrece datos cuantitativos sobre la respuesta al estrés, superando las limitaciones de los métodos subjetivos. También permite una gran flexibilidad y adaptabilidad, ajustando los escenarios en tiempo real para satisfacer las necesidades del estudio o del tratamiento, lo cual no es posible con los métodos tradicionales. En términos prácticos, la RV ofrece una herramienta tanto para la investigación como para la terapia. Permite estudiar con precisión el impacto de distintos estresores en un entorno controlado y seguro. Los estresores cognitivos, como las tareas de alta carga mental o de desempeño bajo presión, permiten evaluar la respuesta ante exigencias intelectuales o de tiempo limitado. Los estresores sensoriales o ambientales, como la exposición a ruidos molestos, variaciones lumínicas o entornos visualmente sobrecargados, facilitan el análisis del impacto de los estímulos externos sobre la activación fisiológica. Asimismo, los estresores sociales, que incluyen la interacción o la evaluación por parte de audiencias virtuales, reproducen condiciones de presión interpersonal y ansiedad de desempeño. Finalmente, los estresores físicos o viscerales, como la simulación de movimiento, el vértigo o el desequilibrio visual-vestibular, permiten explorar la relación entre el cuerpo y la respuesta autonómica ante condiciones adversas. Esta variedad de estresores hace que la RV constituya una plataforma precisa, reproducible y segura para inducir y analizar respuestas al estrés tanto en contextos experimentales como en contextos clínicos. Los resultados de esta investigación aportaron evidencia científica sobre la efectividad de la RV como herramienta para inducir estrés en entornos controlados y repetibles, lo que permitirá estudiar, con datos objetivos, el impacto de estresores auditivos y visuales en el estrés percibido y la respuesta fisiológica del sujeto. El balance riesgo-beneficio de este estudio es favorable, ya que los riesgos para la población experimental son mínimos sin dañar la integridad física y/o mental de cada participante. Los beneficios que se proponen servirán para el avance en el desarrollo de herramientas innovadoras y escenarios repetibles para la investigación del estrés. El impacto social radica en que estos hallazgos podrían aplicarse al diseño de nuevas técnicas de identificación o de atención para el manejo del estrés mediante la RV.

1.3. Hipótesis

La exposición a entornos de RV diseñados con estresores visuales y auditivos produce variaciones fisiológicas significativas asociadas al estrés, cuantificables mediante métricas de variabilidad del pulso cardíaco obtenidas por fotopletismografía.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el impacto combinado de estresores visuales y auditivos en entornos de RV sobre la inducción de estrés, mediante la medición y el análisis estadístico de indicadores fisiológicos y psicológicos en los participantes.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar escenarios de realidad virtual con diferentes niveles de estresores visuales y auditivos mediante parámetros controlados, para analizar su efecto en la inducción de estrés en los participantes.
- Medir las respuestas fisiológicas de los participantes mediante señales de fotopletismografía obtenidas en la región facial, para cuantificar variaciones asociadas al estrés inducido en entornos virtuales.
- Analizar métricas de variabilidad del pulso cardíaco derivadas de la señal PPG mediante procesamiento digital de señales, para identificar marcadores fisiológicos asociados al estrés.
- Evaluar la percepción psicológica del estrés en los participantes mediante instrumentos psicométricos estandarizados, para determinar su relación con los indicadores fisiológicos medidos.
- Comparar las respuestas fisiológicas y psicológicas de los participantes entre escenarios virtuales neutros y estresantes mediante análisis estadístico, para determinar

el impacto de los estresores en la inducción del estrés.

- Evaluar experimentalmente la eficacia de los entornos de RV en la inducción de estrés mediante un estudio bajo condiciones controladas.

1.5. Alcances y limitaciones

1.5.1. Alcances

- Diseñar y desarrollar entornos virtuales inmersivos con niveles progresivos de estresores auditivos y visuales, que permitan establecer condiciones experimentales controladas para evaluar respuestas psicofisiológicas y conductuales asociadas al estrés.

- Realizar pruebas piloto para validar la capacidad de los escenarios virtuales de inducir estrés y verificar la precisión del sistema de medición fisiológica bajo condiciones controladas.

- Recopilar retroalimentación de los participantes sobre la experiencia inmersiva y la usabilidad de los entornos virtuales, con el fin de optimizar las condiciones experimentales.

- Analizar los datos fisiológicos y psicológicos obtenidos en pruebas piloto y comparativas mediante métodos estadísticos, para determinar la efectividad de los entornos virtuales en la inducción de estrés.

- Verificar el funcionamiento de los entornos virtuales y del sistema de medición fisiológica mediante pruebas de desempeño y comparaciones referenciales con dispositivos comerciales.

1.5.2. Limitaciones

- La colocación de los instrumentos de medición en algunos participantes puede influir en la interpretación de los niveles de estrés antes de iniciar la simulación.

- Es posible que usuarios con graduaciones de visión altas requieran ajustes especiales para el uso del casco de RV debido a problemas de visión (Hipertextual, 2016).
- El uso de la RV puede provocar sintomatología adversa asociada, como mareos, náuseas y fatiga visual (Yildirim, 2020).
- El proyecto se centra en la validación de la efectividad de la inducción de estrés, lo que puede no reflejar plenamente la complejidad y las variables inesperadas de las situaciones de estrés en la vida diaria.
- Se emplearon sensores comerciales, por lo que no se diseñó ni desarrolló un sensor específico para este estudio.
- Se utilizó el sistema comercial Oculus Quest 2 para la RV, el cual no se modificó ni personalizó para los objetivos del proyecto.

Capítulo 2
Antecedentes

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Estrés

La Organización Mundial de la Salud define el estrés como el estado emocional del sujeto de sentirse preocupado o amenazado por la vida, ya sea por amenazas como violencia familiar, abuso emocional y físico, enfermedades, situación financiera e incertidumbre sobre el futuro (World Health Organization, 2020). Todas las personas experimentan cierto grado de estrés; sin embargo, a niveles muy elevados, tiene efectos perjudiciales sobre el organismo, desde diversos dolores, hasta la manifestación de sarpullido, infecciones, molestias o trastornos intestinales. Entre las emociones relacionadas con el estrés se encuentran la irritabilidad, dificultad para dormir, tristeza, culpa, llanto, cansancio y alteraciones del apetito (Orlandini, 2012). Estos malestares físicos y emocionales son parte natural del estrés, pero pueden convertirse en un problema si no se logran reducir o la persona aprende a controlar sus emociones. Comprender los efectos del estrés, cómo se desarrolla y qué tipo de estresores influyen para incrementar sus niveles, es la base para diseñar estrategias y nuevas herramientas que ayudarán a identificar y abordar el estrés de manera puntual. Sin embargo, lo que puede ser estresante para una persona puede no serlo para otra, y la forma en que cada individuo experimenta y maneja el estrés puede variar considerablemente.

2.1.2. Fisiología del estrés

El estrés es la respuesta natural y necesaria del cuerpo, a nivel fisiológico, endocrinológico y psicológico, frente a situaciones percibidas como demandantes o amenazantes, esencial para la supervivencia. El sistema nervioso autónomo (SNA) es el encargado de regular la respuesta del cuerpo humano ante situaciones de alerta o tranquilidad a través de señales eléctricas y químicas. El SNA está formado por dos componentes: el sistema

simpático y el sistema parasimpático. El sistema simpático ayuda en el control de diversos procesos metabólicos independientes y también se activa en situaciones de amenaza. Por su parte, el sistema parasimpático se encarga de los aspectos vegetativos de la vida cotidiana y aporta en los procesos anabólicos del organismo (Staab & Ruckenstein, 2007). El sistema simpático se activa en respuesta a emociones negativas, como el enojo, el estrés o el miedo, mientras que el sistema parasimpático se activa en reacción a emociones positivas, como el interés, la alegría o el entusiasmo. Cuando la parte simpática se pone en marcha, prepara nuestro cuerpo para la acción, mientras que la parte parasimpática fomenta la conservación de energía. Ambos subsistemas, están parcialmente activos en todo momento, sin embargo, no pueden dominar simultáneamente la actividad visceral. La excitación del sistema simpático es dominante durante la fase de estrés, y el sistema parasimpático promueve el equilibrio interno del cuerpo. Este proceso es esencial para que los sistemas fisiológicos funcionen de manera óptima, adaptándose a las demandas internas y externas del organismo.

2.1.3. Medición del estrés

Uno de los primeros enfoques para medir el estrés fue la introducción de la escala de clasificación de reajuste social (SRRS por sus siglas en inglés The Social Readjustment Rating Scale), propuesta por Holmes y Rahe (Acuña et al., 2012). Esta herramienta de autoevaluación se utiliza para medir el estrés que puede experimentar una persona debido a eventos importantes en su vida. El principio en el que se basa la escala es que tanto los eventos positivos como los negativos pueden causar estrés, y la acumulación de estrés puede tener un impacto en la salud mental y física de una persona.

Además de la SRRS, se han desarrollado otras escalas para medir el estrés y la ansiedad en distintas situaciones. Entre ellas se destaca el Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo (IDARE), propuesto por Spielberger y colaboradores (Skapinakis, 2024). A diferencia de la SRRS, que se enfoca en la evaluación del estrés derivado de eventos de la vida, el inventario IDARE se centra en medir dos tipos de ansiedad: la ansiedad como estado y la ansiedad como rasgo. La ansiedad estado se refiere a una respuesta emocional temporal provocada por una situación específica, mientras que la ansiedad rasgo mide la tendencia general

de una persona a percibir situaciones como estresantes, reflejando así una característica más estable de la personalidad. El inventario IDARE se ha utilizado en contextos clínicos y psicológicos para evaluar cómo las personas responden a situaciones de estrés y para identificar niveles de ansiedad que podrían requerir intervención. Pese a ello, una de sus principales limitaciones es que, al ser un inventario autoadministrado, puede estar sujeto a sesgos de deseabilidad social, ya que las personas pueden tender a responder de una manera que consideren aceptable o que minimice la percepción de su propia ansiedad. Esto puede llevar a resultados que no reflejen con precisión el nivel de ansiedad real del individuo, limitando la fiabilidad de la evaluación en ciertos casos.

Para eliminar las limitaciones mencionadas que podrían tener los inventarios, se ha propuesto un enfoque de identificación de estrés a través de señales fisiológicas. Actualmente existen dos formas para la adquisición de las señales fisiológicas mediante técnicas invasivas y no invasivas (Maidana et al., 2013). Las técnicas sin contacto (no invasivas), son los avances más recientes en el desarrollo de herramientas para la obtención de datos fisiológicos. Estas técnicas no invasivas, permiten la repetición de muestreos, puesto que, para su obtención, no involucra limitaciones en la autonomía de la persona.

Por otra parte, los métodos invasivos para medir el estrés en personas involucran procedimientos que requieren una manipulación especial de los individuos sometidos a la evaluación y pueden causar incomodidad o dolor. Estos procedimientos incluyen el uso de electrodos invasivos que pueden generar cambios fisiológicos en respuesta al estrés por los procedimientos y la experiencia de someterse a ellos (Guardiola Vila, 2016).

Existen métodos clínicos no invasivos para medir el estrés fisiológico. El cortisol salival es una opción utilizada debido a que su medición es no invasiva. El cortisol salival es un claro indicador de estrés, tanto en niños como en adultos como concluye Arborelius (Arborelius et al., 1999). En su mayoría los estudios para la medición del estrés se basan en observaciones de reacciones fisiológicas, endocrinas y psicológicas que produce el cuerpo para mantenerlo libre de tensión. El monitoreo de señales fisiológicas, como el aumento del ritmo cardíaco, la respiración, los gestos faciales y la sudoración de la piel, ha permitido el desarrollo de métodos y tecnologías que contribuyen al estudio del estrés (Morera et al., 2019).

2.1.4. Variabilidad de la frecuencia cardiaca, un indicador de estrés

La variabilidad cardiaca, también llamada HRV (por sus siglas en inglés Heart Rate Variability), es el fenómeno asociado con la variación del tiempo entre cada latido cardiaco (G. Ernst, 2017), (Billman, 2011). El análisis espectral de la HRV permite estudiar la interacción entre los mecanismos psicológicos y neurofisiológicos del estrés. Un valor alto de HRV se asocia al predominio del sistema nervioso parasimpático, lo cual indica un estado de relajación y una adecuada capacidad de recuperación frente a estímulos estresantes. Un valor bajo de HRV suele indicar estrés, fatiga, falta de recuperación o desregulación emocional (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Para medir la HRV el método más común es el electrocardiograma (también conocido como ECG por sus siglas en inglés). El ECG es un gráfico que representa la actividad eléctrica del corazón. Esta actividad eléctrica se registra mediante electrodos colocados en la piel y refleja el proceso de contracción y relajación. Este registro se visualiza como un trazado con distintas deflexiones (ondas del ECG), que indican el trayecto de los impulsos eléctricos a lo largo de las diversas estructuras cardíacas (Segura & Marrugat, 2009). En los últimos años, se ha comenzado a prestar atención a los sensores de fotopletismografía (PPG), que miden señales de luz reflejada en el tejido humano de algunas partes del cuerpo como los dedos de la mano, oreja o mejilla como una alternativa al ECG (Villanueva Cañas, 2021) Asimismo, la PPG puede utilizarse para obtener la variabilidad de la frecuencia del pulso, también llamada PRV (por sus siglas en inglés Pulse Rate Variability), un indicador indirecto de la HRV.

2.1.5. Fotopletismografía

Entre las técnicas basadas en principios ópticos que se emplean para monitorizar órganos y tejidos se encuentran la fotopletismografía o PPG. La señal de PPG se obtiene comúnmente mediante un oxímetro de pulso, que irradia luz de dos longitudes de onda a través de una capa de tejido y mide, mediante un fotodetector, los cambios en la absorción de luz producidos por el bombeo de sangre hacia las periferias en cada ciclo cardíaco

(Park et al., 2022), como se observa en la Figura 2.1.

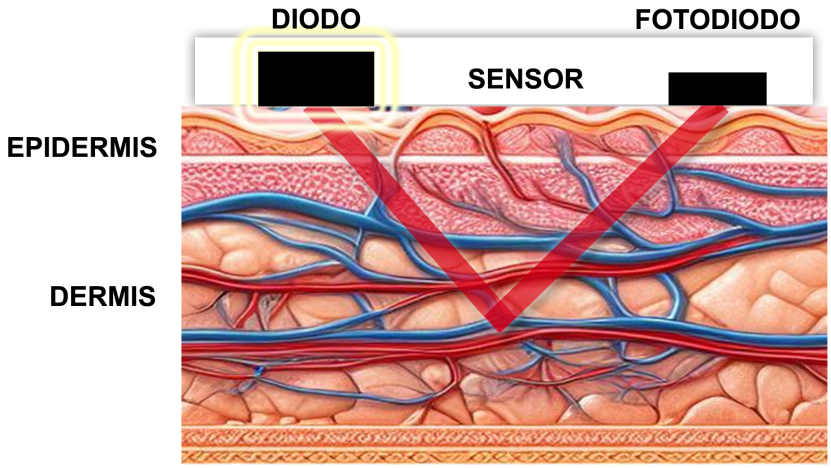


Figura 2.1: Ejemplo del efecto de la luz que incide en la piel para la adquisició de señales de PPG tipo reflectivo. Imagen propia.

Además, la señal de PPG puede capturarse utilizando distintas fuentes de luz que emiten a diferentes longitudes de onda. Por lo general, a medida que aumenta la longitud de onda de la luz, también aumenta la profundidad de penetración. Así, para medir la señal de PPG, se emplea principalmente luz roja con longitudes de onda de 640 a 660 nm, así como luz infrarroja de 880 a 940 nm. Sin embargo, en algunos casos, se utilizan longitudes de onda más cortas, como la luz verde de 530 nm (Park et al., 2022).

Un desafío importante en la medición de PPG es el ruido generado por los movimientos físicos, especialmente en áreas como la muñeca (Li et al., 2022). Sin embargo, al utilizar técnicas que emplean múltiples longitudes de onda para alcanzar diferentes profundidades de la piel, es posible capturar señales en otras partes del cuerpo, como en la dermis del rostro, específicamente en la mejilla (Uguz et al., 2018). Realizar la medición de la señal de PPG en esta zona podría reducir el ruido provocado por los movimientos de las extremidades, convirtiendo a la mejilla en una opción viable para experimentos en los que el usuario se encuentra en constante movimiento.

2.1.6. La PRV como indicador indirecto de la HRV

La PRV es una medida similar a la HRV, pero en lugar de obtenerse a partir de señales del ECG, se calcula a partir de señales de pulso, como las que se registran con técnicas ópticas como la PPG. A diferencia de la HRV, que mide los intervalos directos entre los

latidos eléctricos del corazón (los intervalos R-R del ECG), la PRV se basa en la onda de pulso periférica, la cual se propaga a través de las arterias, desde el corazón hacia las extremidades (Acharya et al., 2006). Un valor alto de PRV se asocia generalmente con el predominio del sistema nervioso parasimpático. Esto indica un estado de relajación, una buena capacidad de recuperación y una adaptabilidad adecuada frente a estímulos estresantes. Un valor bajo de PRV suele ser un indicador de estrés, fatiga, falta de recuperación o desregulación emocional (Shaffer & Ginsberg, 2017), lo que sugiere una menor capacidad de adaptación del sistema nervioso autónomo.

Si bien la medición de PRV ofrece una forma no invasiva de monitorear la variabilidad, la relación exacta entre HRV y PRV aún no se comprende del todo. Aunque suelen presentar tendencias similares, se han observado diferencias en condiciones particulares, como en personas con problemas de salud, sujetos activos (no en reposo) o de edad avanzada (Charlot et al., 2009; Gil et al., 2010; Mejía et al., 2022).

2.1.7. Medición de PRV mediante PPG

El análisis de PRV mediante PPG se basa en la extracción de los intervalos entre pulsos (IBI) a partir de los picos sucesivos de la señal PPG. Este procedimiento es análogo a la obtención de los intervalos RR en un ECG, derivados de los picos R. A partir de estos intervalos, se aplican análisis comparables a los de la variabilidad de la HRV. En condiciones controladas, métricas como la desviación estándar de los intervalos normales (SDNN), la raíz cuadrada de la media de las diferencias sucesivas (RMSSD), la relación entre la banda de baja frecuencia (LF) y la banda de alta frecuencia (HF) suelen mostrar correlaciones superiores a r=0.90 con sus equivalentes en HRV (Castañeda et al., 2018; Elgendi, 2012; Lu et al., 2009).

Una de las principales ventajas del uso de PPG radica en su facilidad de implementación, bajo costo, y portabilidad, lo cual permite una monitorización continua de la PRV en entornos cotidianos mediante dispositivos portátiles como relojes inteligentes, pulseras o sensores de dedo (Tamura et al., 2014).

2.1.8. Herramientas para inducción de estrés

Existen varios métodos utilizados para inducir estrés en contextos de investigación. Las tareas de laboratorio en condiciones controladas son muy utilizadas en el estudio de las respuestas psicofisiológicas al estrés, estos métodos pueden variar según el propósito de la investigación y el grado de estrés que se pretenda generar. Algunos de los métodos comunes para inducir estrés en laboratorio incluyen tareas como hablar en público, pruebas aritméticas, la prueba Stroop, las de tiempo de reacción, exposición al ruido, inducción de emociones o inducción de dolor entre otras (Delaney & Brodie, 2000). En las últimas décadas se han desarrollado una multitud de métodos para inducir estrés, como las Prueba de Estres Social de Trier (TSST) (Gunnar et al., 2021), Prueba de Estimulacion por Frío (SECPT) (Schwabe et al., 2013), o la Prueba estres agudo de Maastricht (MAST) (Smeets et al., 2012).

En el 2020, investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de México (Rodríguez-Arce et al., 2020), publicaron un estudio donde propusieron un protocolo de inducción de estrés donde analizaron 21 características de cinco señales fisiológicas (frecuencia cardíaca, temperatura de la piel, respuesta galvánica de la piel de la mano, saturación de oxígeno y tasa de flujo respiratorio), de 21 estudiantes universitarios validando su método mediante la aplicación de un inventario IDARE a cada estudiante, concluyendo que la ansiedad podría medirse mediante el análisis de señales fisiológicas en lugar de la puntuación de la prueba IDARE.

Existen alternativas como cuestionarios o entrevistas para evaluar el estrés a partir de la ansiedad como el Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo de Spielberger (STAI) (Zsido et al., 2020) y la Escala de Estrés Percibido (PSS) (Harris et al., 2023), entre otros. Es importante considerar el bienestar de los participantes y obtener su consentimiento informado antes de someterlos a situaciones estresantes. Se ha identificado una limitación importante en los protocolos actuales de inducción de estrés: su falta de personalización y flexibilidad. Estos protocolos, a menudo genéricos, no garantizan una respuesta estresante uniforme en todos los participantes y pueden no reflejar las experiencias de estrés reales. Para validar herramientas tecnológicas que midan o analicen el estrés, es esencial contar con una tecnología que no solo desencadene una respuesta fisiológica, sino que

también permita ajustar y personalizar los estresores de acuerdo con las características del individuo o el contexto específico en escenarios controlados y repetibles. En este caso, se propone utilizar la RV para abordar estas limitaciones.

2.1.9. RV como herramienta para inducción de estrés

La generación de respuestas emocionales a través de estímulos visuales es una práctica común y eficaz. Se ha demostrado que imágenes, sonidos, música y videos pueden provocar una amplia gama de emociones (Yang et al., 2019). Por lo que la implementación de RV como los videojuegos han sido utilizados con éxito para inducir estados emocionales (Bevilacqua et al., 2019).

La RV, (Roehl, 1996), la define como: "Una simulación de un ambiente tridimensional generada por computadoras, en el que el usuario es capaz tanto de ver como de manipular los contenidos de ese ambiente". Para poder desarrollar una experiencia virtual es necesario contar con una computadora, un programa informático con los escenarios del mundo virtual, un dispositivo para visualizar los entornos programados, por ejemplo, cascos inmersivos (Head-Mounted Displays, HMD por sus siglas en inglés) que se adaptan a la cabeza del usuario (Mendoza et al., 2023). Así también, la retroalimentación háptica es parte importante para estimular el sentido del tacto a través de los receptores y fibras nerviosas situados en la piel sobre los estímulos de la superficie externa de nuestro cuerpo (Escobar Valencia & Vivas Albán, 2018). Esta integración de sentidos es fundamental para crear una ilusión de "estar ahí" en el espacio generado por la computadora interactuando con los objetos de ese mundo virtual, efecto al cual se le conoce como inmersión. En el contexto de la RV, la inmersión se produce cuando el usuario se olvida de que está en un mundo artificial; es decir, lo vive con los cinco sentidos y, a diferencia de la inmersión cinematográfica, interactúa con el entorno virtual. La idea de proporcionar información multisensorial, incluyendo lo visual, auditivo y táctil, subraya la importancia de crear una experiencia completa y envolvente para el usuario. Al incorporar múltiples sentidos, la RV busca replicar la riqueza sensorial del mundo real, lo que contribuye a aumentar el realismo y la sensación psicofisiológica (Noriega, 2004). Dicho lo anterior, una participación activa e inmersiva podría generar respuestas emocionales más intensas en los usuarios. Por

ejemplo, un juego de terror en RV puede desencadenar un miedo más vívido que un video de terror proyectado en pantalla, ya que el usuario siente que está realmente en peligro. Del mismo modo, las reacciones físicas, como saltar o esquivar objetos virtuales, pueden ser más notorias en la RV. Sin lugar a duda, una de las características más destacadas de la RV radica en su capacidad immersiva para brindar una experiencia de realidad en la que mente y cuerpo reaccionan como si se encontraran en una situación real, a pesar de que los usuarios son conscientes de que están inmersos en un entorno simulado. Esto abre la puerta a una serie de ventajas notables. Por un lado, permite a las personas enfrentar situaciones complejas en un entorno de RV de manera más manejable en comparación con situaciones de la vida real. Por otro lado, ofrece la oportunidad de experimentar y probar nuevas estrategias de intervención en entornos controlados, al mismo tiempo que proporciona una experiencia que se asemeja a situaciones cotidianas.

2.1.10. Ansiedad estado y rasgo: fundamentos y relación con el desempeño

La ansiedad es una respuesta psicofisiológica que se activa ante situaciones percibidas como amenazantes, implicando una reactividad anticipatoria del sistema nervioso autónomo y mecanismos defensivos que preparan al organismo ante la posibilidad de daño (Hyde et al., 2019). Desde una perspectiva psicométrica, se distinguen dos formas principales de ansiedad: como rasgo (AR) y como estado (AE). La ansiedad rasgo se refiere a una disposición relativamente estable de la personalidad a experimentar ansiedad con frecuencia, mientras que la ansiedad estado representa una reacción emocional transitoria frente a estímulos específicos (Domínguez et al., 2012; Zsido et al., 2020).

Para su medición, se aplica el inventario IDARE, validado en población mexicana como universitarios y adolescentes (Domínguez et al., 2012; Lorenzo Ruiz et al., 2003). Este instrumento permite analizar cómo la predisposición individual AR puede modular las respuestas situacionales de ansiedad AE ante estresores físicos, cognitivos o emocionales.

Se ha identificado que los sujetos con niveles moderados de AR tienden a presentar mayor reactividad emocional ante estímulos estresantes. En cambio, los individuos con niveles muy altos de AR podrían mostrar habituación o incluso bloqueo cognitivo-emocional

como mecanismo defensivo. Un nivel medio de ansiedad basal podría maximizar la sensibilidad del sistema emocional ante situaciones desafiantes (Rudaizky et al., 2012). Se ha demostrado que el incremento de la AE, inducido mediante estresores visuales, sonoros o tareas con alta carga cognitiva, puede correlacionarse negativamente con el desempeño, en especial en contextos que demandan atención sostenida o precisión. Por ejemplo, Angelidis et al. (Angelidis et al., 2019) encontraron que una inducción aguda de ansiedad cognitiva deteriora el rendimiento en tareas de memoria de trabajo, especialmente en individuos con alta AR. Además, se ha observado que altos niveles de ansiedad interfieren con la activación del córtex prefrontal, reduciendo la capacidad de controlar la atención frente a estímulos distractores, lo que compromete el rendimiento bajo presión o carga cognitiva elevada (Bishop, 2009; Bishop et al., 2004). Finalmente, se ha documentado que las personas con alta AR muestran menor variabilidad intraindividual en su rendimiento como posible estrategia de compensación, pero son más susceptibles a bloqueos cognitivos cuando enfrentan tareas demandantes o situaciones evaluativas estresantes (Mackintosh et al., 2022). En el presente estudio se propone analizar cómo varía la AE entre dos etapas experimentales con exposición a entornos virtuales controlados, y si dichos cambios se asocian con el desempeño de los participantes, considerando su clasificación en AR. Se parte de la premisa de que el entorno estresante provocará un aumento significativo de la AE y que dicho incremento se relacionará con un deterioro del desempeño, particularmente en sujetos con AR baja o media.

2.1.11. Estado del arte

A continuación, se enumeran los casos de estudio donde se induce estrés de manera directa o indirecta haciendo uso de la RV.

Liu y Zhang (2020), llevó a cabo un estudio con estudiantes universitarios para investigar los efectos de la versión de RV del TSST. En este experimento, 30 hombres y 30 mujeres fueron asignados aleatoriamente a un protocolo de estrés psicosocial o a una condición de control, ambos dentro de un entorno de RV donde se les pedía hablar libremente sobre si mismos durante cinco minutos y luego completar una tarea matemática durante cinco minutos. Se evaluaron diversas respuestas psicofisiológicas, incluyendo la Respuesta

Galvanica de la Piel (GSR), Frecuencia Cardiaca (FC) y la HRV. Se empleó la Escala Analogica Visual (EVA), para evaluar el estrés percibido de manera tanto antes como después de la condición experimental. Además, se incluyó un Cuestionario de Salud del Paciente-9 (PHQ-9) (Huarcaya-Victoria et al., 2020) y escalas subjetivas para medir los estados emocionales mediante el Inventario de Ansiedad de Beck (BAI), el Inventario de Depresion de Beck (BDI) y el Inventario de Depresion de Beck (PANAS). Para evaluar las estrategias de afrontamiento de los participantes se utilizó el Cuestionario Simplificado de Estres y Afrontamiento (SCSQ). Los resultados revelaron diferencias significativas, incluyendo respuestas distintas entre hombres y mujeres, evidenciando la mayor sensibilidad de los hombres al estrés. Este estudio sugiere que el Trier Social Stress Test - Virtual Reality (TSST-VR), podría ser una herramienta valiosa para explorar respuestas al estrés en entornos experimentales. En la Figura 2.2 se muestra el escenario virtual diseñado para el experimento.



Figura 2.2: Sistema de RV de comité frente a un participante, (Liu & Zhang, 2020).

Jin et al. (2023), exploró el uso de RV en la reducción del estrés relacionado con los estudios y el tratamiento de la depresión. El estudio evaluó las preferencias hacia juegos de RV como parte de un Experimento de eleccion discreta (DCE). En el estudio, se utilizaron dos sistema de RV, un “sistema de relajación física y mental” y un ”sistema de confort musical”. La primera guía a los participantes para desechar emociones negativas como ansiedad y tensión, proporcionando paisajes naturales y la voz de un psicoterapeuta como guía de relajación. La segunda aplicación ofrece música relajante terapéutica para desencadenar experiencias positivas, permitiendo a los usuarios elegir escenarios y disfru-

tar de música relajante mientras reciben orientación sobre depresión. Ambas aplicaciones buscan promover la salud física y mental mediante experiencias inmersivas y positivas en el sistema de RV. En la Figura 2.3 se muestran los escenarios desarrollados en el estudio.



Figura 2.3: Interfaz de selección de escenarios, (Jin et al., 2023).

Yin et al. (2018), exploró el impacto de elementos biófilos en las aulas mediante RV en los niveles de estrés y las funciones cognitivas de 30 adultos jóvenes de una universidad en China. Diseñaron cinco escenas de aula virtual con diferentes elementos biófilos y efectos visuales que reducen la claridad o nitidez de la imagen en RV. Evaluaron los efectos sobre indicadores fisiológicos de reacción al estrés, como la Presion Arterial (PA), la FC, la HRV y la GSR. También realizaron pruebas cognitivas verbales sobre atención y creatividad, evaluaron los niveles de estrés percibido y la conexión con la naturaleza mediante autorreportes. Se observó una disminución significativa en los niveles de estrés percibido, lo que sugiere que la incorporación de elementos biófilos en los entornos virtuales podría beneficiar la salud de los estudiantes. En la Figura 2.4 se muestra el modelo 3D de los entornos virtuales desarrollados.

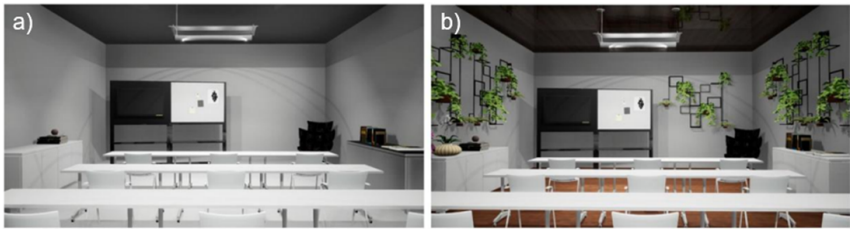


Figura 2.4: a) sistema de RV, aula no biofílica, b) sistema de RV, aula biofílica,(Yin et al., 2018).

Cha (2023) analiza el uso de la tecnología de RV para crear aulas virtuales y medir el impacto cognitivo del tamaño del aula y el impacto de una ventana con vistas al aire libre

en las funciones ejecutivas (EF) y las respuestas fisiológicas de los niños preescolares. El estudio midió respuestas fisiológicas como la FR y se tomaron muestras de saliva, Espectroscopía funcional de infrarrojo cercano (fNIRS), para medir la actividad cerebral. Para las tareas de EF, se midió el intervalo de dígitos hacia adelante, esta tarea midió la atención y la memoria de trabajo verbal, con el Corsi Block Test (CBT), se midió la atención y la memoria de trabajo visoespacial y con la Tarea de Clasificacion de Tarjetas de Cambio Dimensional (DCCS), se midió la flexibilidad de la atención. En la Figura 2.5 se muestran dos sistema de RV diseñados para el experimento.



Figura 2.5: Figura 5. a) sistema de RV de aula reducida. b) sistema de RV de aula grande con ventana, (Cha, 2023).

Chen et al. (2024), investigaron las respuestas fisiológicas y psicológicas de los residentes a las transiciones entre entornos urbanizados y naturales. Utilizando RV inmersiva, desarrollaron cuatro escenarios: dos urbanizados y dos naturales como se muestra en la Figura 2.6 . Se reclutaron 171 participantes en un experimento aleatorio cruzado para evaluar sus respuestas emocionales a través de la medición de señales fisiológicas en tiempo real, que incluían la medición de la FR, la HRV y la GSR. Para la medición de indicadores psicológicos utilizaron una versión breve de seis puntos del inventario IDARE para evaluar la respuesta a la ansiedad estado y la ansiedad rasgo, también realizaron una Prueba de Perfil de Estados de Animo (POMS-SF), diseñada para medir los estados de ánimo o emociones en un momento específico como tensión, depresión, ira, fatiga, confusión y vigor. Los resultados del estudio demostraron que la exposición a entornos naturales, incluso simulados a través de la RV inmersiva, puede tener efectos positivos en las respuestas fisiológicas y psicológicas de las personas. Los hallazgos del estudio sugieren que la incorporación de elementos naturales en el diseño urbano, como parques, jardines y espacios verdes, puede ser una estrategia beneficiosa para promover el bienestar de las

poblaciones urbanas.



Figura 2.6: Representación de sistema de RV construido. b) Representación de sistema de RV natural, (Chen et al., 2024).

H. Kim, Kim et al. (2021), analizaron si la RV puede reducir el estrés más que la biorretroalimentación. En el estudio participaron 83 voluntarios adultos sanos. Se implementó un protocolo para inducir estrés, para ello, se indujeron síntomas como mareos y malestar, al exponer a los participantes a videos de RV con un alto grado de movimiento. Además, se proporcionó carga cognitiva mediante una tarea de operaciones de restas aritméticas. Los síntomas causados por el desajuste visual-vestibular provocaron cambios fisiológicos relacionados con el estrés, activando el eje hipotálamo-pituitaria-adrenal y elevando el nivel de cortisol. La prueba matemática fue eficaz para inducir una respuesta de estrés a medida que el flujo sanguíneo cerebral cambiaba y el nivel de cortisol salival aumentaba hasta alcanzar un máximo después de finalizar la tarea. Para la sesión de relajación mediante biorretroalimentación, se utilizó el sistema ProComp Infiniti, con el cual se adquirieron datos de electromiografía (EMG), GSR, temperatura de la piel, respiración, FC y presión de los vasos sanguíneos (HR/BVP) mediante sensores conectados al cuerpo del sujeto. Se encontró que la RV fue efectiva en la reducción del estrés posiblemente al activar el sistema de recompensa del cerebro y al proporcionar una experiencia inmersiva que distrae de los factores estresantes. En la Figura 2.7 se muestra el escenario virtual diseñado y la instrumentación del individuo.

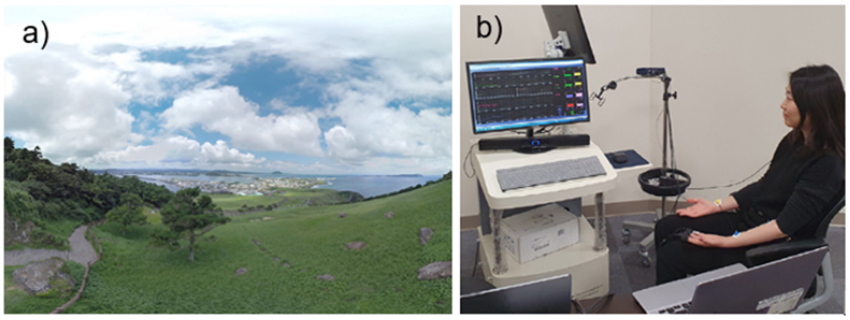


Figura 2.7: a) Imagen de video de RV. b) Instantánea de sesión de retroalimentación,(H. Kim, Kim et al., 2021).

Soriano Terrazas et al. (2018), desarrolló un método para describir y generar estados mentales mediante entornos de RV inmersiva. Se emplearon dispositivos como el uso de un HMD junto con otras tecnologías de Interaccion Humano Computadora (HCI), para capturar datos cerebrales de un individuo. El propósito fundamental de este trabajo fue diseñar una metodología basada en tres etapas:

- Descripción de estados mentales: se analizan bases de datos de imágenes, videos y audio para identificar patrones asociados a diferentes estados cognitivos y emocionales.
- Diseño de entornos RV: se crean entornos RV inmersivos para estimular los patrones cerebrales asociados a los estados mentales deseados.
- Validación y evaluación: se realizan experimentos para evaluar la efectividad de los entornos RV en la inducción de los estados mentales deseados.

Los autores reportan resultados prometedores, lo que indica que sus entornos de RV inmersivos pueden inducir efectivamente estados cognitivos y emocionales específicos en los participantes. Los datos cerebrales capturados muestran cambios en la actividad cerebral consistentes con los estados mentales inducidos. El estudio representa un sistema significativo en el campo de la RV inmersiva y sus aplicaciones para la inducción de estados mentales.

Mateos-García et al. (2023), desarrollaron un sistema de RV para simular situaciones comunes a las que se enfrenta un conductor de automóvil con la finalidad de medir sus reacciones mediante un sensor de PPG incorporado en un reloj inteligente. Estos datos

biomédicos recopilados fueron procesados mediante algoritmos de aprendizaje automático logrando detectar estrés con una exactitud del 90.4 % mediante árboles de decisión. Este estudio nos muestra que la medición de la intensidad de las emociones mediante señales fisiológicas en un entorno de RV puede ser un indicador efectivo para evaluar la eficacia de sistemas de RV o métodos para inducir estrés. En la Figura 2.8 se muestra la arquitectura de diseño.



Figura 2.8: Estructura del sistema propuesto, (Mateos-García et al., 2023).

Rahman et al. (2023), utilizaron la terapia de exposición aplicada en RV como una técnica innovadora para abordar la ansiedad, especialmente la ansiedad relacionada con hablar en público. Investigaron modelos de Machine learning (ML), mediante la utilización de conjuntos de datos públicos, haciendo uso de una Electroencefalografía (EEG) y HRV, con el objetivo de anticipar estados de excitación. Además, se implementa biofeedback dentro del entorno. En la Figura 2.9 se muestra el sistema de RV propuesto.



Figura 2.9: Vista del sistema de RV de terapia de exposición donde se expone información de biofeedback, (Rahman et al., 2023).

Michela et al. (2022), desarrolló un sistema de RV donde se integró biofeedback de respiración donde los agentes practican la respiración diafragmática profunda y lenta en un contexto de juego interactivo. El juego evalúa la inhibición de respuestas en situaciones de alta excitación. Esta retroalimentación consistía en reducir la visión del jugador en la tarea de RV de manera proporcional a su falta de adherencia al ritmo respiratorio recompensado.

La visión en túnel ayudaba al jugador a controlar su ritmo respiratorio, premiando la respiración lenta y profunda. El estudio destaca la utilidad de la RV para entrenar la regulación respiratoria en contextos de toma de decisiones activas y estimulantes para mejorar las habilidades psicofisiológicas de los oficiales. En la Figura 2.10 se muestra la implementación de Biofeedback en el sistema de RV.



Figura 2.10: Implementación del Biofeedback como modulación de la visión periférica,(Michela et al., 2022).

Slater et al. (1999), trabajaron en el diseño y validación de software de RV para el tratamiento del miedo a hablar en público. Su trabajo ha demostrado que los escenarios virtuales, en los que el sujeto se enfrenta a situaciones de hablar ante audiencias virtuales producían una respuesta de estrés similar a la que generaba una audiencia real. El estudio principal incluyó tres variables de respuesta: autoevaluación del rendimiento, síntomas físicos de ansiedad reportados y un cuestionario estándar de miedo a hablar en público administrado tras cada sesión. El estudio utilizó un análisis de regresión múltiple para evaluar la relación entre la autocalificación y las variables independientes y explicativas, como la reacción de la audiencia y la inmersión. En la Figura 2.11 se muestra el entorno desarrollado para el experimento.



Figura 2.11: Audiencia virtual, (Slater et al., 1999).

Botella et al. (2006), llevó a cabo un estudio que incluía tres condiciones experimentales: exposición mediante RV, exposición en vivo y un grupo control de lista de espera. Los resultados mostraron que la exposición mediante RV era igualmente eficaz a largo plazo que la exposición en vivo para el tratamiento de fobias específicas (Guerrero-Guerrero et al., 2023). (Stetz, Long et al., 2008), desarrollaron dos ambientes virtuales donde simulaban situaciones médicas estresantes. Se llevaron a cabo sesiones de afrontamiento en una cámara insonorizada, en la oscuridad, con los participantes usando visores de RV, mientras eran dirigidos y supervisados externamente.

La literatura destaca una tendencia hacia el desarrollo de entornos virtuales positivos e inmersivos; sin embargo, subraya la importancia de abordar directamente la inducción controlada de estrés, clave para comprender y potenciar las estrategias de afrontamiento. La RV emerge como una herramienta valiosa para medir y gestionar el estrés, con un potencial significativo para impactar positivamente en la salud mental.

A continuación, se presenta una tabla comparativa con las características principales de los ambientes virtuales encontrados en la literatura que abordan la problemática propuesta y su validación para inducir estrés.

Tabla 2.1: Características y técnicas para inducir estrés mediante RV.

Artículo	**Señales fisiológicas**	**Herramientas de evaluación**
(Soriano Terrazas et al., 2018)	EEG, GSR, EMG, ECG	PHQ-9, STAI, SAM, PANAS
(Liu & Zhang, 2020)	EDA, FC, HRV	EVA, SCSQ, BAI, BDI, PANAS
(H. Kim, Kim et al., 2021)	HRV, FC, IBI, VLF, GSR	PSS, STAI-X1/X2, NRS, SDS, EQ-5D-5L, SSQ
(You et al., 2023)	PA, FC, HRV, GSR, PPG	Test numérico, Autorreportes, Encuesta
(Mateos-García et al., 2023)	OS, FC, RESP, HRV	Autoevaluaciones
(Rahman et al., 2023)	EEG, HRV, IBI	– (no aplica)

La tabla 2.1 ofrece un análisis comparativo de las características y herramientas empleadas en estudios para inducir estrés mediante RV, seleccionados por su enfoque metodológico y las señales fisiológicas medidas. Algunos estudios, como H. Kim, Kim et al. (2021), utilizaron protocolos estandarizados como el TSST, mientras que otros, como Soriano Terrazas et al. (2018), desarrollaron protocolos propios adaptados a sus objetivos. La tabla detalla las señales fisiológicas evaluadas (por ejemplo, EEG, GSR, HRV, entre otras), así como las herramientas empleadas para la medición de estados emocionales y cognitivos (como PHQ-9, STAI, PANAS y escalas de autoevaluación). [1]

[1]Patient Health Questionnaire-9. "STAI-X1"hace referencia a la subescala "X1"de la Escala de Ansiedad Estado (STAI, por sus siglas en inglés: State-Trait Anxiety Inventory). "STAI-X2"hace referencia a la subescala "X2"de la Escala de Ansiedad Estado (STAI, por sus siglas en inglés: State-Trait Anxiety Inventory). Numeric Rating Scale (NRS) o Escala Numérica. Self-Rating Depression Scale (Escala de Depresión de Autoevaluación). Cuestionario utilizado para medir la calidad de vida relacionada con la salud. Social Support Questionnaire. Evaluación de Habilidades Numéricas.

Capítulo 3
Metodología

La presente investigación se fundamenta en un enfoque experimental cuantitativo, comúnmente utilizado en estudios de inducción de estrés y evaluación psicofisiológica en entornos controlados. Investigaciones previas han demostrado la eficacia de la RV como herramienta para inducir respuestas fisiológicas y emocionales asociadas al estrés, integrando sensores biométricos para el monitoreo en tiempo real (Hanshans et al., 2024), (Diemer et al., 2015), (Bohil et al., 2011), (Riva & Serino, 2020), (Slater & Sanchez-Vives, 2016), (Maples-Keller et al., 2017).

El desarrollo de la investigación se estructura en cuatro etapas:

Revisión del estado del arte

Se realiza un análisis de literatura científica relacionada con la inducción de estrés mediante RV y la evaluación psicofisiológica, con el propósito de sustentar los criterios de diseño experimental y seleccionar técnicas de medición validadas por la comunidad científica.

Diseño experimental de escenarios de RV

Se diseñan y parametrizan los escenarios inmersivos con estresores visuales y auditivos controlados. El uso de entornos virtuales como herramienta experimental ha demostrado generar reactividad fisiológica medible en estudios previos (Halbig & Latoschik, 2021).

Pruebas experimentales y adquisición de datos psicofisiológicos

Se realizan pruebas controladas para evaluar la respuesta fisiológica y psicológica de los participantes, empleando técnicas no invasivas de medición mediante PPG y herramientas psicométricas estandarizadas. Estudios similares han empleado sensores fisiológicos en entornos virtuales para validar mediciones de estrés y reactividad del sistema nervioso autónomo (Chauhan et al., 2018; Ishaque et al., 2023).

Análisis estadístico de datos psicofisiológicos

Los datos obtenidos se procesan mediante técnicas de análisis estadístico inferencial que permiten comparar condiciones experimentales neutras y estresantes, con el fin de identificar variaciones significativas en indicadores psicofisiológicos. Los métodos de análisis empleados se basan en prácticas comunes en estudios de evaluación de estrés en entornos de RV (Halbig & Latoschik, 2021).

La Figura 3.1 muestra el flujo general de la metodología empleada en esta investigación.

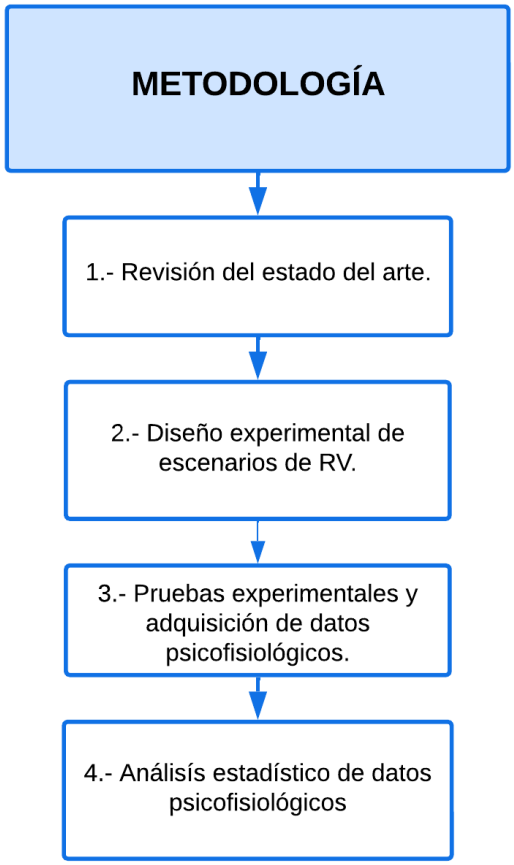


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología general empleada en el desarrollo del estudio.

Una vez establecido este marco metodológico, se describe a continuación el desarrollo del sistema experimental utilizado para implementar los escenarios de RV y realizar la adquisición de las señales fisiológicas.

3.1. Desarrollo del sistema

El desarrollo del sistema de RV se estructuró en cinco etapas principales. Estas abarcan desde la selección de los participantes hasta el procesamiento y análisis de los datos obtenidos, combinando elementos técnicos, experimentales y metodológicos para alcanzar los objetivos planteados en el estudio.

En la Figura 3.2 se presenta el diagrama de flujo del proceso seguido para el desarrollo del sistema experimental utilizado en esta investigación.

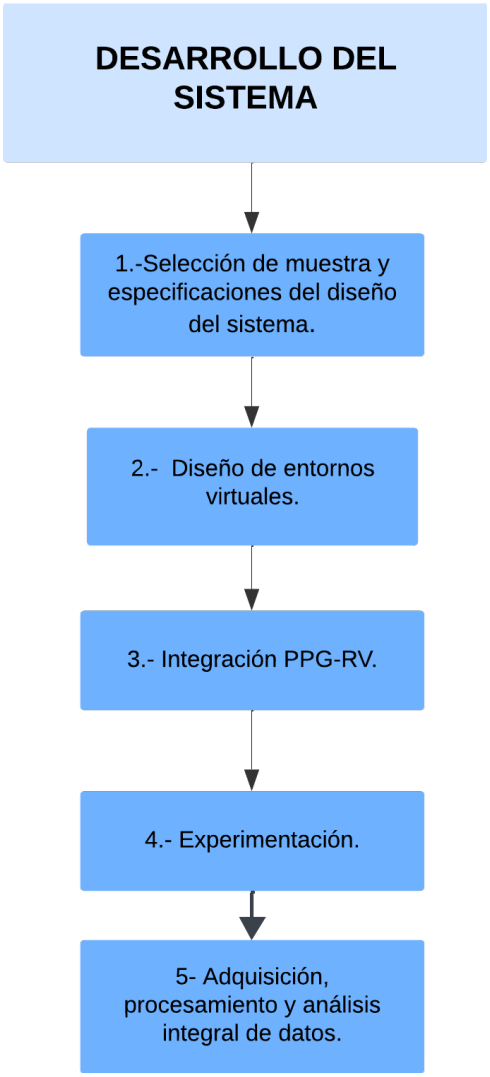


Figura 3.2: Diagrama de flujo del proceso de desarrollo del sistema experimental utilizado para la implementación de los escenarios de realidad virtual y la adquisición de datos fisiológicos.

3.1.1. Primera Etapa: selección de la muestra y especificaciones de diseño del sistema

Esta etapa tuvo como objetivo principal definir las características de la población de estudio y establecer los parámetros iniciales del sistema de RV. En primer lugar, se determinaron los criterios de inclusión y exclusión para seleccionar participantes adecuados. Se consideraron factores como edad, estado de salud, y experiencia previa con dispositivos de RV.

El reclutamiento de participantes se llevó a cabo teniendo en cuenta aspectos demográficos para garantizar una muestra representativa y controlada. Además, se justificó estadísticamente el tamaño de la muestra, asegurando un equilibrio entre significancia de los resultados y viabilidad operativa. Finalmente, se definieron procedimientos específicos para excluir a los participantes que no cumplían con los criterios establecidos o presentaban dificultades durante el estudio.

Criterios de inclusión

- Se incluyeron personas de entre 18 y 30 años en buen estado de salud física y mental, verificable mediante:

    1. Un cuestionario estandarizado sobre antecedentes médicos, estilo de vida y estado de salud general (véase Apéndice D).
    2. Una entrevista inicial para identificar factores de riesgo o condiciones que pudieran interferir con el estudio (p. ej., enfermedades cardiovasculares, respiratorias o consumo reciente de alcohol/drogas).

- Se aplicaron exclusiones temporales en los siguientes casos:

    - Consumo de nicotina o cafeína en las últimas 4 horas.
    - Menos de 6 horas de sueño la noche anterior.
    - Estar bajo tratamiento médico activo que alterara el estado fisiológico.

Criterios de exclusión

- Se excluyó a personas con diagnósticos psiquiátricos o enfermedades crónicas que afectaran la respuesta al estrés.
- También se excluyó a quienes participaban en estudios concurrentes que generaran conflictos de interés.
- Se excluyó a personas con sensibilidad a entornos virtuales (mareos, cefalea, cinetosis), evaluada mediante una prueba breve de exposición a RV previa al experimento.

Reclutamiento y control demográfico

Los interesados fueron convocados mediante charlas informativas, carteles universitarios y correos electrónicos. Se procuró una distribución equitativa de género para minimizar sesgos. Aquellos que reunieron los requisitos y aceptaron participar voluntariamente completaron el formato de registro (véase Apéndice A) y firmaron el consentimiento informado (véase Apéndice C), donde se detallaron procedimientos, riesgos, beneficios y su derecho a retirarse sin repercusiones.

Tamaño de la muestra y justificación estadística

- **Reclutamiento inicial**: Se convocaron entre 10–20 candidatos para anticipar posibles exclusiones o abandonos.
- **Muestra final**: Se seleccionaron 12 participantes que cumplieron todos los criterios. Esta decisión se justifica considerando:

    1. **Evidencia previa**: Estudios en RV con muestras no mayores a 20 sujetos han demostrado validez estadística en contextos similares (Fernández-Cisnal et al., 2023; Meshkat et al., 2024).
    2. **Diseño exploratorio**: El análisis intrasujeto permite identificar efectos significativos con tamaños de muestra pequeños.
    3. **Limitaciones prácticas**: Aunque el cálculo ideal basado en un 95 % de confianza y un error del 5 % sugería una muestra de $n = 341$ (Gamito et al., 2024),

las limitaciones de tiempo inherentes al proyecto de maestría hicieron inviable realizar el experimento con ese tamaño teórico. No obstante, el enfoque adoptado como estudio exploratorio permitió obtener resultados válidos en el contexto específico de esta investigación (Weiss et al., 2022).

Procedimientos de exclusión

Se excluyó del estudio a quienes:

- Incumplieron los criterios de inclusión y exclusión durante el proceso.
- Proporcionaron información falsa en el cuestionario inicial o durante la entrevista.
- No completaron el protocolo experimental en su totalidad.

Estos criterios aseguraron la validez de los datos al reducir factores que pudieran alterar las respuestas fisiológicas al estrés. Cabe señalar que el presente estudio fue revisado y aprobado por el Comité de Ética en Investigación (CEI) de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México. Al estudio se le asignó el número de registro **CONBIOETICA15-CEI-002-20210531** (véase Apéndice B).

3.1.2. Segunda etapa: diseño de entornos virtuales

La segunda etapa del estudio tuvo como objetivo el desarrollo e implementación de entornos virtuales inmersivos diseñados para inducir estrés fisiológico de forma controlada, replicable y segura. Estos escenarios se construyeron utilizando Unreal Engine 4.27 y se ejecutaron en visores Oculus Quest 2, aprovechando su capacidad de navegación libre, respuesta sensorial y seguimiento de movimientos. El diseño de los entornos se sustentó en principios de diseño emocional y perceptual, respaldados por evidencia empírica en neurociencia y psicología experimental (Freeman et al., 2017; Slater & Sanchez-Vives, 2016).

Diseño emocional y perceptual del entorno

El diseño visual y sonoro fue elaborado para generar un ambiente hostil, sensorialmente perturbador y psicológicamente desafiante. Se utilizó una paleta cromática compuesta

por tonos grises azulados, seleccionados por su asociación con sensaciones de frialdad, soledad y desolación (Elliot & Maier, 2014; Kaya & Epps, 2004). Esta elección cromática facilitó la evocación de estados emocionales negativos al activar componentes del sistema límbico relacionados con la aversión, tal como se muestra en la Figura 3.3. Los objetos recolectables, por contraste, fueron diseñados en color dorado, destacando visualmente y actuando como elementos de refuerzo positivo en un entorno visualmente opresivo.

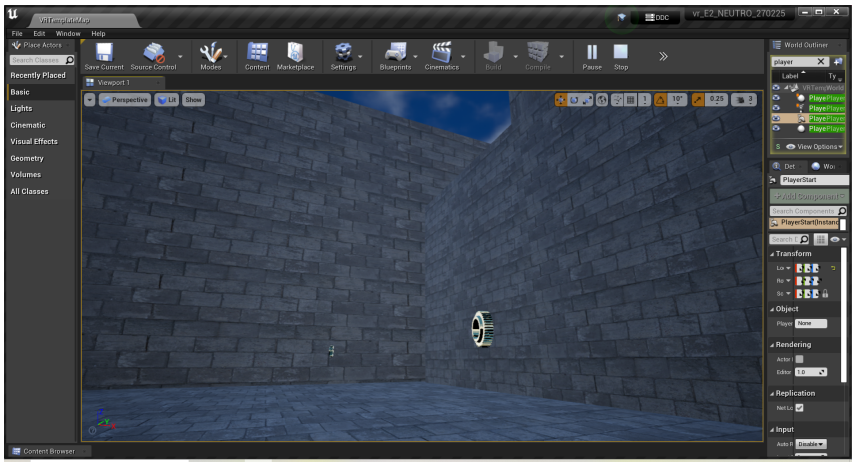


Figura 3.3: Colorimetría del entorno con estresores. La paleta gris-azul refuerza la sensación de aislamiento, mientras que los engranajes dorados generan un contraste motivacional.

La iluminación fue otro componente clave. En los escenarios estresantes, se redujo progresivamente la intensidad lumínica y se incorporaron sombras dinámicas, efectos de parpadeo e intermitencia en ciertas zonas. Estas manipulaciones incrementaron la percepción de amenaza, desorientación y urgencia, elementos reconocidos como inductores de activación simpática (Chang et al., 2020).

Estresores auditivos y diálogos estratégicos

En el plano auditivo, se integraron estresores reconocidos por su eficacia para provocar respuestas autonómicas. Se incluyeron sonidos espaciales tridimensionales como ventiscas, truenos, silencio absoluto, respiración agitada y latidos cardíacos amplificados, de acuerdo con parámetros experimentales previamente validados en otros estudios (Diemer et al., 2014; H. Kim, Kim et al., 2021). Además de los sonidos ambientales, se implementaron diálogos estratégicos con frases diseñadas para inducir presión psicológica, tensión, desorientación y la percepción de fracaso. Estos mensajes fueron programados median-

te eventos lógicos del entorno virtual, que se activaban en momentos críticos, como la entrada a zonas confinadas, la proximidad entre engranajes o la reducción del tiempo disponible. Algunos ejemplos son: "¿Seguiste el camino correcto?", "No vas a lograrlo a tiempo", "Pareces perdido...", "¿Escuchaste eso?". Estas frases actuaban como disparadores cognitivos de estrés anticipado o reactivo, lo que aumentaba la carga mental del participante.

Interfaz de usuario y retroalimentación fisiológica

La interfaz gráfica del sistema, desarrollada como un HUD (Head-Up Display), brindó al participante información crítica en tiempo real: un cronómetro ascendente, el número de objetos restantes por recolectar y su frecuencia cardíaca. Este último indicador se obtuvo mediante sensores fisiológicos integrados al sistema de adquisición, permitiendo que el usuario visualizara sus propias respuestas biológicas durante la tarea. Esta retroalimentación generó un bucle de autorregulación que intensificó la percepción de presión y ansiedad inducida por el entorno (Slater & Sanchez-Vives, 2016), tal como se observa en la Figura 3.4.

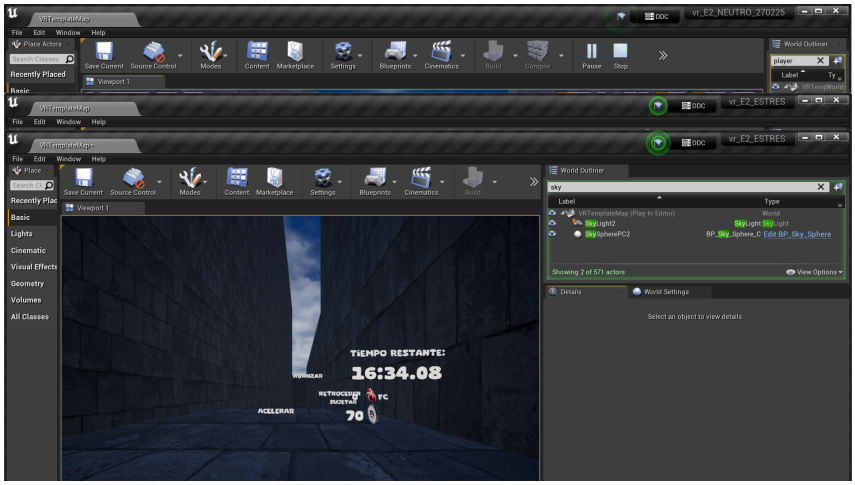


Figura 3.4: Interfaz de usuario: visualización simultánea del tiempo transcurrido, frecuencia cardíaca y objetos restantes.

Todos los escenarios fueron optimizados para mantener una tasa mínima de 90 cuadros por segundo (FPS), evitando efectos indeseables como la cinetosis y garantizando estabilidad durante sesiones prolongadas. La implementación modular del laberinto permitió el diseño de tres escenarios funcionalmente similares pero emocionalmente distintos:

- **Familiarización**: escenario libre de estresores, sin restricción de tiempo, enfocado en que el participante se adapte al entorno, a los controles y a la tarea.
- **Neutro**: misma estructura laberíntica, con límite de tiempo para recolectar objetos, pero sin estresores sensoriales ni cognitivos.
- **Con estresores**: incluye iluminación reducida, obstáculos móviles, sonidos aversivos y diálogos estratégicos diseñados para provocar sobrecarga emocional y presión cognitiva (Finseth et al., 2018).

Registro automático y análisis de trayectorias

Durante cada sesión experimental, Unreal Engine 4.27 generó automáticamente archivos `.csv` que registraron la trayectoria del participante dentro del entorno virtual. Estos archivos almacenaron, a lo largo del tiempo, las coordenadas espaciales (X, Y, Z), el tiempo transcurrido (en segundos), el número de objetos recolectados y otros marcadores internos. La captura fue realizada en tiempo real, permitiendo un muestreo continuo de la navegación y las acciones del usuario.

En la Figura 3.5, se muestra la reconstrucción tridimensional de la trayectoria del participante 4 (UN4) en el escenario neutro. Se observan los puntos de inicio (verde), fin (rojo) y los eventos de recolección de objetos (triángulos azules), sobre una línea gris que representa el recorrido completo.

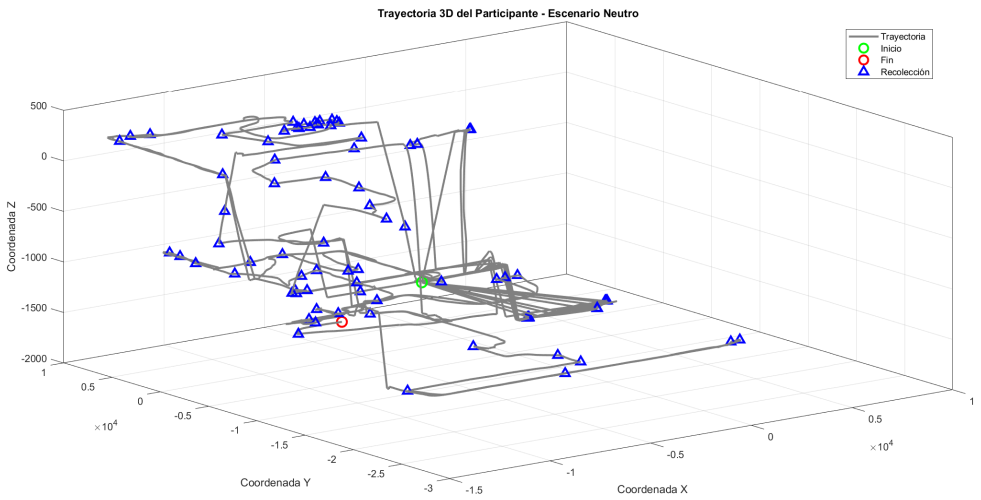


Figura 3.5: Trayectoria 3D del participante 4 en el escenario neutro. Se indican los puntos críticos del recorrido y las zonas de interacción.

3.1.3. Tercera etapa: integración PPG-RV

Sistema electrónico

El sistema electrónico empleado para la experimentación se representa en la Figura 3.6. Este sistema se encargó de la adquisición y visualización de señales fisiológicas utilizando tecnología de bajo consumo y alta precisión. Incluyó varios elementos clave, entre los cuales destacaron dispositivos electrónicos y sensores de tipo comercial que habían sido empleados previamente en otros estudios (Vananth et al., 2023), (Muthmainnah et al., 2022), (Cebada-Fuentes et al., 2023).
El sistema electrónico desarrollado para la experimentación se compuso de los siguientes elementos:

- **Placa Arduino Nano:** utilizada para realizar la adquisición de señales fisiológicas y controlar la comunicación entre los diferentes componentes del sistema. La placa fue responsable de procesar los datos obtenidos del sensor, almacenarlos y mostrar los resultados en tiempo real.

- **Sensor MAX30102:** este sensor se utilizó para medir la FC y la saturación de oxígeno en la sangre. El MAX30102 es un sensor óptico que empleó LEDs rojos e infrarrojos para detectar la cantidad de luz absorbida por el flujo sanguíneo en la piel. Este sensor se colocó en una zona capilar (mejilla izquierda) del sujeto y generó la señal de PPG, la cual fue empleada como referencia en el análisis de las señales fisiológicas entre diferentes escenarios experimentales. Al comparar las variaciones en la señal de PPG entre estos escenarios, se evaluó si la exposición a la RV produjo diferencias significativas en los parámetros fisiológicos, sugiriendo un posible aumento en el estrés inducido por la RV.

- **Pantalla OLED:** se integró una pantalla OLED que mostró en tiempo real la oxigenación de la sangre, la frecuencia cardíaca y la representación gráfica de la señal PPG captada por el sensor MAX30102. Esta pantalla proporcionó una interfaz visual clara, permitiendo la observación directa de los datos por parte del experimentador.

- **Visor Oculus Quest 2:** los lentes de RV Meta Quest 2 fueron utilizados para

sumergir al sujeto en entornos virtuales controlados durante el experimento. Su alta resolución y capacidad para capturar movimientos precisos brindaron un entorno realista para la experimentación.

- **Motor gráfico Unreal Engine 4.27.2:** se utilizó para desarrollar entornos virtuales realistas e inmersivos. Su capacidad gráfica permitió crear escenarios interactivos en 3D que simularon estímulos visuales y auditivos precisos.

- **Cable USB:** fue utilizado para la comunicación entre la placa Arduino Nano y el sistema de RV Unreal Engine 4.27.2, mediante el protocolo UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Esta conexión permitió transferir los datos fisiológicos capturados por el sensor MAX30102 a la interfaz del motor de RV, facilitando su almacenamiento y procesamiento adicional en tiempo real.

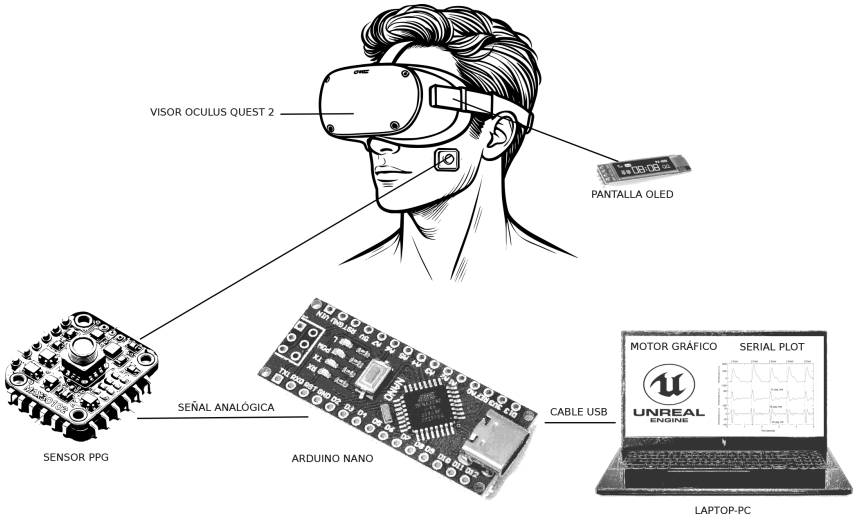


Figura 3.6: Diagrama a bloques del sistema electrónico para adquisición de la señal de PPG. Imagen propia.

Este sistema electrónico fue diseñado para ser adaptable y eficiente, garantizando la correcta adquisición de datos fisiológicos sin causar molestias al sujeto. El sensor MAX30102 fue desmontable y ajustable, permitiendo configuraciones flexibles dependiendo de las necesidades del experimento.

Durante las pruebas de validación del experimento, se utilizó, además del sistema electrónico propuesto, un oxímetro digital comercial que proporcionó la señal de referencia de PPG. Este dispositivo permitió registrar las señales de oxigenación de la sangre y frecuencia cardíaca del sujeto en tiempo real.

Al utilizar el oxímetro comercial como referencia, se facilitó la captura de señales analógicas de base, las cuales fueron fundamentales para evaluar cómo varió la respuesta fisiológica de los sujetos entre distintos escenarios. Los datos obtenidos del oxímetro en cada escenario, junto con las señales del sistema desarrollado, se sometieron a un análisis estadístico para determinar si existieron diferencias significativas entre las respuestas fisiológicas en los distintos contextos experimentales. Esta comparación permitió evaluar la capacidad del sistema para detectar cambios inducidos por la exposición a los escenarios de RV, asegurando así su utilidad en el análisis de la respuesta de estrés fisiológico en los sujetos durante la prueba.

Adicionalmente, para garantizar la seguridad eléctrica de los participantes, se seleccionaron dispositivos que no presentaron riesgos durante la adquisición de señales fisiológicas, ya que no realizaron una inyección de corriente en los sujetos. Además, todo el sistema, incluida la computadora, los lentes de RV y el resto de la electrónica, funcionó mediante baterías, sin ninguna conexión directa a la red eléctrica. Esto minimizó aún más cualquier posible riesgo de exposición a fuentes de corriente alterna, asegurando la protección de los participantes durante la experimentación.

El oxímetro digital comercial tiene la capacidad de medir parámetros como la oxigenación de la sangre y la frecuencia cardíaca de forma no invasiva (Rojas & Mosquera, 2024). Por otro lado, la placa Arduino Nano y los sensores utilizados demostraron ser seguros y efectivos en estudios previos (Vananth et al., 2023). Además, estos dispositivos fueron utilizados en investigaciones anteriores sin reportarse incidentes adversos, lo que confirmó su seguridad para los participantes. Esto se debió a consideraciones clave como:

- **Oxímetro digital comercial:** este dispositivo fue diseñado para operar de manera no invasiva, utilizando luz para medir la oxigenación de la sangre sin causar daño o molestia a los sujetos. Su funcionamiento implicó la emisión de luz a través de la piel, lo que permitió la captación de la señal PPG sin riesgos eléctricos.

- **Sistema basado en Arduino Nano:** aunque este sistema no contó con aislamiento galvánico integrado, se tomaron medidas específicas para asegurar la protección eléctrica. Se empleó un cable USB para la comunicación entre la placa Arduino y el equipo de cómputo, proporcionando así un nivel de aislamiento. La placa Arduino

operó con un voltaje regulado de 5.0V, alimentándose directamente de la salida de voltaje del equipo de cómputo, el cuál durante los experimentos se desconectaba de la línea eléctrica y funcionaba con la bateria interna.

3.1.4. Cuarta etapa: experimentación

El experimento se realizó en la Facultad de Ingeniería, específicamente en un cubículo del área de posgrado (planta alta del edificio G). El espacio contó con una computadora portátil personal (laptop), un escritorio y sillas para el participante y el experimentador. Durante el experimento, el participante tuvo colocadas las gafas de RV, sostuvo los controles en sus manos y permaneció de pie en cada escenario. Se aseguró que el espacio estuviera libre de obstáculos para permitir al participante moverse con libertad y seguridad, como se muestra en la Figura 3.7 .

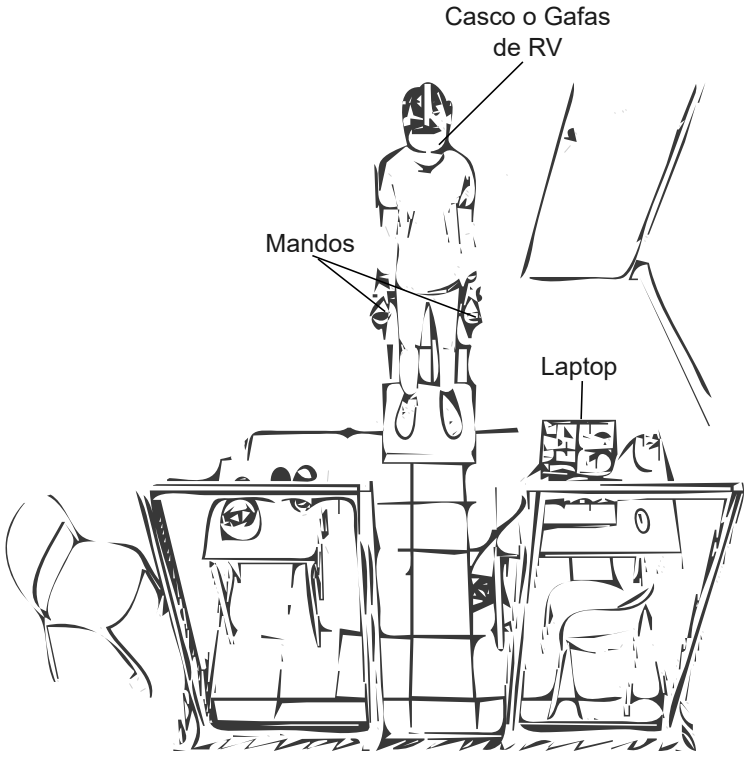


Figura 3.7: Representación de participante equipado con gafas de RV y controles en sala experimental.

Documentación

Si el sujeto cumplió con los criterios de inclusión, se le proporcionaron los siguientes documentos impresos y materiales para completar la información requerida y participar

en la prueba de inducción de estrés:

- Formatos de registro de participantes (véase Apéndice A).
- Carta de consentimiento informado acorde al experimento (véase Apéndice C).

En estos documentos se garantizó el anonimato de cada participante, de modo que, al concluir el experimento, no fue posible identificar a ninguno de ellos. Esta medida aseguró la confidencialidad y protegió la privacidad de los datos de los sujetos.

Software

El software contemplado durante la experimentación constó de:

- **IDE de Arduino:** para la programación y desarrollo del sistema electrónico que incluyó el sensor de PPG y el oxímetro.
- **Unreal Engine 4.27.2:** para la creación y reproducción de entornos virtuales en los que se llevó a cabo la inducción de estrés.
- **PuTTY:** para la comunicación serial y monitoreo de datos transmitidos desde el sistema electrónico.
- **Excel:** para la lectura y análisis de los datos registrados en formato CSV.
- **SerialPlot:** para la visualización y registro de datos en tiempo real.
- **MATLAB 2022b:** para realizar el procesamiento y análisis de los datos capturados durante la experimentación.

Descripción del experimento

El diseño experimental tuvo como objetivo registrar señales de PPG en los participantes, mientras eran expuestos a pruebas de inducción de estrés en entornos virtuales controlados. Para ello, se empleó un sensor de PPG colocado en la mejilla del participante, como se muestra en la Figura 3.8. Este procedimiento permitió analizar la respuesta fisiológica de los sujetos mediante la medición de la FC, así como obtener datos sobre

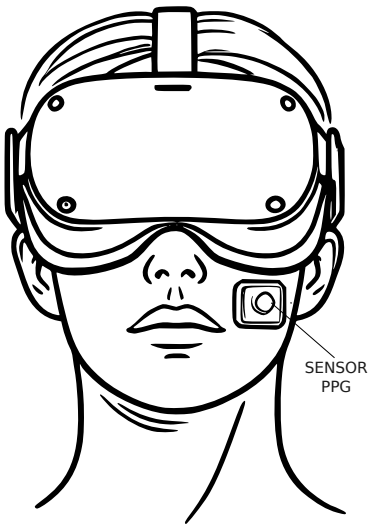


Figura 3.8: Región contemplada para la adquisición de la señal de PPG.

su movilidad dentro del entorno virtual, tales como velocidad de desplazamiento, giros y cambios de dirección.

Los sujetos fueron sometidos a las siguientes fases:

- **Fase de preparación y registro:** se proporcionó al participante una descripción general del experimento, detallando los objetivos y el procedimiento. A continuación, se le entregaron el formato de registro y la carta de consentimiento informado para su firma. Tras firmar los documentos, el participante fue instrumentado con el sensor de PPG para medir su señal fisiológica y se le colocaron las gafas o casco de RV. Asimismo, se le dieron instrucciones sobre la primera actividad, incluyendo la posición que debía adoptar durante el experimento.

- **Fase I - Escenario de familiarización:** en este primer escenario, el sujeto fue expuesto a un entorno virtual sin estresores, cuyo objetivo principal fue que se familiarizara con los controles y la dinámica del entorno. El sujeto realizó una tarea sencilla, como navegar por un laberinto sin restricciones de tiempo ni de presión. Aunque no se buscó inducir estrés, se registraron las señales PPG para establecer una línea base fisiológica, así como métricas de navegación como el tiempo empleado y las trayectorias seguidas.

  Fase de recuperación: finalizada la fase de familiarización, se detuvo la adquisición de la señal de PPG y el participante recibió un breve descanso. Durante este tiempo, se le solicitó que respondiera el inventario IDARE en su versión de estado (SXE)

para evaluar el estrés percibido. Al inicio de la sesión, también se aplicó el inventario IDARE en su versión de rasgo (SXR) para evaluar la predisposición general al estrés. Este periodo permitió preparar al participante para la siguiente fase del experimento.

- **Fase II - Escenario sin estresores:** en esta segunda fase, el sujeto realizó nuevamente la tarea de navegación en el laberinto, pero sin la presión de los estresores. El objetivo fue localizar los objetos establecidos, sin límite de tiempo para completar la tarea. Se registraron nuevamente las señales de PPG para continuar evaluando el estado fisiológico del participante en un entorno sin estrés, así como métricas relacionadas con la tarea, como el tiempo empleado y las trayectorias seguidas.

  Fase de recuperación: al finalizar esta fase, se detuvo la adquisición de la señal de PPG y el participante tuvo otro breve periodo de descanso. Se le solicitó que respondiera un cuestionario sobre el nivel de estrés percibido durante esta fase. Esto le permitió prepararse para el siguiente escenario.

- **Fase III - Escenario con estresores psicológicos y físicos:** en este último escenario, el participante realizó la tarea de navegación en el laberinto en un entorno que combinó estresores psicológicos (como un temporizador visible y sonidos) con estresores físicos (como efectos visuales y otros estímulos auditivos). Se registró la señal PPG para medir la respuesta fisiológica al estrés acumulado y se analizaron las mismas métricas de rendimiento que en los escenarios anteriores: número de objetos encontrados, tiempo empleado y trayectorias seguidas.

  Fase de recuperación y cierre: al concluir esta fase, se detuvo la adquisición de la señal de PPG y se retiró el sensor del participante. Se le solicitó responder un último cuestionario sobre su nivel de estrés percibido durante esta última fase; la elaboración de dicho cuestionario se basó en la escala visual analógica (Visual Analogue Scale, VAS). Finalmente, se agradeció su participación y se dio por terminado el experimento.

3.1.5. Quinta etapa: adquisición, procesamiento y análisis integral de datos

Esta etapa se centró en el registro estructurado y el tratamiento de los datos obtenidos durante la aplicación experimental. Se recopilaron datos fisiológicos, psicológicos y conductuales de cada participante, con el objetivo de evaluar el impacto de los entornos virtuales sobre el estado emocional y el desempeño espacial.

A continuación, se describen las subetapas que conformaron esta fase:

- **Adquisición y procesamiento de datos:** Se recopilaron tres tipos principales de datos:
  - **Fisiológicos:** adquisición de señales de PPG.
  - **Psicológicos:** aplicación del Inventario IDARE en sus versiones de estado y rasgo, así como cuestionarios subjetivos desarrollados ad hoc, donde los participantes calificaron el estrés percibido, la complejidad de la tarea, la competencia táctica, la satisfacción con su desempeño y la comparación entre escenarios.
  - **Conductuales:** trayectorias de navegación 3D, distancia recorrida, objetos recolectados y errores de desempeño durante las tareas espaciales.
- **Análisis estadístico:** Se compararon métricas entre escenarios neutro y estresante. Para variables continuas como distancia, tiempo y PRV se aplicaron pruebas t pareadas o de Wilcoxon según la normalidad. Para los puntajes de ansiedad (IDARE) y percepción subjetiva se realizaron comparaciones intra-sujeto. También se evaluaron correlaciones entre ansiedad percibida y desempeño.

Adquisición y procesamiento de datos

Durante cada sesión experimental, los datos fueron registrados automáticamente y almacenados en archivos individuales con formato `.csv`, generando dos archivos por participante: uno correspondiente al escenario neutro y otro al escenario estresante.

Cada participante fue identificado mediante un código único asignado con el fin de garantizar la trazabilidad de los datos y la confidencialidad de la información personal.

El identificador siguió la estructura IDXX, donde los dos dígitos finales correspondieron al número de participante (por ejemplo, ID06 para el participante número seis).

Los archivos generados durante cada sesión fueron nombrados de forma sistemática utilizando los prefijos `SN` (Escenario Neutro) y `SE` (Escenario Estresante), seguidos del identificador del participante (por ejemplo, `SN_ID06.csv` y `SE_ID06.csv`).

Esta nomenclatura permitió la clasificación automática de los registros y su integración directa en los scripts de análisis desarrollados en MATLAB, lo que facilitó la automatización del procesamiento y la correspondencia entre las condiciones experimentales y los participantes.

Datos fisiológicos

Las señales PPG fueron adquiridas en tiempo real a una frecuencia de 12.5 Hz y almacenadas en archivos `.csv`. Cada archivo contiene columnas correspondientes al tiempo de adquisición (`Time (ms)`), la detección de latido (`Beat`) y el valor de la señal PPG (`Signal`).

La Tabla 3.1 muestra un fragmento representativo de los datos registrados para el participante 4 durante el escenario neutro, incluido con el objetivo de ilustrar el formato de almacenamiento de los registros fisiológicos.

Tabla 3.1: Fragmento de los datos registrados en formato CSV para el participante 4 durante el escenario neutro.

Time (ms)	**Beat**	**Signal**
391957	91	87
392037	91	45
392117	91	7
392197	90	16
392276	90	75
392356	90	118

El análisis posterior se realizó en MATLAB, aplicando filtrado, detección de picos, segmentación y extracción de la variabilidad de ritmo cardíaco (PRV).

La frecuencia de muestreo de 12.5 Hz se eligió con base en el teorema de Nyquist-Shannon (Shannon, 2006), que requiere al menos el doble de la frecuencia más alta presente en la señal. En señales PPG, las frecuencias útiles oscilan entre 0.67 y 2.17 Hz (40 a 130 latidos por minuto), lo cual sugiere una mínima de 4 Hz (Allen, 2007). Sin embargo, 12.5 Hz ofrece una mayor resolución temporal y mejora la relación señal-ruido.

Estudios como los de Charlton (Charlton et al., 2016) respaldan el uso de 10–25 Hz para análisis fiables de PPG, mientras que Tamura (Tamura et al., 2014) considera 12.5 Hz un punto óptimo entre precisión, consumo energético y tamaño de almacenamiento en dispositivos portátiles.

El procesamiento de señales PPG para el análisis de la PRV se implementó mediante un algoritmo desarrollado en MATLAB (véase Apéndice F), diseñado para caracterizar la respuesta del SNA ante estrés. En este estudio, se calcularon métricas temporales de PRV que han demostrado ser sensibles a los cambios en la actividad del SNA.

En la etapa de preprocesamiento, la señal PPG se filtró utilizando un filtro Butterworth pasabanda de orden 7, con frecuencias de corte de 0.67 Hz (40 lpm) y 2.17 Hz (130 lpm). Este rango permitió conservar los componentes fisiológicos relevantes mientras se eliminaba el ruido por movimiento y artefactos de alta frecuencia. Posteriormente, la señal se normalizó restando su valor medio y dividiendo por su amplitud máxima, lo que facilitó la comparación entre registros de diferentes sujetos.

Para la detección de pulsos, se implementó un algoritmo basado en la derivada de la señal PPG, que resalta los flancos ascendentes característicos de cada onda de pulso. Los picos se identificaron utilizando umbrales adaptativos de prominencia (0.5 % del valor máximo de la derivada) y distancia mínima entre pulsos (0.5 segundos). Además, se incorporó una validación morfológica que descartó pulsos con anchos atípicos, definidos como aquellos que superaban 2.5 desviaciones estándar de la distribución esperada.

Las métricas de PRV se calcularon a partir de los intervalos entre pulsos (IPI) que es el análogo en PRV del IBI (Inter-Beat Interval) utilizado en HRV (Schäfer et al., 2013), previamente filtrados para excluir valores fuera del rango fisiológico (300–1500 ms) y suavizados con una mediana móvil de 5 puntos. Estas métricas se incluyen: la media de los intervalos interlatidos (MeanIPI), que representa el valor promedio de los intervalos entre

latidos y refleja el ritmo cardíaco basal; la desviación estándar de estos intervalos (StdIPI), que cuantifica la variabilidad general asociada a la actividad simpática y parasimpática; el RMSSD, o raíz cuadrada de la media de las diferencias sucesivas al cuadrado, reconocido por su sensibilidad a la modulación parasimpática y útil para detectar respuestas rápidas al estrés; la frecuencia cardíaca media (HRMean), la cual se incrementa ante la activación simpática; y el coeficiente de variación (CV), definido como (StdIPI/MeanIPI) $\times$ 100, que permite una comparación relativa entre individuos con diferentes frecuencias cardíacas. Estas métricas fueron seleccionadas por su capacidad conjunta para caracterizar el balance simpático-parasimpático y por su uso extendido en estudios previos (Castañeda et al., 2018; Shaffer & Ginsberg, 2017).

Para evaluar la modulación del SNA, se aplicó un análisis espectral sobre la serie de IPI utilizando el método de Welch. Para ello, los IPI fueron remuestreados a una frecuencia constante (por ejemplo, 4 Hz), permitiendo estimar la densidad espectral de potencia (PSD) en tres bandas: Very Low Frequency (VLF) (0.003–0.04 Hz), Low Frequency (LF) (0.04–0.15 Hz) y High Frequency (HF) (0.15–0.4 Hz). Estas bandas reflejan mecanismos fisiológicos como la termorregulación, la actividad simpática y la modulación parasimpática, respectivamente. Además, se calculó el cociente LF/HF, comúnmente utilizado como un índice del balance autonómico.

Para evaluar la PRV, se implementaron dos enfoques complementarios de segmentación temporal de los datos:

- Ventanas móviles: se utilizaron segmentos de 5 minutos de duración con un solapamiento del 50 % (2.5 minutos), lo que permite capturar variaciones dinámicas en la actividad autonómica a lo largo del registro. Este método es especialmente útil para identificar patrones de respuesta al estrés o cambios fisiológicos transitorios, ya que genera una serie temporal de métricas PRV con alta resolución temporal.

- Ventana fija de referencia: se definió un segmento único entre los minutos 5 y 10 del registro, seleccionado por ser un período estable (tras descartar los primeros 5 minutos de adaptación inicial) y permitir comparaciones estandarizadas entre sujetos al analizar un intervalo idéntico.

Datos psicológicos

Para evaluar los efectos psicológicos de los entornos virtuales desarrollados, se emplearon dos instrumentos principales:

1. **Inventario IDARE:** aplicado en diferentes momentos del experimento, permitió medir la ansiedad como rasgo (`AR`) al inicio, y como estado después de cada entorno (`AE1` para el escenario neutro y `AE2` para el estresante). Se calcularon puntuaciones crudas, puntuaciones T (`ART`, `AE1T`, `AE2T`), percentiles (`ARP`, `AE1P`, `AE2P`).

2. **Cuestionarios subjetivos post-escenario:** tras la experiencia en cada entorno, los participantes calificaron:

   - Estrés percibido (`EstPer1`, `EstPer2`).
   - Complejidad de la tarea 1 y 2 (`ComTa1`, `ComTa2`).
   - Comparación entre escenarios (`Comp`).
   - Satisfacción con el desempeño (`SatDese1`, `SatDese2`).

   Las respuestas se registraron en escalas tipo Likert de 1 a 5 excepto `Comp`, que fue de 1 a 3 (Véase Apéndice E).

El procesamiento del IDARE se automatizó con un script en MATLAB (Véase Apéndice G), que calcula puntuaciones brutas y convierte a valores T y percentiles. Esta implementación permitió evaluar cuantitativamente los cambios inducidos por los escenarios de RV y explorar su relación con el desempeño.

Datos conductuales

Se registraron automáticamente las trayectorias de navegación 3D exportadas desde Unreal Engine 4.27, las cuales incluían coordenadas espaciales (X, Y, Z), tiempo transcurrido y número de objetos recolectados.

Estos datos fueron procesados en MATLAB (Véase Apéndice J), donde se calcularon las siguientes métricas de desempeño para cada participante en ambos escenarios experimentales:

- **Distancia total recorrida:** (`E1DiTo`, `E2DiTo`) suma de las distancias euclidianas entre puntos consecutivos, en el Escenario 1 (neutral) y Escenario 2 (estresante), respectivamente.
- **Objetos recolectados:** (`E1ObTo`, `E2ObTo`) diferencia entre el valor final e inicial del contador de objetos en ambos escenarios.
- **Porcentaje de laberinto explorado:** (`E1PoTo`, `E2PoTo`) cociente entre la distancia total recorrida y la longitud máxima del entorno (629,791.76 unidades) para cada escenario.

Estas métricas fueron posteriormente correlacionadas con los niveles de ansiedad (IDARE) y las respuestas subjetivas para evaluar la influencia del estrés inducido en el desempeño espacial. Las métricas calculadas fueron posteriormente integradas con los datos psicológicos y fisiológicos, permitiendo un análisis cruzado de la influencia del estrés en el comportamiento espacial.

3.2. Análisis estadístico

Con el objetivo de evaluar los efectos de los entornos virtuales sobre el estado emocional y fisiológico de los participantes, se llevó a cabo un análisis estadístico de las variables obtenidas durante la etapa experimental. Este análisis se dividió en dos bloques: el primero orientado a las variables fisiológicas extraídas de las señales de PPG, y el segundo centrado en las variables psicológicas derivadas del inventario IDARE y los cuestionarios subjetivos post-escenario.

Análisis estadístico de variables fisiológicas

Para comparar las métricas fisiológicas de la HRV entre los escenarios SE y SN, se implementó un análisis estadístico en tres etapas, diseñado para identificar patrones de respuesta individual ante situaciones estresantes, así como evaluar diferencias grupales significativas. A continuación, se describen los métodos estadísticos empleados, los procedimientos implementados y la justificación de los criterios utilizados para determinar diferencias significativas.

Etapa 1: cálculo de diferencias absolutas

En la primera etapa, se calcularon las diferencias absolutas entre las métricas de HRV en los escenarios SE y SN para cada participante, utilizando la fórmula:

$$\Delta = \text{SE} - \text{SN} \tag{3.1}$$

Este cálculo permitió cuantificar los cambios fisiológicos inducidos por el SE en comparación con la condición basal (SN). Las métricas analizadas incluyeron indicadores temporales de PRV, como el número de picos detectados (NumPicos), el MeanIPI, la StdIPI, la RMSSD, la HRMean y el CV. Estas métricas se derivaron del procesamiento de señales PPG mediante un script en MATLAB (véase Apéndice F), que incluyó filtrado pasabanda (0.67–2.17 Hz), detección de picos y cálculo de métricas con ventanas móviles de 5 minutos (50 % de solapamiento) y una ventana única (minutos 5 a 10).

El uso de diferencias absolutas permitió capturar la magnitud y dirección de los cambios fisiológicos individuales, proporcionando una base para el análisis posterior de variaciones significativas. Este enfoque es común en estudios de PRV para evaluar respuestas fisiológicas a estímulos específicos, ya que refleja directamente los cambios inducidos por el estrés (Schäfer et al., 2013).

Etapa 2: análisis de diferencias relativas porcentuales

En la segunda etapa, se evaluaron las diferencias relativas porcentuales para identificar cambios relevantes en las métricas de PRV, utilizando la fórmula:

$$\text{Diferencia Relativa (\%)} = \left(\frac{\text{SE} - \text{SN}}{\text{SN}}\right) \times 100 \tag{3.2}$$

Se estableció un umbral del 10 % en valor absoluto para considerar una variación como significativa. Este criterio se justificó con base en la literatura, donde umbrales del 10 % al 15 % son comúnmente utilizados en estudios de HRV (análogo de la PRV) para distinguir cambios fisiológicos relevantes de fluctuaciones aleatorias o ruido inherente a las mediciones (Castaldo et al., 2019; Thayer et al., 2009). El umbral del 10 % permitió

filtrar variaciones menores que podrían atribuirse a variabilidad natural o artefactos, asegurando que solo los cambios fisiológicamente relevantes fueran considerados en el análisis posterior.

Etapa 3: clasificación de sensibilidad al estrés y análisis estadístico grupal

En la tercera etapa, se clasificó a los participantes según su sensibilidad al estrés. Un sujeto fue considerado *sensible* si presentaba diferencias relativas superiores al 10 % en valor absoluto en al menos tres métricas de PRV, incluyendo indicadores temporales (NumPicos, MeanIBI, StdIBI, RMSSD, HRMean, CV) y componentes espectrales del IPI, como la LF, HF y la razón LF/HF. Este criterio de clasificación se basó en la necesidad de identificar patrones consistentes de respuesta al estrés, considerando que cambios en múltiples métricas reflejan una respuesta fisiológica más robusta (Castaldo et al., 2019).

Para evaluar las diferencias grupales entre los escenarios SE y SN, se realizaron las siguientes pruebas estadísticas:

1. **Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk):** se evaluó la normalidad de las métricas de PRV en ambos escenarios utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, seleccionada por su sensibilidad en muestras pequeñas a medianas (Stetz, Long et al., 2008).

2. **Pruebas Estadísticas de Comparación:**

    - **Prueba t pareada:** se aplicó la prueba t pareada para comparar las métricas de PRV entre los escenarios SE y SN. Esta prueba es adecuada para diseños de medidas repetidas, como el presente, en los que los mismos sujetos se evalúan en ambas condiciones (Bridge, 1999).
    - **Prueba de Wilcoxon:** en caso de que alguna métrica no cumpliera con el supuesto de normalidad, se utilizó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, una alternativa no paramétrica robusta para datos pareados (Wilcox, 2011).

3. **Criterio de significancia estadística:** Se adoptó un umbral de significancia de $\alpha = 0.05$ para determinar diferencias estadísticamente significativas, un estándar aceptado en la investigación biomédica (Nuzzo, 2014).

Análisis estadístico de variables psicológicas

Las puntuaciones crudas obtenidas fueron transformadas en valores T y percentiles siguiendo las normas psicométricas del IDARE, permitiendo su clasificación en tres niveles:

- **Ansiedad baja:** puntuación cruda inferior a 41.75.
- **Ansiedad media:** entre 41.75 y 49.00 (inclusive).
- **Ansiedad alta:** puntuación cruda mayor que 49.00.

Esta clasificación es consistente con estudios previos que han propuesto puntos de corte para el STAI que sugiere que una puntuación cruda de 20 a 37 indica ansiedad baja, 38 a 44 ansiedad moderada y 45 o más ansiedad alta (Julian, 2011). Otros autores han reportado valores promedio de ansiedad estado y rasgo entre 39 y 43 en poblaciones no clínicas, apoyando el umbral superior de 49 como indicativo de ansiedad elevada (Knight et al., 1983). Asimismo, investigaciones aplicadas en contextos clínicos y educativos han validado estos puntos de corte para detección de niveles significativos de ansiedad (Womble et al., 2021).

Esta categorización fue aplicada tanto a la SXR como a la SXE, permitiendo evaluar si los participantes presentaban un aumento significativo en la ansiedad estado tras la exposición al entorno estresante, y si dicho aumento variaba en función de su nivel basal de AR.

Capítulo 4
Resultados y discusión

Este capítulo presenta y discute los resultados obtenidos a partir de la implementación de entornos virtuales diseñados para inducir estrés, integrando medidas psicométricas (IDARE), fisiológicas (señales PPG) y conductuales (desempeño en tareas de recolección de objetos). Los análisis se organizaron en función de los objetivos específicos del estudio y de las hipótesis planteadas, considerando tanto los efectos a nivel grupal como la variabilidad interindividual.

En primer lugar, se analizan los cambios en la **ansiedad estado** mediante el inventario IDARE, evaluando su relación con los niveles de ansiedad rasgo y con el desempeño en las tareas experimentales. Posteriormente, se presentan los resultados de la señal **PPG**, incluyendo métricas temporales y espectrales de la variabilidad del pulso (PRV), con énfasis en la detección de respuestas fisiológicas ante la exposición al entorno estresante.

De manera complementaria, se examina el **desempeño conductual** de los participantes en términos de objetos recolectados en los dos escenarios (neutral y estrés). Se incluyen análisis correlacionales que muestran cómo el nivel de estrés percibido influye en el rendimiento individual, así como comparaciones grupales que evidencian la ausencia de diferencias significativas en el promedio general entre escenarios. Asimismo, se identifican los casos individuales que presentaron mayores niveles de estrés y menor desempeño, reforzando la relevancia de la variabilidad intersujeto.

La discusión de los hallazgos se sustenta en la literatura científica y busca identificar patrones de respuesta emocional, fisiológica y conductual ante la exposición a estímulos controlados en RV. Se consideran tanto los promedios grupales como los perfiles individuales, reconociendo la importancia de integrar múltiples niveles de análisis para comprender el impacto del estrés.

Los resultados se presentan mediante tablas y figuras generadas a partir del procesamiento estadístico y del análisis de señales, e incluyen pruebas de significancia, análisis correlacionales y visualizaciones como diagramas de caja y bigotes, gráficas de pendiente y gráficos de dispersión con intervalos de confianza, con el fin de facilitar la interpretación

visual de los hallazgos.

4.1. Relación entre objetos recolectados y estrés percibido

Con el propósito de explorar la relación entre el desempeño en las tareas dentro de los entornos virtuales y el nivel de estrés percibido por los participantes, se analizó la correlación entre el **total de objetos recolectados** y el **estrés percibido** en los dos escenarios (neutral y de estrés). Los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Correlaciones entre objetos recolectados y estrés percibido

Escenario	Tipo	r	p
Escenario 1	Pearson	0.156	0.6279
Escenario 1	Spearman	0.174	0.5894
Escenario 2	Pearson	-0.580*	0.0481
Escenario 2	Spearman	-0.566	0.0549

* Correlación significativa al nivel $\alpha = 0.05$.

En el **Escenario 1 (neutral)**, las correlaciones fueron bajas y no significativas. El coeficiente de Pearson mostró un valor de $r = 0.156$ con un nivel de significancia $p = 0.628$, mientras que la correlación de Spearman fue de $r = 0.174$ con $p = 0.589$. Estos resultados indican que, en ausencia de estresores, el nivel de estrés percibido no presenta una relación clara con el desempeño de los participantes en la tarea de recolección de objetos.

Por otro lado, en el **Escenario 2 (estrés)** se observó una relación inversa de magnitud moderada entre ambas variables. El coeficiente de Pearson indicó $r = -0.580$, con un nivel de significancia de $p = 0.0481$, lo que sugiere una asociación estadísticamente significativa al nivel de $\alpha = 0.05$. De manera similar, la correlación de Spearman presentó un valor de $r = -0.566$ con $p = 0.0549$, cercano al umbral de significancia.

El signo negativo en ambos coeficientes indica una relación inversa entre el estrés percibido y el desempeño en la tarea. En otras palabras, a medida que aumenta el nivel de estrés reportado por los participantes, el número de objetos recolectados tiende a disminuir. La consistencia en la dirección de la correlación obtenida mediante los métodos de Pearson y Spearman refuerza la presencia de esta tendencia en los datos.

La ligera diferencia entre los valores de significancia obtenidos mediante los coeficien-

tes de Pearson y Spearman puede atribuirse al tamaño reducido de la muestra y a la sensibilidad de cada método frente a la distribución de los datos. Este comportamiento es consistente con estudios previos que han mostrado que el incremento del estrés puede afectar procesos cognitivos como la atención, la memoria de trabajo y la toma de decisiones, lo cual repercute directamente en el desempeño en tareas cognitivas y espaciales (Arnsten, 2009).

La Figura 4.1 ilustra gráficamente esta relación en el escenario de estrés, mostrando la nube de puntos, la recta de regresión y el intervalo de confianza del 95 %. Esta representación respalda los resultados estadísticos e indica que el estrés percibido puede tener un efecto negativo sobre el desempeño de los participantes en tareas de recolección de objetos dentro de un entorno virtual.

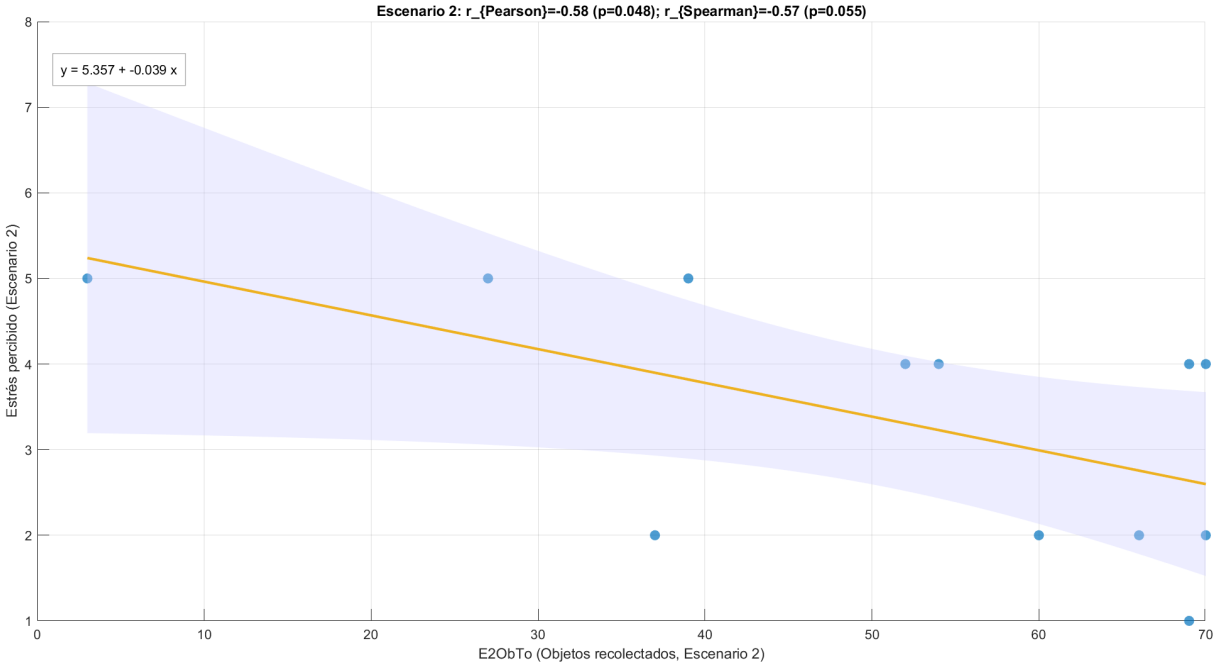


Figura 4.1: Diagrama de dispersión y recta de regresión entre el estrés percibido y el desempeño en la recolección de objetos en entorno virtual (Escenario E2). La línea sólida representa la regresión lineal, mientras que el área sombreada indica el intervalo de confianza del 95 %.

En conjunto, los hallazgos sugieren que el entorno de **estrés** generó un impacto observable tanto en el rendimiento cognitivo y motor como en las respuestas fisiológicas de los participantes, mientras que el entorno **neutral** no mostró evidencia de dicha influencia. Estos resultados apoyan la hipótesis de que la integración de estresores visuales y auditivos en entornos de RV induce estados de estrés medibles objetivamente. Además de los

análisis de correlación, se identificaron los participantes que presentaron simultáneamente un **alto nivel de estrés percibido** (≥ 4) y un **bajo desempeño** en el Escenario 2, en términos de objetos recolectados (valores iguales o inferiores a la mediana). Los casos se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Participantes con alto estrés percibido (4) y bajo desempeño (objetos recolectados $\leq$ mediana) en el Escenario 2

ID	**Objetos recolectados (E2ObTo)**	**Estrés percibido (EstPer2)**
7	54	4
8	27	5
11	39	5
13	3	5
14	52	4

Como se aprecia, cinco sujetos (ID 7, 8, 11, 13 y 14) cumplen con este criterio. Estos participantes reportaron niveles de estrés percibido de 4 o 5, y recolectaron entre 3 y 54 objetos, valores inferiores al promedio general de desempeño (49.5 objetos considerando ambos escenarios). La presencia de estos casos refuerza la tendencia encontrada en los análisis estadísticos, donde se observó una correlación negativa moderada entre el estrés percibido y el desempeño. En términos prácticos, estos hallazgos sugieren que el aumento en el estrés experimentado por los individuos se tradujo en una disminución tangible en su rendimiento dentro de la tarea de recolección, lo que aporta evidencia empírica sobre el impacto del estrés en escenarios virtuales diseñados para inducir presión cognitiva y emocional.

4.1.1. Comparación del desempeño entre escenarios

Se comparó el número total de objetos recolectados por los participantes en el Escenario 1 (neutral) y en el Escenario 2 (estrés). Los resultados descriptivos muestran que, en promedio, se recolectaron 47 objetos en el escenario neutral (DE = 15.76), mientras que en el escenario de estrés la media fue ligeramente mayor, con 51 objetos (DE = 21.12).

Sin embargo, las pruebas de significancia no evidenciaron diferencias entre ambos esce-

narios. La prueba t de Student para muestras pareadas arrojó un valor de $t(11) = -0.651$ con un nivel de significancia $p = 0.528$. De forma consistente, la prueba no paramétrica de Wilcoxon mostró $W = 33.0$ con $p = 0.663$. Estos resultados sugieren que, a nivel grupal, el estrés no produjo un cambio significativo en el desempeño medido como objetos recolectados.

Tabla 4.3: Comparación del desempeño (objetos recolectados) entre Escenario Neutral y Escenario de Estrés

	Escenario 1 (Neutral)	**Escenario 2 (Estrés)**
Media	47	51
DE	15.76	21.12
Mínimo	24	3
Mediana	43.5	57
Máximo	72	70
t pareada	$t(11) = -0.651$, $p = 0.528$	
Wilcoxon	$W = 33.0$, $p = 0.663$	

4.1.2. Métricas de desempeño

El análisis exploratorio mostró que el número de objetos recolectados no difirió de manera significativa entre escenarios (SN: 43.5 vs SE: 57, $p = 0.528$). En contraste, tanto la distancia recorrida (SN: 309,800 vs SE: 444,820 unidades, $p = 0.182$) como el porcentaje del laberinto completado (SN: 49.2 % vs SE: 70.6 %, $p = 0.120$) evidenciaron un aumento en el escenario estresante, con tamaños de efectos medianos aunque sin alcanzar significancia estadística. Estos resultados constituyen **indicios preliminares** de que la inducción de estrés puede incrementar el recorrido espacial.

En cuanto a la relación con la Ansiedad Estado, se observó una tendencia positiva (no significativa) entre el incremento de AE y las métricas de distancia y porcentaje del laberinto ($\rho \approx 0.39$). Esto sugiere que participantes con mayor aumento de ansiedad tendieron a recorrer más espacio dentro del entorno virtual.

4.1.3. Análisis individual integrado: estrés percibido, desempeño y ansiedad

Además del análisis grupal, se realizó un examen exploratorio individual con el objetivo de identificar patrones de convergencia entre el estrés percibido (EstPer), las métricas de desempeño — distancia total recorrida (DiTo = E1DiTo, E2DiTo), objetos recolectados (ObTo = E1ObTo, E2ObTo) y porcentaje de laberinto explorado (PoTo = E1PoTo, E2PoTo) — y los puntajes de Ansiedad Estado (AE1, AE2) y Ansiedad Rasgo (AR) del IDARE.

Correspondencia entre estrés percibido y distancia recorrida

De los 12 participantes evaluados, 10 reportaron un incremento en el estrés percibido (EstPer2–EstPer1) al pasar del Escenario1 al Escenario2. Entre estos participantes, 8 (80.0 %) también mostraron un aumento en la distancia total recorrida (E2DiTo–E1DiTo).

Considerando la muestra total, 8 de 12 participantes (66.7 %) presentaron un incremento simultáneo tanto en el estrés percibido como en la distancia recorrida.

Este resultado sugiere una posible correspondencia entre la respuesta subjetiva al estrés y el comportamiento motor observado durante la tarea de navegación, lo cual se aprecia en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Cambios individuales en estrés percibido y distancia recorrida entre el escenario neutro (E1) y el escenario con estresores (E2).

ID	Δ Estrés percibido	Δ Distancia recorrida	Incremento en ambas variables
01	+2	+85.000	Sí
02	+1	–12.000	No
03	–1	+64.000	No
04	+2	+98.000	Sí
05	+1	+23.500	Sí
06	+2	+45.800	Sí
07	+1	–5.200	No
08	+2	+31.700	Sí
09	+1	+12.400	Sí
10	–1	–8.900	No
11	+2	+27.600	Sí
12	+1	+19.300	Sí
Total	10/12 con ΔEstrés> 0	9/12 con ΔDistancia> 0	8/12 (66.7 %)

Métricas de desempeño

La mediana del cambio en estrés percibido (EstPer2–EstPer1) fue de +1 punto, mientras que la distancia recorrida (E2DiTo–E1DiTo) aumentó en aproximadamente 98,365 unidades. En contraste, los objetos recolectados (E2ObTo–E1ObTo) mostraron una ligera disminución (mediana = –1.5), lo que sugiere un posible deterioro en la *eficiencia de la tarea* bajo condiciones de estrés. El porcentaje del laberinto recorrido (E2PoTo–E1PoTo) también evidenció un incremento en el escenario estresante (SE). Los valores se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Métricas de desempeño: comparación entre Escenario Neutral (E1) y Escenario de Estrés (E2).

Métrica	**E1 (Mediana)**	**E2 (Mediana)**	**Δ(E2–E1)**	**Test**	p	**Efecto**
Objetos (ObTo)	43.5	57	–1.5	t pareada	0.528	$d_z = -0.19$
Distancia (DiTo)	309.800	444.820	+98.365	t pareada	0.182	$d_z = -0.41$
% Laberinto (PoTo)	49.2 %	70.6 %	+15.6	t pareada	0.120	$d_z = -0.49$

Relación desempeño–ansiedad

Se exploró la asociación entre los cambios en desempeño y el cambio en Ansiedad Estado (AE = AE2–AE1). Aunque no significativas, se observaron correlaciones positivas moderadas entre ΔAE y tanto la distancia total recorrida (E2DiTo–E1DiTo) como el porcentaje de laberinto recorrido (E2PoTo–E1PoTo) ($\rho = 0.39$, $p = 0.21$). Esto sugiere una tendencia a que los participantes con mayor aumento de ansiedad (AE2>AE1) recorrieran trayectorias más extensas en el escenario estresante.

Tabla 4.6: Correlaciones entre desempeño (E2–E1) y Ansiedad Estado (AE2–AE1).

Métrica ()	$\rho_{Spearman}$	p	N
Objetos (E2ObTo–E1ObTo)	0.07	0.82	12
Distancia (E2DiTo–E1DiTo)	0.39	0.21	12
% Laberinto (E2PoTo–E1PoTo)	0.39	0.21	12

Síntesis exploratoria

En suma, el análisis individual integrado sugiere que la mayoría de los participantes que reportaron incrementos en estrés percibido (EstPer2>EstPer1) también recorrieron trayectorias más extensas (E2DiTo>E1DiTo, E2PoTo>E1PoTo) en el escenario estresante, aunque con un rendimiento menor en recolección de objetos (E2ObTo<E1ObTo). Estos cambios se acompañaron de aumentos en los puntajes de Ansiedad Estado (AE2>AE1), lo que aporta **evidencia preliminar de convergencia** entre los niveles subjetivo, conductual y psicométrico en la inducción de estrés mediante RV.

4.2. Resultados psicológicos y de desempeño

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir del IDARE, aplicado con el objetivo de evaluar el impacto psicológico de los entornos de RV diseñados para inducir estrés. El análisis se enfocó tanto en los niveles de `AR` como en los cambios en ansiedad estado antes (`AE1`) y después (`AE2`) de la exposición a los escenarios virtuales.

Se examinaron las variaciones individuales y grupales en los puntajes, considerando la clasificación de los participantes en tres niveles de ansiedad rasgo: baja, media y alta. Además, se exploró la posible relación entre el cambio en ansiedad estado y el desempeño en la tarea experimental, con el objetivo de determinar si un mayor nivel de estrés subjetivo se asocia a una disminución en la eficacia de ejecución.

Los análisis estadísticos incluyeron pruebas de comparación de medias (t-student pareado), pruebas no paramétricas (Wilcoxon) y correlaciones (Spearman y Pearson), complementadas con representaciones gráficas que ilustran patrones individuales y grupales. Este enfoque permitió identificar tendencias relevantes que, aunque no siempre significativas en términos estadísticos, aportan evidencia inicial sobre la sensibilidad emocional diferencial frente a estímulos estresantes en función del perfil de ansiedad de los participantes.

4.2.1. Cambios en ansiedad estado según ansiedad rasgo

Se analizó el cambio en ansiedad estado (`AE2`, `AE1`) considerando tres niveles de `AR`, clasificados con los siguientes puntos de corte: ansiedad baja (< 41.75), media ($41.75 \leq AR < 49$) y alta (≥ 49). Los resultados indican que el grupo con ansiedad media presentó el mayor incremento promedio de ansiedad estado (+3.625), aunque sin alcanzar significancia estadística (prueba de Wilcoxon, ($p = 0.109$), como se muestra en las Tablas 4.7 y 4.8, y se visualiza en la Figura 4.2. En los grupos con ansiedad baja y alta no se observaron cambios significativos.

Tabla 4.7: Promedio del cambio en ansiedad estado (AE2 - AE1) por grupo de ansiedad rasgo

Grupo AR	**Promedio ΔAE**
Ansiedad Baja	0.000
Ansiedad Media	+3.625
Ansiedad Alta	0.000

Tabla 4.8: Resultados de la prueba de Wilcoxon (AE1 vs AE2) por grupo de ansiedad rasgo

Grupo AR	**W (Wilcoxon)**	**p-valor**	**Significancia**
Ansiedad Baja	1.5	1.000	No
Ansiedad Media	6.0	0.109	Tendencia
Ansiedad Alta	–	–	No aplicable

Adicionalmente, se realizó una prueba t de Student pareada sobre toda la muestra, sin distinguir niveles de ansiedad rasgo. El resultado tampoco fue estadísticamente significativo ($p = 0.1124$), indicando que globalmente la exposición al entorno estresante no generó un incremento significativo en ansiedad estado.

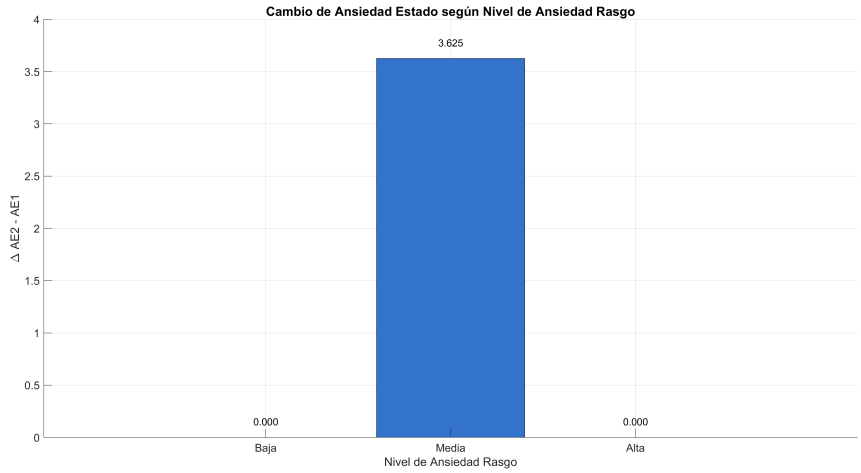


Figura 4.2: Diferencia promedio de ansiedad estado (AE2 - AE1) por grupo de ansiedad rasgo.

4.2.2. Visualización de cambios individuales y distribuciones

Las Figuras 4.3 y 4.4 ilustran los cambios individuales y la distribución de los puntajes AE1 y AE2 por nivel de ansiedad rasgo. Se observa un incremento más pronunciado en

el grupo de ansiedad media, mientras que los otros dos grupos presentan patrones más estables o incluso descendentes.

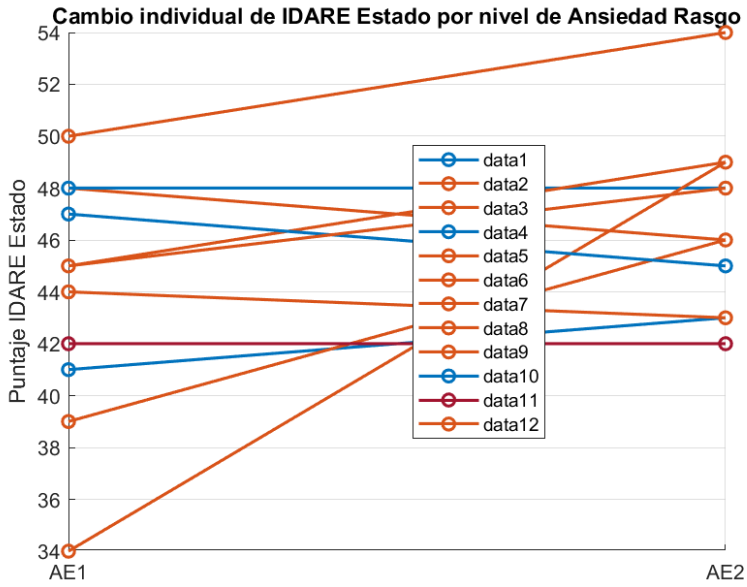


Figura 4.3: Cambio individual en los puntajes de ansiedad estado (AE1 y AE2) por nivel de ansiedad rasgo.

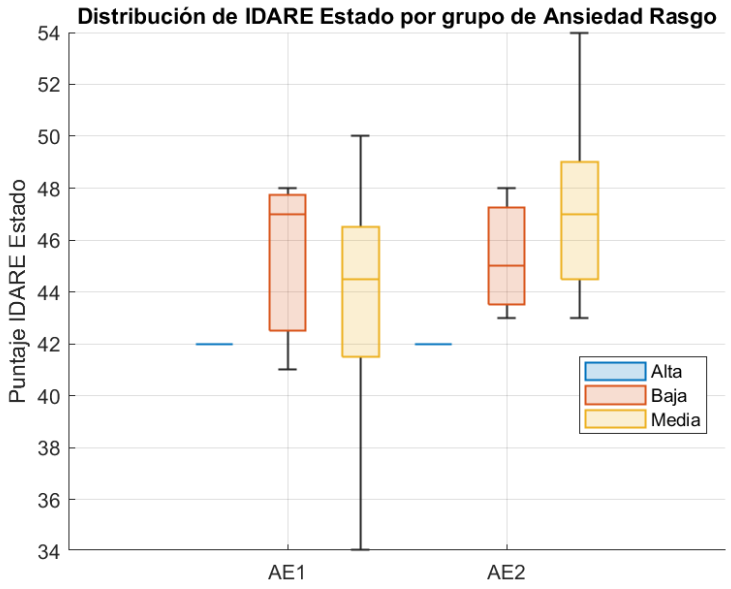


Figura 4.4: Distribución de puntajes de IDARE Estado (AE1 y AE2) por nivel de ansiedad rasgo.

4.2.3. Relación entre ansiedad estado y desempeño

Para analizar si el aumento en ansiedad estado (ΔAE) se relaciona con una disminución en el desempeño ($\Delta E = E2 - E1$), se calcularon los cambios individuales y se estimó

el coeficiente de correlación de Spearman, obteniéndose $r_s = -0.54$ con una tendencia a la significancia ($p = 0.069$). La correlación de Pearson fue similar ($r = -0.52$), sugiriendo que los participantes que incrementaron su ansiedad estado tendieron a rendir menos.

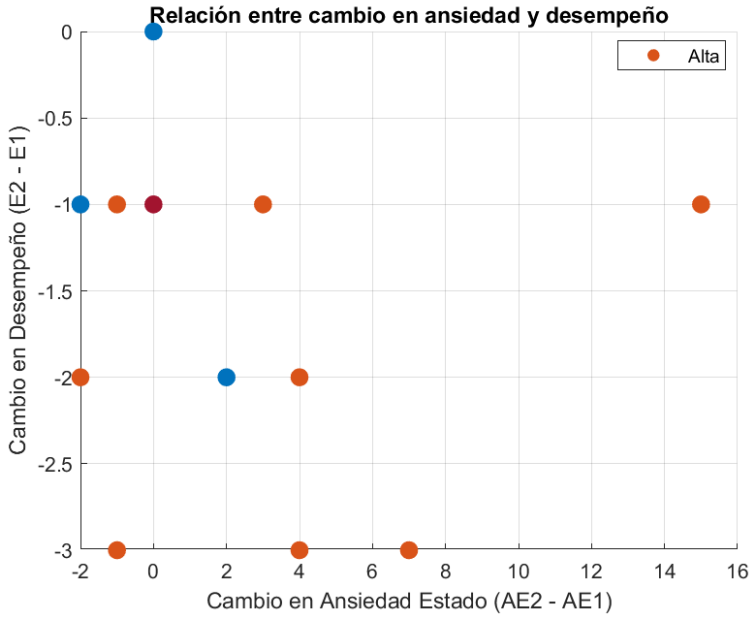


Figura 4.5: Relación entre cambio en ansiedad estado (ΔAE) y cambio en desempeño (ΔE) por grupo de ansiedad rasgo.

En la Figura 4.6, se visualiza el cambio en desempeño mediante boxplots agrupados por nivel de ansiedad rasgo. Todos los grupos muestran una tendencia al descenso, siendo el grupo media el de mayor dispersión.

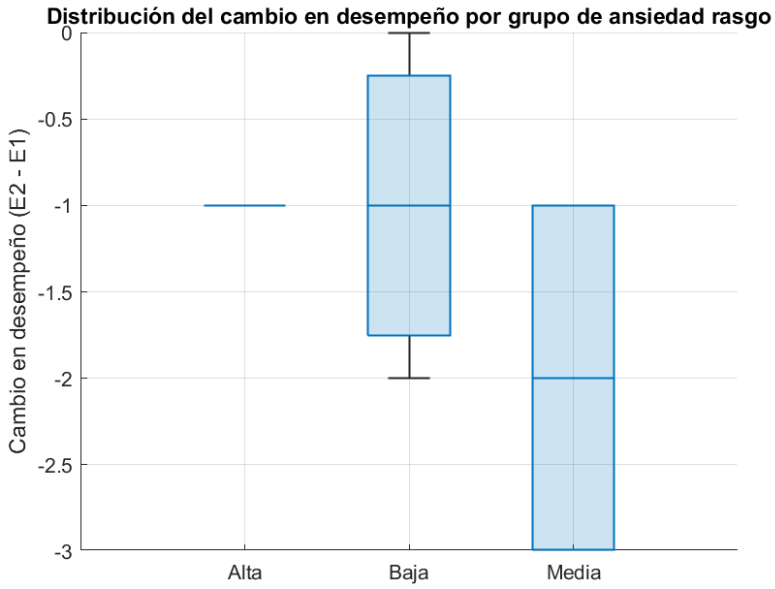


Figura 4.6: Distribución del cambio en desempeño (ΔE) según nivel de ansiedad rasgo.

4.2.4. Síntesis de resultados

Aunque los análisis no mostraron resultados estadísticamente significativos, se observan patrones relevantes:

- Los participantes con ansiedad rasgo media mostraron mayor reactividad emocional (mayor incremento en AE2).
- Estos mismos sujetos también evidenciaron mayor descenso en desempeño.
- La correlación negativa entre ansiedad estado y desempeño sugiere que un aumento en estrés podría perjudicar la ejecución.

Estos hallazgos apoyan parcialmente la hipótesis de que el entorno virtual estresante puede inducir cambios fisiológicos, especialmente en sujetos con ansiedad rasgo media, y justifican estudios posteriores con muestras más amplias.

4.3. Resultados de análisis de señal de PPG

Esta sección presenta los resultados derivados del análisis de la señal PPG obtenida durante la exposición a los entornos virtuales neutro y estresante. El objetivo principal fue identificar posibles respuestas fisiológicas al estrés inducido por RV mediante el estudio de la variabilidad de la señal de pulso (PRV), la cual constituye una alternativa accesible a la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV).

El análisis incluyó tanto métricas temporales (como RMSSD, HRMean, StdIBI y CV) como espectrales (LF, HF, LF/HF) calculadas a partir de los intervalos entre pulsos (IPI). Se aplicaron pruebas estadísticas paramétricas y análisis de diferencias relativas porcentuales para evaluar cambios entre condiciones, así como criterios de sensibilidad individual al estrés. Adicionalmente, se generaron representaciones gráficas tipo *slope plots* y espectros de densidad de potencia (PSD) para ilustrar los cambios individuales de manera visual.

Los resultados se estructuran en tres subsecciones: análisis grupal de métricas estadísticas, evaluación de la variabilidad individual, y análisis espectral de los IPI. Esta

aproximación multivariada permite capturar tanto patrones poblacionales como respuestas fisiológicas individuales, contribuyendo a una comprensión más integral de los efectos del estrés en entornos virtuales inmersivos.

Los resultados de las pruebas estadísticas se resumen en la Tabla 4.9. La mayoría de las métricas no mostraron diferencias significativas a nivel grupal entre los escenarios SE y SN ($p - valores > 0.05$), lo que sugiere que el estímulo estresante no indujo cambios consistentes en la población estudiada para NumPicos ($p = 0.5757$), MeanIBI ($p = 0.7495$), StdIBI ($p = 0.0640$), HRMean ($p = 0.7893$) y CV ($p = 0.0703$). Sin embargo, la métrica RMSSD presentó una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.0203$), indicando una mayor sensibilidad de esta métrica al estrés. El RMSSD, que refleja la actividad parasimpática, es particularmente relevante en estudios de estrés, ya que cambios en este indicador suelen asociarse con respuestas autonómicas a estímulos estresantes (Shaffer & Ginsberg, 2017).

Tabla 4.9: Resultados de las Pruebas Estadísticas para Métricas de PRV (SE vs. SN)

Métrica	Prueba Aplicada	Valor P
NumPicos	t-test	0.5757
MeanIBI	t-test	0.7495
StdIBI	t-test	0.0640
RMSSD	t-test	0.0203
HRMean	t-test	0.7893
CV	t-test	0.0703

El umbral del 10 % para diferencias relativas porcentuales se seleccionó por su capacidad para identificar cambios fisiológicos relevantes, evitando la inclusión de fluctuaciones menores que podrían deberse a variabilidad intrínseca o artefactos en las señales PPG. Este criterio es consistente con estudios previos que han utilizado umbrales similares para evaluar respuestas al estrés (H. Kim, Kim et al., 2018). La elección de un mínimo de tres métricas con cambios significativos para clasificar la sensibilidad al estrés se basó en la necesidad de detectar patrones robustos de respuesta, reduciendo la probabilidad de clasificaciones erróneas debido a variaciones aisladas.

El uso de un umbral de significancia estadística de $p = 0.05$ se justificó por su aceptación universal en la literatura científica, proporcionando un equilibrio entre sensibilidad y especificidad. La aplicación de pruebas t pareadas fue adecuada dado el diseño pareado del estudio y la normalidad de los datos, mientras que la prueba de Shapiro-Wilk aseguró la validez de este enfoque. La excepción de RMSSD ($p < 0.05$) resalta su utilidad como un marcador sensible para detectar respuestas al estrés, lo que está alineado con su rol como indicador de la modulación parasimpática (Camm et al., 1996).

4.3.1. Resutados de variabilidad individual

A pesar de que las diferencias grupales en las métricas de PRV no alcanzaron significancia estadística para la mayoría de los indicadores (excepto RMSSD, $p = 0.0203$), se observaron respuestas individuales marcadas. El análisis se basó en las diferencias relativas porcentuales entre los escenarios SE y SN, integrando métricas temporales (NumPicos, MeanIBI, StdIBI, RMSSD, HRMean, CV) y espectrales (LF, HF, LF/HF) derivadas de los intervalos entre pulsos (IPI) de las señales PPG. El procedimiento se detalla a continuación:

- **Cálculo de Diferencias Relativas:** Para cada sujeto, se calcularon las diferencias relativas porcentuales entre SE y SN según la fórmula $[(\text{SE} - \text{SN})/\text{SN}] \times 100$. Este cálculo, correspondiente a la Etapa 2 del análisis estadístico, cuantifica el impacto individual del estrés en la modulación autonómica.

- **Clasificación de Sensibilidad:** Un sujeto se clasificó como *sensible al estrés* si al menos tres métricas (temporales o espectrales) presentaban diferencias relativas superiores al 10 % en valor absoluto, conforme al criterio establecido en la Etapa 3 del análisis estadístico. Este umbral asegura la detección de respuestas fisiológicas robustas, integrando evidencia de la actividad simpática y parasimpática.

Los resultados del análisis temporal, resumidos en la Tabla 4.10, identificaron a cinco sujetos (ID4, ID5, ID12, ID15, ID16) como sensibles al estrés según las métricas de PRV, todos con cambios superiores al 10 % en HRMean, RMSSD y CV.

Tabla 4.10: Sensibilidad al estrés por sujeto (SN vs. SE) - Métricas temporales de PRV

Sujeto	Métricas con cambio (>10 %)	Sensible	Cambio HRMean (%)
ID4	3 (HRMean, RMSSD, CV)	Sí	+7.34
ID5	3 (HRMean, RMSSD, CV)	Sí	-12.47
ID6	2 (HRMean, CV)	No	-16.25
ID7	1 (CV)	No	+0.76
ID8	2 (HRMean, CV)	No	+7.29
ID12	3 (HRMean, RMSSD, CV)	Sí	-6.34
ID14	2 (HRMean, CV)	No	+3.53
ID15	3 (HRMean, RMSSD, CV)	Sí	-2.91
ID16	3 (HRMean, RMSSD, CV)	Sí	-8.90
ID17	2 (HRMean, CV)	No	+18.29
ID18	2 (HRMean)	No	+4.83
ID19	2 (HRMean, CV)	No	-25.17

4.3.2. Resultados del análisis espectral de IPI

El análisis espectral de los intervalos entre pulsos (IPI) derivados de señales PPG reveló variaciones en la modulación autonómica entre los escenarios SE y SN. La PSD se calculó para las bandas de baja frecuencia (0.04–0.15 Hz) y alta frecuencia (0.15–0.4 Hz), junto con la razón LF/HF, utilizando el método de Welch implementado en MATLAB (véase Apéndice H). Los resultados cuantitativos se resumen en la Tabla 4.11, que muestra la potencia absoluta (ms^2) y los cambios relevantes en LF/HF.

Tabla 4.11: Resultados del análisis espectral de IPI: potencia absoluta (ms^2) y razón LF/HF por sujeto en los escenarios SN y SE. La última columna indica si el cambio relativo en LF/HF entre escenarios supera el 10 %.

Sujeto	**LF SN / SE**	**HF SN / SE**	**LF/HF SN / SE**	**Cambio LF/HF (>10 %)**
ID4	395.90 / 947.46	310.45 / 339.45	1.28 / 2.79	Sí
ID5	507.03 / 529.55	434.96 / 460.44	1.17 / 1.15	No
ID6	1269.00 / 800.37	2161.90 / 856.53	0.59 / 0.93	Sí
ID7	6530.10 / 2950.90	21494.00 / 5873.50	0.30 / 0.50	Sí
ID8	744.36 / 1549.20	2140.00 / 2082.40	0.35 / 0.74	Sí
ID12	3242.60 / 988.37	6522.00 / 2425.20	0.50 / 0.41	Sí
ID14	1720.90 / 1163.60	1451.60 / 737.87	1.19 / 1.58	Sí
ID15	3874.60 / 1532.90	8144.20 / 2431.60	0.48 / 0.63	Sí
ID16	1567.30 / 465.67	2987.60 / 275.27	0.52 / 1.69	Sí
ID17	1462.50 / 2008.00	3075.80 / 3565.50	0.48 / 0.56	Sí
ID18	7473.80 / 6098.70	7207.90 / 13443.00	1.04 / 0.45	Sí
ID19	778.31 / 461.78	1409.60 / 410.31	0.55 / 1.13	Sí

La tabla muestra que 11 de los 12 sujetos presentaron cambios en LF/HF superiores al 10 % en valor absoluto al comparar los escenarios SN y SE. Este patrón sugiere variaciones en la modulación autonómica durante la exposición al escenario estresante. Los sujetos ID4, ID6, ID8, ID14, ID16, ID18 y ID19 exhibieron incrementos notables en LF/HF, sugiriendo una mayor activación simpática en SE, mientras que ID7, ID12, ID15 y ID17 mostraron cambios más moderados. Estos resultados complementan el análisis temporal (Ver sección 4.3.1), donde ID4, ID12, ID15 y ID16 fueron clasificados como sensibles al estrés, destacando la consistencia entre dominios.

La Figura 4.7 ilustra el espectro PSD para el sujeto ID4, donde se observan diferencias claras en las bandas LF y HF entre SE y SN, reflejando un aumento en la actividad simpática bajo estrés.

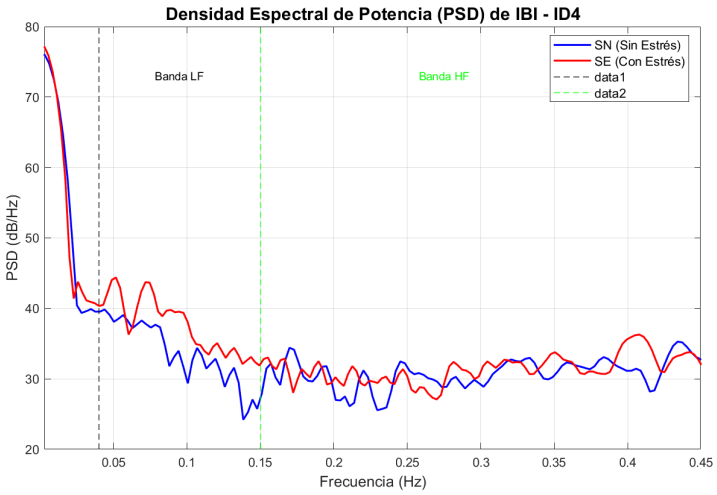


Figura 4.7: Densidad espectral de potencia (PSD) de los intervalos entre pulsos (IPI) para el sujeto ID4 en la ventana única (5–10 min). Las curvas muestran las diferencias en la distribución de potencia entre los escenarios sin estrés (SN, azul) y con estrés (SE, rojo) en las bandas LF (0.04–0.15 Hz) y HF (0.15–0.4 Hz).

4.3.3. Visualización de cambios individuales (gráficas de pendiente)

Para visualizar la heterogeneidad en las respuestas fisiológicas al estrés inducido por la RV, se generaron gráficos de pendiente (*slope plots*) que muestran los cambios individuales en las métricas de PRV entre los escenarios SN y SE. Estos gráficos, generados en MATLAB a partir de los datos de la ventana única (5–10 min, véase Apéndice H), representan las métricas temporales (RMSSD, HRMean, StdIBI, CV) y espectrales (LF/HF, LF, HF). Las líneas rojas indican un aumento en la métrica en SE respecto a SN, las azules una disminución, y las grises un cambio inferior al 1 % en valor absoluto. Esta visualización resalta patrones individuales, complementando el análisis grupal (Sección 3.2) y el análisis espectral (Sección 4.3.2).

Debido a su significancia grupal ($p = 0.0203$), el RMSSD es una métrica clave, y su *slope plot* se presenta en la Figura 4.8. La Figura 4.12 muestra el ratio LF/HF, relevante por su sensibilidad al balance autonómico.

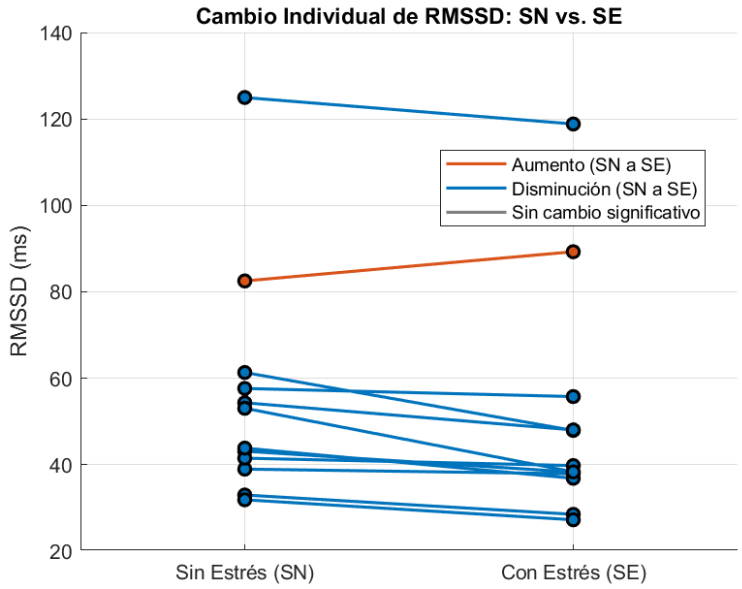


Figura 4.8: Cambios individuales del RMSSD (ms) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). Las líneas rojas indican un aumento, las azules una disminución, y las grises un cambio insignificante de SN a SE.

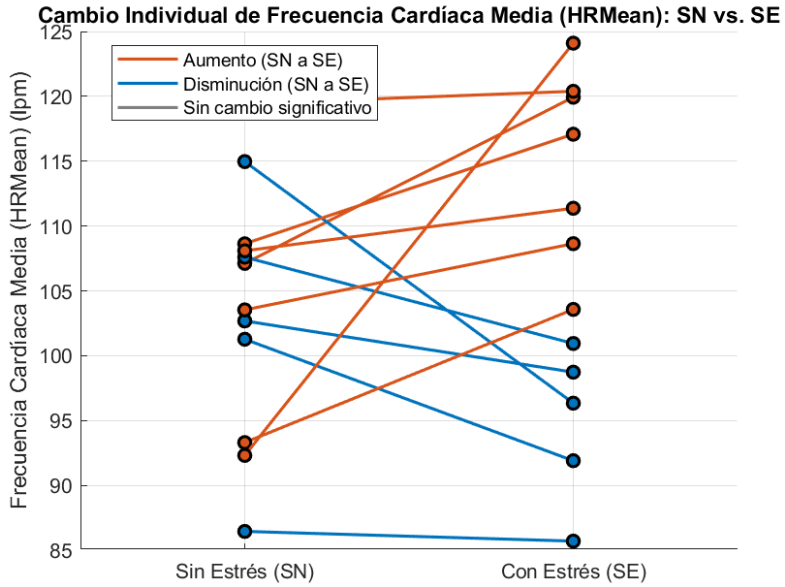


Figura 4.9: Cambios individuales de la Frecuencia Cardíaca Media (lpm) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). Las líneas rojas indican un aumento, las azules una disminución, y las grises un cambio insignificante de SN a SE.

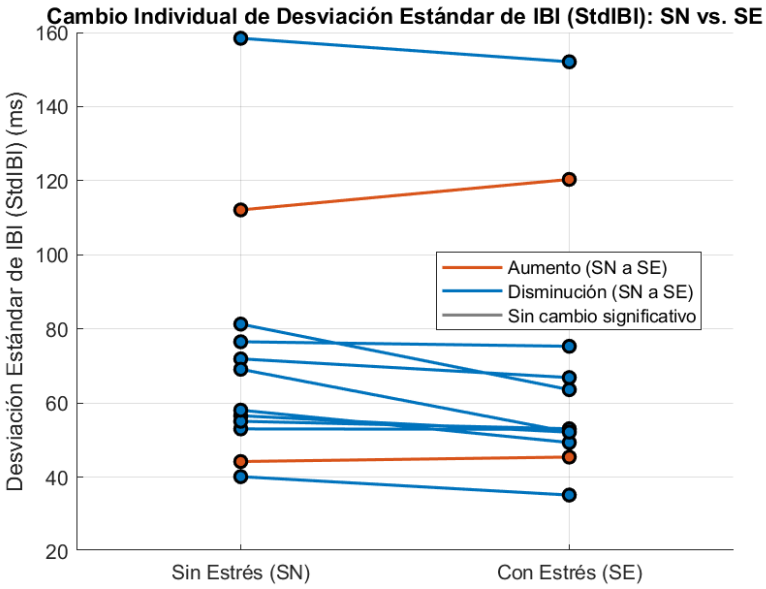


Figura 4.10: Cambios individuales de la Desviación Estándar de IBI (ms) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE).

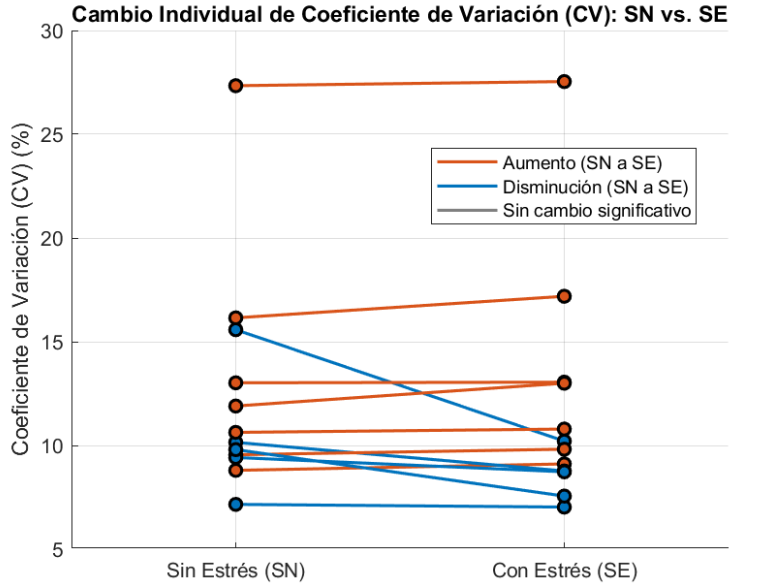


Figura 4.11: Cambios individuales del Coeficiente de Variación (%) entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE).

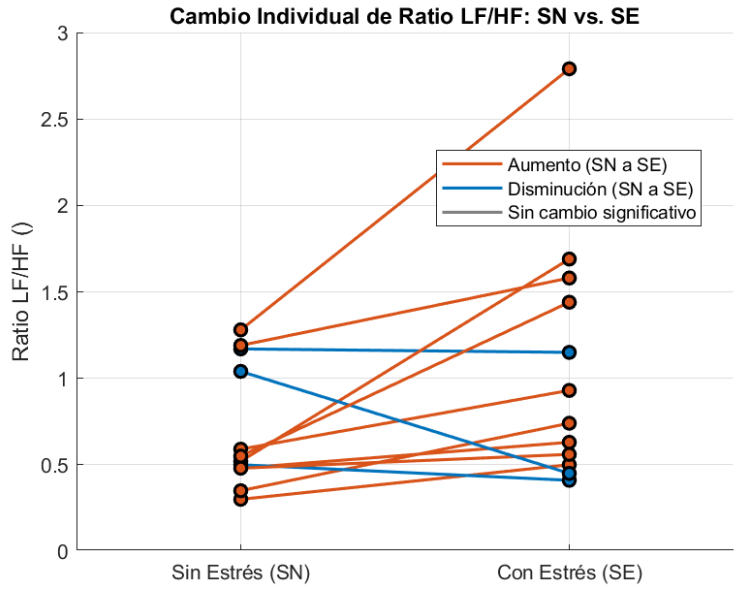


Figura 4.12: Cambios individuales del Ratio LF/HF de los IBI entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE). Las líneas rojas indican un aumento, las azules una disminución, y las grises un cambio insignificante de SN a SE.

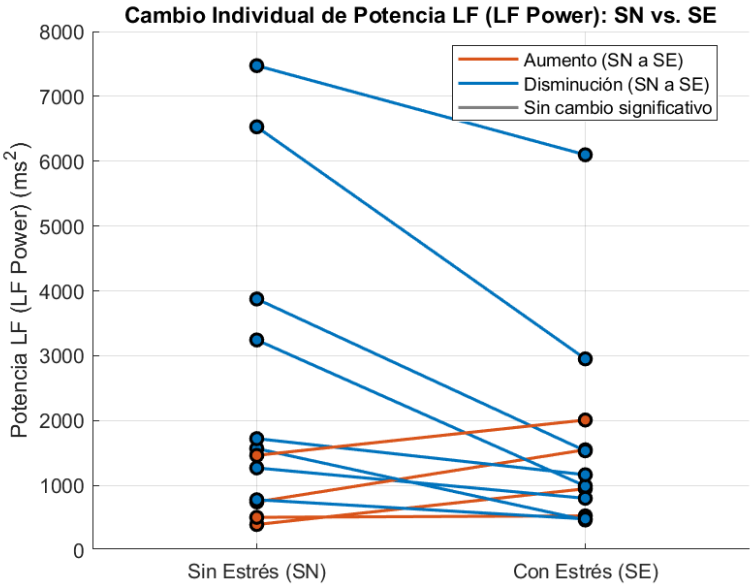


Figura 4.13: Cambios individuales de la Potencia LF (ms^2) de los IBI entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE).

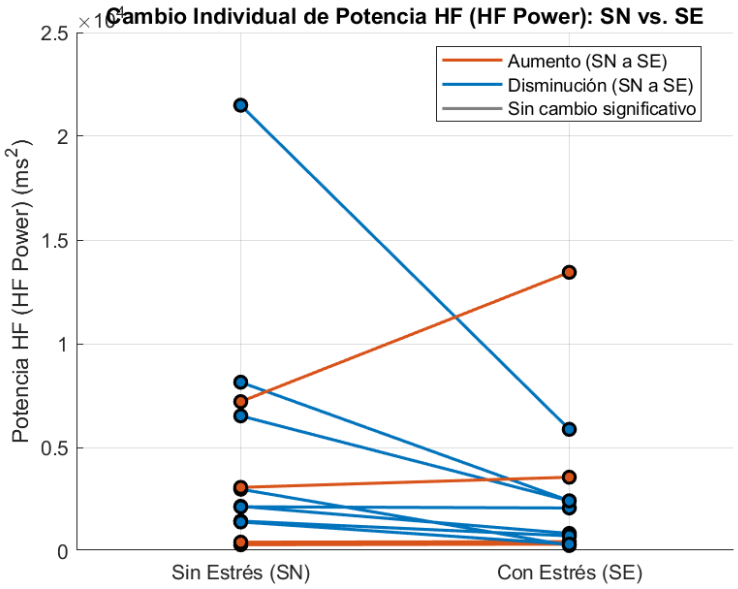


Figura 4.14: Cambios individuales de la Potencia HF (ms^2) de los IBI entre las condiciones Sin Estrés (SN) y Con Estrés (SE).

4.4. Síntesis de hallazgos cruzados

Para sintetizar los hallazgos en los tres dominios evaluados (ansiedad, desempeño y señales fisiológicas), se presenta la Tabla 4.12. Esta tabla resume los principales resultados obtenidos y sus implicaciones, permitiendo una visualización clara de la consistencia entre los métodos utilizados.

Tabla 4.12: Resumen cruzado de hallazgos: ansiedad, desempeño y señales fisiológicas

Dominio	**Hallazgo principal**	**Implicación**
Ansiedad (IDA-RE)	Incremento leve en ansiedad estado en grupo con ansiedad rasgo media ($\Delta AE = +3.625$, $p = 0.109$)	Posible mayor susceptibilidad emocional a estresores virtuales en sujetos con ansiedad basal intermedia.
Desempeño conductual – Objetos	Descenso promedio en ObTo bajo estrés; $p = 0.1124$	Tendencia a menor rendimiento bajo presión, aunque sin significancia estadística; posible efecto moderado.
Desempeño conductual – Espacial	Incremento en DiTo (+98,365) y PoTo (+15.6 %) en SE; sin significancia estadística	Indicios preliminares de mayor exploración espacial bajo estrés, con eficiencia reducida en recolección de objetos.
Coincidencia Est-Per–DiTo	8 de 12 participantes (66.7 %) presentaron estrés↑ y distancia↑	Evidencia preliminar de convergencia entre percepción subjetiva de estrés y desempeño motor.
Correlación AE–Desempeño	Correlación positiva moderada entre ΔAE y métricas espaciales ($\rho = 0.39$, $p = 0.21$)	Mayor ansiedad asociada a trayectorias más extensas; tendencia exploratoria no significativa.
PPG – Métricas grupales	Solo RMSSD presentó diferencia significativa ($p = 0.0203$)	Indica respuesta autonómica parasimpática ante estrés; métrica útil para monitoreo.
PPG – Variabilidad individual	5 sujetos clasificados como sensibles ($\geq$ 3 métricas con cambio >10 %)	Evidencia de heterogeneidad en respuestas fisiológicas al estrés; importancia de análisis individual.
PPG – Análisis espectral	Cambios en LF/HF en 11 de 12 sujetos; predominio de aumento en SE	Indicios de incremento en actividad simpática bajo entorno estresante.

4.5. Discusión

Los resultados del presente estudio permiten reflexionar sobre la interacción entre las respuestas fisiológicas y psicológicas ante estímulos estresantes generados mediante entornos de RV inmersiva. Esta sección discute los principales hallazgos en relación con los objetivos planteados, contrastándolos con la literatura previa.

4.5.1. Respuestas psicológicas: ansiedad estado y rasgo

El análisis del inventario IDARE reveló que, a nivel grupal, no se observó un incremento estadísticamente significativo en los niveles de ansiedad estado tras la exposición al entorno estresante ($p = 0.1124$). No obstante, al segmentar a los participantes por niveles de ansiedad rasgo (AR), se identificó una tendencia importante: los sujetos con AR media presentaron un aumento promedio de $+3.625$ puntos en ansiedad estado, cercano a la significancia estadística ($p = 0.109$, prueba de Wilcoxon). Este patrón sugiere una posible mayor susceptibilidad de este grupo a estresores contextuales, en comparación con los grupos de ansiedad baja y alta, donde no se observaron cambios relevantes.

Estos resultados coinciden con hallazgos previos que señalan que niveles moderados de ansiedad rasgo podrían estar asociados con una mayor reactividad emocional, ya que los sujetos con ansiedad alta podrían desarrollar mecanismos de afrontamiento o habituación más robustos (Julian, 2011). Esta observación podría tener implicaciones para el diseño de intervenciones personalizadas en contextos educativos o clínicos, donde la identificación de perfiles de vulnerabilidad al estrés puede ser clave.

4.5.2. Relación entre ansiedad y desempeño

En cuanto al desempeño durante la tarea experimental, se observó un descenso general en la segunda etapa, con una media de cambio negativa en todos los grupos de ansiedad rasgo. Aunque el análisis pareado no arrojó significancia estadística ($p = 0.1124$), la correlación de Spearman entre el cambio en ansiedad estado y el desempeño mostró una tendencia negativa moderada ($\rho = -0.54, p = 0.069$). Esto sugiere que, al menos en algunos participantes, el incremento en ansiedad estado podría estar relacionado con una

disminución en el rendimiento.

Esta relación se visualizó con mayor claridad en los gráficos de dispersión y boxplots, donde el grupo con ansiedad media mostró la mayor dispersión y decremento en desempeño. Tales resultados están alineados con teorías cognitivas del estrés, que proponen que la activación emocional excesiva puede interferir con la atención y la memoria de trabajo necesarias para ejecutar tareas complejas.

4.5.3. Respuestas fisiológicas: análisis de señal PPG

A nivel grupal, solo la métrica RMSSD —índice de variabilidad relacionado con la actividad parasimpática— mostró diferencias estadísticamente significativas entre condiciones (SN vs. SE), indicando una disminución bajo estrés. Este resultado es consistente con estudios previos que han señalado al RMSSD como un marcador sensible para detectar activación simpática y reducción del tono vagal en contextos de estrés (H. Kim, Kim et al., 2018; Shaffer & Ginsberg, 2017).

No obstante, el análisis individual reveló que 5 de los 12 participantes presentaron cambios superiores al 10 % en al menos tres métricas temporales, y 11 de los 12 mostraron alteraciones relevantes en la razón LF/HF. Estas alteraciones se asocian con un incremento del tono simpático, lo que indica una transición fisiológica de un estado de reposo a uno de alerta. Este hallazgo sugiere que, aun cuando, a nivel consciente, algunos participantes no reportaron cambios significativos, existió una respuesta fisiológica objetiva ante el estímulo. Esta heterogeneidad refuerza la necesidad de integrar análisis intrasujeto, especialmente en estudios con muestras reducidas, y constituye evidencia de la efectividad del entorno virtual para inducir estados de estrés a nivel autonómico.

4.5.4. Relación entre estrés percibido y movilidad en entornos virtuales

Entre los hallazgos de este estudio, destaca que la mayoría de los participantes que reportaron un incremento en el estrés percibido (EstPer) también recorrieron mayores distancias dentro del entorno virtual. En concreto, 10 de los 12 participantes mostraron un aumento en estrés, y de estos, 8 coincidieron con un incremento en la distancia total

recorrida (DiTo). A nivel grupal, la mediana de DiTo aumentó en aproximadamente 98,365 unidades, mientras que el porcentaje de laberinto explorado (PoTo) se incrementó en 15.6 %. En contraste, el número de objetos recolectados (ObTo) tendió a disminuir, lo que sugiere que el mayor desplazamiento se produjo con menor eficiencia en el logro de la tarea.

Este patrón puede explicarse desde distintas perspectivas teóricas. En primer lugar, la hipervigilancia generada por el estrés tiende a incrementar la movilidad como parte de la respuesta de lucha–huida, favoreciendo trayectorias más largas y una exploración espacial más amplia, aunque no necesariamente más eficiente. En segundo lugar, de acuerdo con la *Attentional Control Theory* (Eysenck et al., 2007), el estrés compromete la eficiencia del control atencional, lo que se traduce en movimientos menos optimizados. Esto coincide con el aumento en DiTo y PoTo acompañado de una reducción en ObTo. Finalmente, el incremento en la activación simpática —respaldado en este estudio por cambios en métricas de variabilidad cardíaca como RMSSD y LF/HF— puede favorecer movimientos más erráticos y amplios, tal como han documentado (Kassner et al., 2014; Parsons & Rizzo, 2008).

La literatura en RV converge con estos resultados. Por ejemplo, (Tarrant et al., 2018) y (Kahlon et al., 2023) reportaron que los participantes bajo presión cognitiva recorren trayectorias más largas y dedican más tiempo a la tarea, pero su desempeño en términos de objetivos cumplidos no mejora proporcionalmente. De manera similar, los resultados aquí presentados sugieren que un mayor estrés percibido se asoció con un incremento en la exploración espacial, pero con un costo en eficiencia.

Este hallazgo refuerza la noción de que el estrés percibido no solo tiene manifestaciones subjetivas, sino también consecuencias observables en el comportamiento motor en entornos virtuales. En la práctica, esto abre la posibilidad de utilizar métricas de movilidad (DiTo, PoTo) como indicadores conductuales adicionales del estado emocional, complementando las medidas psicológicas (IDARE) y fisiológicas (PPG).

4.5.5. Implicaciones y consideraciones metodológicas

Los hallazgos sugieren que los entornos de RV inmersiva pueden generar respuestas fisiológicas y psicológicas diferenciadas según el perfil basal de ansiedad de los individuos. Aunque los efectos no fueron estadísticamente robustos a nivel grupal, se identificaron tendencias consistentes que justifican estudios futuros con muestras mayores.

El uso de métricas combinadas (psicológicas y fisiológicas) permitió obtener una visión más completa del fenómeno del estrés. Sin embargo, deben considerarse ciertas limitaciones: el tamaño muestral, la posible habituación al entorno. Además, aunque la mayoría de los participantes mostró la coincidencia estrés↑ distancia↑, se observaron patrones divergentes en algunos casos, lo cual refuerza la importancia de considerar la heterogeneidad individual. Finalmente, el aumento en la distancia recorrida (DiTo) y en PoTo no se tradujo en una mayor recolección de objetos (ObTo), lo que resalta la necesidad de interpretar estas métricas desde la perspectiva de eficiencia y no solo de cantidad.

Aun así, los resultados demuestran la viabilidad de integrar la RV, cuestionarios validados y el análisis de señales fisiológicas en protocolos experimentales de evaluación emocional.

4.5.6. Perspectivas futuras

Se recomienda ampliar el presente estudio incorporando muestras más diversas y grandes, controles fisiológicos previos a la sesión, y medidas complementarias como actividad electrodermal o electromiografía facial. Asimismo, podría explorarse el uso de técnicas de aprendizaje automático para identificar patrones de respuesta multivariada que permitan predecir la vulnerabilidad al estrés en tiempo real, abriendo la puerta a intervenciones adaptativas en salud mental y educación.

Capítulo 5
Conclusiones

El presente estudio analizó la inducción de estrés fisiológico mediante entornos de RV y su relación con respuestas psicológicas, fisiológicas y conductuales registradas durante tareas inmersivas. A partir de la implementación del sistema experimental y del análisis de los datos obtenidos, se derivan las siguientes conclusiones principales:

- Se logró diseñar e implementar un entorno virtual inmersivo capaz de inducir respuestas emocionales y fisiológicas medibles en los participantes, lo que demuestra el potencial de la realidad virtual como herramienta experimental para el estudio del estrés en condiciones controladas.

- Los resultados psicológicos obtenidos mediante el inventario IDARE mostraron que, aunque no se observaron diferencias significativas a nivel global en la ansiedad estado tras la exposición al escenario estresante, se identificó una tendencia al incremento en participantes con ansiedad rasgo media. Este hallazgo sugiere que el perfil emocional previo del individuo puede influir en la susceptibilidad a estímulos estresantes dentro de entornos virtuales.

- En el análisis conductual, el desempeño en la tarea de recolección de objetos mostró una disminución general en el escenario con estresores. Aunque la diferencia no alcanzó significancia estadística a nivel grupal, la tendencia observada es consistente con la literatura que señala que el estrés puede afectar procesos cognitivos como la atención y la toma de decisiones.

- Se observó una correlación negativa moderada entre el incremento de ansiedad estado y el desempeño en la tarea experimental ($\rho = -0.54, p = 0.069$), lo cual sugiere que mayores niveles de estrés emocional pueden asociarse con una reducción en el rendimiento durante tareas cognitivas dentro de entornos inmersivos.

- Desde el punto de vista fisiológico, el análisis de las señales PPG mostró que la métrica RMSSD fue la única variable que presentó diferencias significativas entre

los escenarios evaluados. Este resultado respalda su utilidad como indicador sensible de cambios en la modulación autonómica asociados a la exposición a estímulos estresantes.

- A nivel individual, la mayoría de los participantes presentó cambios relevantes en las métricas de variabilidad del pulso cardíaco (PRV), lo cual evidencia respuestas autonómicas heterogéneas ante el estrés inducido. Este comportamiento refuerza la importancia de considerar la variabilidad intersujeto en estudios psicofisiológicos.

- La integración de información psicológica (IDARE), fisiológica (PPG) y conductual (desempeño) permitió observar una convergencia parcial entre los distintos dominios de medición. Este enfoque multimodal representa una estrategia para el estudio del estrés en entornos experimentales controlados.

En relación con los objetivos planteados al inicio del estudio, se concluye que estos fueron cumplidos satisfactoriamente. Se logró desarrollar un sistema experimental basado en RV capaz de inducir respuestas de estrés y registrar simultáneamente indicadores psicológicos, fisiológicos y conductuales.

Asimismo, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis de trabajo, al evidenciar que la exposición a escenarios de RV diseñados con estresores visuales y auditivos puede generar modificaciones en indicadores psicofisiológicos asociados al estrés. Sin embargo, también se observó que la magnitud de estas respuestas varía entre individuos, lo cual sugiere que factores personales como el nivel basal de ansiedad o la experiencia previa con entornos virtuales pueden influir en la respuesta al estrés inducido.

5.1. Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de investigación que podrían ampliar y fortalecer los hallazgos de este estudio.

En primer lugar, se recomienda replicar el experimento con muestras de mayor tamaño y diversidad demográfica, lo que permitiría mejorar la generalización de los resultados y evaluar con mayor precisión la influencia de variables individuales como edad, género o perfil psicológico.

Asimismo, futuros estudios podrían incorporar medidas fisiológicas complementarias, como actividad electrodermal, electromiografía facial o electroencefalografía, con el fin de obtener una caracterización más completa de la respuesta psicofisiológica al estrés.

Otra línea prometedora consiste en integrar técnicas de aprendizaje automático para analizar de forma conjunta las señales fisiológicas, los indicadores conductuales y las respuestas psicológicas. Esto permitiría identificar patrones complejos de respuesta al estrés y desarrollar modelos capaces de predecir estados emocionales en tiempo real.

Finalmente, el sistema desarrollado podría evolucionar hacia entornos adaptativos en los que la intensidad de los estresores se ajuste dinámicamente en función de la respuesta fisiológica del usuario. Este enfoque abriría posibilidades para aplicaciones en entrenamiento cognitivo, educación y rehabilitación psicológica basadas en realidad virtual.

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, a Dios por haberme permitido llegar hasta este momento, guiándome a través de las personas que puso en mi camino y que fueron clave para alcanzar un objetivo más en mi vida.

A mi director de tesis, el Dr. Jorge Rodríguez Arce, por su guía, tiempo y dedicación durante el desarrollo de este proyecto, así como por brindarme la oportunidad de aprender y crecer académicamente bajo su dirección.

Al Dr. Giorgio Mackenzie Cruz Martínez y a la Dra. Adriana Herlinda Vilchis González, por su asesoría y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto.

A Ángel, mi padre, por estar presente cuando estuve a punto de rendirme durante la maestría, brindándome el apoyo emocional necesario para seguir adelante.

Al maestro Jiménez, quien sembró en mí la semilla de la investigación.

A Getsemaní y Julieta, por su paciencia y apoyo incondicional, y por celebrar conmigo cada logro alcanzado a lo largo de este camino.

A mis compañeros, por acompañarme y apoyarme durante las pruebas y mejoras del proyecto.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado mediante la beca de posgrado que permitió la realización de mis estudios de maestría y el desarrollo de la presente investigación.

A todos ustedes, gracias.

Capítulo 6
Referencias

Acharya, U. R., et al. (2006). Heart rate variability: a review. *Medical and Biological Engineering and Computing*, *44*(12), 1031-1051.

Acuña, L., García, D. A. G., & Bruner, C. A. (2012). La escala de reajuste social de Holmes y Rahe en México: Una revisión después de 16 años. *Revista mexicana de psicología*, *29*(1), 16-32.

Allen, J. (2007). Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, *28*(3), R1-R39.

Angelidis, A., Solis, E., Lautenbach, F., van der Does, W., & Putman, P. (2019). "I'm going to fail!" Acute cognitive performance anxiety increases threat-interference and impairs working memory performance. *PLoS ONE*, *14*(2), e0210824. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210824

Arborelius, L., Owens, M., Plotsky, P., & Nemeroff, C. B. (1999). The role of corticotropin-releasing factor in depression and anxiety disorders. *The Journal of endocrinology*, *160*(1), 1-12.

Arnsten, A. F. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nature reviews neuroscience*, *10*(6), 410-422.

Bevilacqua, F., Engström, H., & Backlund, P. (2019). Game-calibrated and user-tailored remote detection of stress and boredom in games. *Sensors*, *19*(13), 2877.

Billman, G. E. (2011). Heart rate variability–a historical perspective. *Frontiers in physiology*, *2*, 86.

Bishop, S. J. (2009). Trait anxiety and impoverished prefrontal control of attention. *Nature Neuroscience*, *12*(1), 92-98. https://doi.org/10.1038/nn.2242

Bishop, S. J., Duncan, J., Brett, M., & Lawrence, A. D. (2004). Prefrontal cortical function and anxiety: Controlling attention to threat-related stimuli. *Nature Neuroscience*, *7*(2), 184-188. https://doi.org/10.1038/nn1173

Bohil, C. J., Alicea, B., & Biocca, F. A. (2011). Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nature reviews neuroscience*, *12*(12), 752-762.

Botella, C., García-Palacios, A., Quero, S., Baños, R. M., & Bretón-López, J. M. (2006). Realidad virtual y tratamientos psicológicos: una revisión. *Psicología Conductual*, *3*(1), 491-510.

Bridge, D. (1999). Increasing the reliability of stress measurement tools. *Journal of Occupational Health Psychology*, *4*(3), 327-336.

Camm, A. J., Malik, M., Bigger, J. T., Breithardt, G., Cerutti, S., Cohen, R. J., Coumel, P., Fallen, E. L., Kennedy, H. L., Kleiger, R. E., et al. (1996). Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*, *93*(5), 1043-1065.

Castaldo, R., et al. (2019). Ultra-short term HRV analysis: Reliability and applicability in stress research. *PLOS One*, *14*(1), e0209804.

Castañeda, D., Esparza, A., Ghamari, M., Soltanpur, C., & Nazeran, H. (2018). A review on wearable photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, *4*(4), 195-202.

Cebada-Fuentes, R., Valladares-Pérez, J., García-García, J. A., & Sánchez-Pérez, C. (2023). Optimized Performance Pulse Oximeter Based on the MAX30102 Commercial Sensor. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49410-9_35

Cha, K. (2023). The influence of classroom size and window view on young children's executive functions and physiological responses, based on VR technology. *Behavioral Sciences*, *13*(11), 936.

Chang, E., Kim, H.-J., & Yoo, B.-K. (2020). Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements. *International Journal of Human–Computer Interaction*, *36*(17), 1658-1682. https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351

Charlot, K., et al. (2009). Interchangeability of HRV and PRV in stress. *Journal of Clinical Monitoring*, *23*(5), 263-270.

Charlton, P. H., et al. (2016). Assessment of algorithms to estimate respiratory rate from the photoplethysmogram. *Computing in Cardiology*, *43*, 369-372.

Chauhan, U., Reithinger, N., & Mackey, J. R. (2018). Real-time stress assessment through PPG sensor for VR biofeedback. *Proceedings of the 20th international conference on multimodal interaction: adjunct*, 1-5.

Chen, D., Yin, J., Yu, C.-P., Sun, S., Gabel, C., & Spengler, J. D. (2024). Physiological and psychological responses to transitions between urban built and natural environments using the cave automated virtual environment. *Landscape and Urban Planning*, *241*, 104919.

Delaney, J., & Brodie, D. (2000). Effects of short-term psychological stress on the time and frequency domains of heart-rate variability. *Perceptual and motor skills*, *91*(2), 515-524.

Diemer, J., Alpers, G. W., Peperkorn, H. M., Shiban, Y., & Mühlberger, A. (2014). The impact of perception and presence on emotional reactions: A review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, *5*, 26. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00026

Diemer, J., Alpers, G. W., Peperkorn, H. M., Shiban, Y., & Mühlberger, A. (2015). The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality. *Frontiers in psychology*, *6*, 111605.

Domínguez, S., Villegas, G., Sotelo, N., & Sotelo, L. (2012). Revisión psicométrica del Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo (IDARE) en una muestra de universitarios de Lima Metropolitana. *Revista Peruana de Psicología y Trabajo Social*, *1*(1), 35-45.

Dorsey, A., Scherer, E., Eckhoff, R., & Furberg, R. (2022). Measurement of human stress: a multidimensional approach.

Elgendi, M. (2012). On the analysis of fingertip photoplethysmogram signals. *Current Cardiology Reviews*, *8*(1), 14-25.

Elliot, A. J., & Maier, M. A. (2014). Color Psychology: Effects of Perceiving Color on Psychological Functioning in Humans. *Annual Review of Psychology*, *65*, 95-120. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115035

Ernst, G. (2017). Hidden signals—the history and methods of heart rate variability. *Frontiers in public health*, *5*, 265.

Ernst, H., Scherpf, M., Pannasch, S., Helmert, J. R., Malberg, H., & Schmidt, M. (2023). Assessment of the human response to acute mental stress–An overview and a multimodal study. *PLoS One*, *18*(11), e0294069.

Escobar Valencia, D., & Vivas Albán, O. A. (2018). Sistemas hápticos: Una revisión. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, *10*(1).

Eysenck, M. W., Derakshan, N., Santos, R., & Calvo, M. G. (2007). Anxiety and cognitive performance: attentional control theory. *Emotion*, *7*(2), 336.

Fernández-Cisnal, A., Silla, B., Ramón, J. M., Valero, E., García-Blas, S., Núñez, J., Bodí, V., Sanchis, J., & Miñana, G. (2023). Eficacia de la realidad virtual en la reducción de la ansiedad en la revascularización de las OTC: diseño del ensayo ReViCTO. *REC: Interventional Cardiology*, *5*(3), 203-209.

Finseth, T. T., Barnett, N., Shirtcliff, E., Dorneich, M., & Keren, N. (2018). Stress Inducing Demands in Virtual Environments. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *62*, 2066-2070. https://doi.org/10.1177/1541931218621466

Freeman, D., Reeve, S., Robinson, A., Ehlers, A., Clark, D., Spanlang, B., & Slater, M. (2017). Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological Medicine*, *47*(14), 2393-2400. https://doi.org/10.1017/S003329171700040X

Gamito, P., Oliveira, J., Silva, J., Rosa, J., Mendes, M. L. R., Dias, R., Dias, F., Mansuklal, S., Cartaxo, J., António, H., & Salvador, Á. (2024). Stress Inoculation in Police Officers Using Virtual Reality: A Controlled Study. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*. https://doi.org/10.1089/cyber.2023.0385

Gil, E., et al. (2010). Photoplethysmography as a noninvasive tool to assess stress. *Physiological Measurement*, *31*(12), 1545-1559.

Guardiola Vila, S. (2016). *Análisis de señales biomédicas para la detección del nivel de estrés/relajación de conductores* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].

Guerrero-Guerrero, L. M., Beatriz-Flores, V., & Ramos-Neyra, Y. N. (2023). La fobia específica bajo la terapia breve estratégica. *Revista Científica Retos de la Ciencia*, *7*(16), 100-112.

Gunnar, M. R., Reid, B. M., Donzella, B., Miller, Z. R., Gardow, S., Tsakonas, N. C., Thomas, K. M., DeJoseph, M., & Bendezú, J. J. (2021). Validation of an online version of the Trier Social Stress Test in a study of adolescents. *Psychoneuroendocrinology*, *125*, 105111.

Halbig, A., & Latoschik, M. E. (2021). A systematic review of physiological measurements, factors, methods, and applications in virtual reality. *Frontiers in virtual reality*, *2*, 694567.

Hanshans, C., Amler, T., Zauner, J., & Bröll, L. (2024). Inducing and measuring acute stress in virtual reality: Evaluation of canonical physiological stress markers and measuring methods. *Journal of Environmental Psychology*, *94*, 102107.

Harris, K. M., Gaffey, A. E., Schwartz, J. E., Krantz, D. S., & Burg, M. M. (2023). The Perceived Stress Scale as a measure of stress: decomposing score variance in longitudinal behavioral medicine studies. *Annals of Behavioral Medicine*, *57*(10), 846-854.

Hipertextual, R. (2016). *Realidad virtual: ¿un peligro para la miopía, hipermetropía y astigmatismo?* Consultado el 2 de junio de 2024, desde https://hipertextual.com/2016/03/realidad-virtual-miopia-hipermetropia-astigmatismo

Huarcaya-Victoria, J., De-Lama-Morán, R., Quiros, M., Bazán, J., López, K., & Lora, D. (2020). Propiedades psicométricas del Patient Health Questionnaire (PHQ-9) en estudiantes de medicina en Lima, Perú. *Revista de Neuro-Psiquiatría*, *83*(2), 72-78.

Hyde, J., Smith, J., & Brown, M. (2019). Psychophysiological responses to stress. *Journal of Psychophysiology*, *33*(4), 123-130.

Iqbal, S. M. Z. (2024). Modern Challenges in Stress Assessment. *International Journal of Psychology*, *18*(1), 45-52.

Ishaque, S., Khan, N., & Krishnan, S. (2023). Physiological signal analysis and stress classification from VR simulations using decision tree methods. *Bioengineering*, *10*(7), 766.

Jiang, G. (2015). Limitations of Stress Measurement Techniques. *Biomedical Research*, *26*(4), 202-210.

Jin, S., Tan, Z., Liu, T., Chan, S. N., Sheng, J., Wong, T.-h., Huang, J., Zhang, C. J. P., Ming, W.-K., et al. (2023). Preference of Virtual Reality Games in Psychological Pressure and Depression Treatment: Discrete Choice Experiment. *JMIR Serious Games*, *11*(1), e34586. https://doi.org/10.2196/34586

Julian, L. J. (2011). Measures of anxiety. *Arthritis care & research*, *63*(0 11), 10-1002.

Kahlon, S., Lindner, P., & Nordgreen, T. (2023). Gamified virtual reality exposure therapy for adolescents with public speaking anxiety: a four-armed randomized controlled trial. *Frontiers in Virtual Reality*, *4*, 1240778.

Kassner, M., Patera, W., & Bulling, A. (2014). Pupil: an open source platform for pervasive eye tracking and mobile gaze-based interaction. *Proceedings of the 2014 ACM international joint conference on pervasive and ubiquitous computing: Adjunct publication*, 1151-1160.

Kaya, N., & Epps, H. H. (2004). Relationship between color and emotion: A study of college students. *College Student Journal*, *38*(3), 396-405.

Kim, H., Kim, D. J., et al. (2018). Stress reduction and physiological changes in virtual reality: A randomized crossover trial. *Frontiers in Psychiatry*, *9*, 642.

Kim, H., Kim, S. J., Lee, S., Lee, H., Kang, E., & Kim, H.-C. (2021). Effectiveness of immersive virtual reality-based stress management program: A randomized controlled trial. *Journal of Affective Disorders*, *295*, 245-253. https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.08.095

Kim, H., Kim, D. J., Kim, S., Chung, W. H., Park, K.-A., Kim, J. D., Kim, D., Kim, M. J., Kim, K., & Jeon, H. J. (2021). Effect of virtual reality on stress reduction and change of physiological parameters including heart rate variability in people with high stress: an open randomized crossover trial. *Frontiers in psychiatry*, *12*, 614539.

Knight, R. G., Waal-Manning, H. J., & Spears, G. F. (1983). Some norms and reliability data for the State-Trait Anxiety Inventory and the Zung Self-Rating Depression scale. *British Journal of Clinical Psychology*, *22*(4), 245-249.

Li, L., Chen, C., Pan, L., Zhang, J., & Xiang, Y. (2022). SoK: An Overview of PPG's Application in Authentication. *arXiv.org*, *abs/2201.11291*.

Liu, Q., & Zhang, W. (2020). Sex differences in stress reactivity to the trier social stress test in virtual reality. *Psychology Research and Behavior Management*, 859-869.

Lorenzo Ruiz, A., Grau Abalo, J., Fumero Madam, A., Martín Carbonell, M., & Prado Torres, F. C. (2003). Validación del Inventario de Ansiedad Rasgo-Estado (IDA-REN) en adolescentes cubanos. *Revista del Hospital Psiquiátrico de la Habana / Psicología y Salud*.

Lu, G., Yang, F., Taylor, J. A., & Stein, J. F. (2009). Comparison of heart rate variability from PPG and ECG signals. *Journal of Medical Engineering & Technology*, *33*(8), 634-641.

Mackintosh, M., Horan, W. P., & Green, M. F. (2022). Intra-individual variability as a marker of cognitive control inefficiency in high trait anxiety. *Frontiers in Psychology*, *13*, 945768. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.945768

Maidana, P., Bruno, O. D., & Mesch, V. (2013). Medición de cortisol y sus fracciones: Una puesta al día. *Medicina (Buenos Aires)*, *73*(6), 579-584.

Maples-Keller, J. L., Bunnell, B. E., Kim, S.-J., & Rothbaum, B. O. (2017). The use of virtual reality technology in the treatment of anxiety and other psychiatric disorders. *Harvard review of psychiatry*, *25*(3), 103-113.

Martens, M. A., Antley, A., Freeman, D., Slater, M., Harrison, P. J., & Tunbridge, E. M. (2019). It feels real: physiological responses to a stressful virtual reality environment and its impact on working memory. *Journal of Psychopharmacology*, *33*(10), 1264-1273.

Mateos-García, N., Gil-González, A.-B., Luis-Reboredo, A., & Pérez-Lancho, B. (2023). Driver Stress Detection from Physiological Signals by Virtual Reality Simulator. *Electronics*, *12*(10), 2179.

Mejía, A., et al. (2022). Spectral analysis of PRV in stress detection. *Sensors*, *22*(6), 2601.

Mendoza, G. A. A., Lewis, F., Plante, P., & Brassard, C. (2023). Estado del arte sobre el uso de la realidad virtual, la realidad augmentada y el video 360 en educación superior. *EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, (84), 35-51.

Meshkat, S., Edalatkhah, M., Luciano, C. D., Martin, J., Kaur, G., Lee, G. H., Park, H., Torres, A., Mazalek, A., Kapralos, B., Dubrowski, A., & Bhat, V. (2024).

Virtual Reality and Stress Management: A Systematic Review. *Cureus*. https://doi.org/10.7759/cureus.64573

Michela, A., van Peer, J. M., Brammer, J. C., Nies, A., van Rooij, M. M., Oostenveld, R., Dorrestijn, W., Smit, A. S., Roelofs, K., Klumpers, F., et al. (2022). Deep-breathing biofeedback trainability in a virtual-reality action game: A single-case design study with police trainers. *Frontiers in Psychology*, *13*, 806163.

Mishra, V., Sen, S., Chen, G., Hao, T., Rogers, J., Chen, C.-H., & Kotz, D. (2020). Evaluating the reproducibility of physiological stress detection models. *Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies*, *4*(4), 1-29.

Morera, L. P., Tempesti, T. C., Pérez, E., & Medrano, L. A. (2019). Biomarcadores en la medición del estrés: Una revisión sistemática. *Ansiedad y estrés*, *25*(1), 49-58.

Muthmainnah, M., Tabriawan, D. B., & Tazi, I. (2022). Karakterisasi Sensor MAX30102 Sebagai Alat Ukur Detak Jantung dan Suhu Tubuh Berbasis Photoplethysmograph. *Jurnal Pendidikan MIPA*, *12*(3), 726-731. https://doi.org/10.37630/jpm.v12i3.655

Noriega, J. Á. V. (2004). Aplicación de realidad virtual multisensorial en el manejo del estrés antes de exámenes académicos. En *La Psicología Social en México. Vol. X*. Asociación Mexicana de Psicología Social.

Nuzzo, R. (2014). Scientific method: Statistical errors. *Nature*, *506*, 150-152.

Orlandini, A. (2012). *El estrés: qué es y cómo evitarlo*. Fondo de cultura económica.

Park, J., Seok, H. S., Kim, S.-S., & Shin, H. (2022). Photoplethysmogram analysis and applications: an integrative review. *Frontiers in Physiology*, *12*, 808451.

Parsons, T. D., & Rizzo, A. A. (2008). Affective outcomes of virtual reality exposure therapy for anxiety and specific phobias: A meta-analysis. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, *39*(3), 250-261.

Rahman, M. A., Brown, D. J., Mahmud, M., Harris, M., Shopland, N., Heym, N., Sumich, A., Turabee, Z. B., Standen, B., Downes, D., et al. (2023). Enhancing biofeedback-driven self-guided virtual reality exposure therapy through arousal detection from multimodal data using machine learning. *Brain Informatics*, *10*(1), 1-18.

Rauch, S., & Foa, E. (2006). Emotional processing theory (EPT) and exposure therapy for PTSD. *Journal of Contemporary Psychotherapy*, *36*, 61-65.

Riva, G., & Serino, S. (2020). Virtual reality in the assessment, understanding and treatment of mental health disorders.

Rodríguez-Arce, J., Lara-Flores, L., Portillo-Rodríguez, O., & Martínez-Méndez, R. (2020). Towards an anxiety and stress recognition system for academic environments based on physiological features. *Computer methods and programs in biomedicine*, *190*, 105408.

Roehl, B. (1996). *Special Edition Using VRML*. McMillan Computer Publishers.

Rojas, A. N., & Mosquera, F. C. (2024). Advances and Challenges Associated with Low-Cost Pulse Oximeters in Home Care Programs: A Review. *Sensors*, *24*(19), 6284.

Rudaizky, D., Page, A. C., & MacLeod, C. (2012). Anxiety reactivity and anxiety perseveration represent dissociable dimensions of trait anxiety. *Emotion*, *12*(5), 903-907.

Schäfer, A., et al. (2013). Accurate estimation of heart rate variability using PPG. *Biomedical Engineering*, *58*(1), 31-39.

Schwabe, L., Höffken, O., Tegenthoff, M., & Wolf, O. T. (2013). Stress-induced enhancement of response inhibition depends on mineralocorticoid receptor activation. *Psychoneuroendocrinology*, *38*(10), 2319-2326.

Schwabe, L., & Schächinger, H. (2018). Ten years of research with the Socially Evaluated Cold Pressor Test: Data from the past and guidelines for the future. *Psychoneuroendocrinology*, *92*, 155-161.

Segura, A., & Marrugat, J. (2009). Epidemiología cardiovascular. *López Farré A & Macaya C, compiladores. Libro de la salud cardiovascular del Hospital Clínico San Carlos y de la fundación BBVA. Bilbao, España: Editorial: Nerea*, 101-10.

Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in public health*, *5*, 258.

Shannon, C. E. (2006). Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IEEE*, *86*(2), 447-457.

Shirtcliff, E. A., Finseth, T. T., Winer, E. H., Glahn, D. C., Conrady, R. A., & Drury, S. S. (2024). Virtual stressors with real impact: what virtual reality-based biobehavioral

research can teach us about typical and atypical stress responsivity. *Translational Psychiatry*, *14*(1), 441.

Skapinakis, P. (2024). Spielberger state-trait anxiety inventory. En *Encyclopedia of quality of life and well-being research* (pp. 6776-6779). Springer.

Slater, M., Pertaub, D.-P., & Steed, A. (1999). Public speaking in virtual reality: Facing an audience of avatars. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *19*(2), 6-9.

Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*, *3*, 74.

Smeets, T., Cornelisse, S., Quaedflieg, C. W., Meyer, T., Jelicic, M., & Merckelbach, H. (2012). Introducing the Maastricht Acute Stress Test (MAST): a quick and non-invasive approach to elicit robust autonomic and glucocorticoid stress responses. *Psychoneuroendocrinology*, *37*(12), 1998-2008.

Soriano Terrazas, J., et al. (2018). Metodologia para caracterizar e inducir estados cognitivos y emocionales mediante realidad virtual inmersiva.

Staab, J. P., & Ruckenstein, M. J. (2007). Autonomic nervous system function in chronic dizziness. *Otology & Neurotology*, *28*(6), 854-859.

Stetz, M., Long, C. P., Wiederhold, B., & Turner, D. D. (2008). Combat scenarios and relaxation training to harden medics against stress. *Journal of Cyber Therapy and Rehabilitation*, *1*, 239-246.

Stetz, M., Long, C., Wiederhold, B., & Turner, D. (2008). Combat scenarios and relaxation training to harden medics against stress. *Journal of Cyber Therapy and Rehabilitation*, *1*, 239-246.

Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., & Yoshida, M. (2014). Wearable photoplethysmographic sensors—past and present. *Electronics*, *3*(2), 282-302.

Tarrant, J., Viczko, J., & Cope, H. (2018). Virtual reality for anxiety reduction demonstrated by quantitative EEG: a pilot study. *Frontiers in psychology*, *9*, 368656.

Thayer, J. F., et al. (2009). Heart rate variability and neurovisceral integration. *Biological Psychology*, *74*(2), 243-262.

Thoen, A., Steyaert, J., Alaerts, K., Evers, K., & Van Damme, T. (2023). A systematic review of self-reported stress questionnaires in people on the autism spectrum. *Review journal of autism and developmental disorders*, *10*(2), 295-318.

Uguz, D. U., Venema, B., Leonhardt, S., & Teichmann, D. (2018). Multifunctional Photoplethysmography Sensor Design for Respiratory and Cardiovascular Diagnosis. En *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018* (pp. 905-909). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9038-7_167

Vananth, P. N. S., Rajalakshmi, S., & Sathya, P. (2023). Design and Demonstration of Arduino based Low Cost Pulse Oximeter. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i9s.7437

Vananth, P., Rajalakshmi, S., & Sathya, P. (2023). Design and Demonstration of a Low-Cost Arduino-Based Pulse Oximeter. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, *11*(9s), 416-423. https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i9s.7437

Villanueva Cañas, J. (2021). Estudio sobre métodos para la medida no intrusiva de la presión arterial.

Weckesser, L. J., Dietz, F., Schmidt, K., Grass, J., Kirschbaum, C., & Miller, R. (2019). The psychometric properties and temporal dynamics of subjective stress, retrospectively assessed by different informants and questionnaires, and hair cortisol concentrations. *Scientific reports*, *9*(1), 1098.

Weiss, S., Kimmel, S., Withoft, A., Jung, F., Boll, S., & Heuten, W. (2022). Elevating Stress Levels - Exploring Multimodality for Stress Induction in VR. https://doi.org/10.1145/3543758.3549982

Wilcox, R. R. (2011). *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing* (2nd). Academic Press.

Womble, M., Jennings, S., Schatz, P., & Elbin, R. (2021). A-173 clinical cutoffs on the state–trait anxiety inventory for concussion. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *36*(6), 1228-1228.

World Health Organization. (2020). *Doing What Matters in Times of Stress: An Illustrated Guide*. Geneva.

Yang, H., Han, J., & Min, K. (2019). Distinguishing emotional responses to photographs and artwork using a deep learning-based approach. *Sensors*, *19*(24), 5533.

Yildirim, C. (2020). Don't make me sick: investigating the incidence of cybersickness in commercial virtual reality headsets. *Virtual Reality*, *24*(2), 231-239.

Yin, J., Zhu, S., MacNaughton, P., Allen, J. G., & Spengler, J. D. (2018). Physiological and cognitive performance of exposure to biophilic indoor environment. *Building and Environment*, *132*, 255-262.

You, J., Wen, X., Liu, L., Yin, J., & Ji, J. S. (2023). Biophilic classroom environments on stress and cognitive performance: A randomized crossover study in virtual reality (VR). *Plos one*, *18*(11), e0291355.

Zafar, M. S. (2021). The Impact of Chronic Stress on Health. *Journal of Health Sciences*, *12*(3), 123-130.

Zsido, A. N., Teleki, S. A., Csokasi, K., Rozsa, S., & Bandi, S. A. (2020). Development of the short version of the spielberger state—trait anxiety inventory. *Psychiatry research*, *291*, 113223.

Apéndice A
Formato de registro de participantes



Universidad Autónoma del Estado de México

ID: _____ **Registro – Alumno**

Edad: ____ **Género:** ☐ Masculino ☐ Femenino ☐ Otro ☐ Prefiero no decir

Licenciatura: _____ **Semestre:** ☐ 1° ☐ 2° ☐ 3° ☐ 4° ☐ 5° ☐ 6° ☐ 7° ☐ 8° ☐ 9° ☐ 10°

Experiencia previa con RV: ☐ Sí ☐ No

(Se considera experiencia previa haber utilizado dispositivos de RV como gafas Oculus, HTC Vive, PlayStation VR u otros sistemas similares)

Consumo de sustancias psicoactivas (últimos 30 días): ☐ Ninguna ☐ Alcohol ☐ Tabaco ☐ Cafeína ☐ Otras ☐ Prefiero no decir

Calidad de sueño reciente:

☐ Muy buena (dormí profundamente sin interrupciones)

☐ Buena (dormí bien con pocas interrupciones)

☐ Regular (tuve dificultad para dormir o me desperté varias veces)

☐ Mala (casi no pude dormir o tuve sueño muy ligero)

☐ Muy mala (no pude dormir casi nada)

Apéndice B
Aprobación ética del estudio

Universidad Autónoma del Estado de México

FACULTAD DE MEDICINA
COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN
CEI/023/2025
Toluca, Estado de México, 30 de abril 2025
Asunto: Dictamen de Aprobación

DR. JORGE RODRÍGUEZ ARCE
INVESTIGADORA PRINCIPAL
P R E S E N T E

Por este medio, el Comité de Ética en Investigación (CEI) con número de registro **CONBIOETICA-15-CEI-002-20210531**, informa a usted que el protocolo:

INDUCCIÓN DE ESTRÉS FISIOLÓGICO MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL EN ENTORNOS CONTROLADOS

Fue sometido a revisión y **APROBADO** en sesión ordinaria, en MARZO 2025, obteniendo así el número de **Registro: 001.2025** en su Archivo.

Se extiende la presente para los fines que a la interesada convengan,

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2025, 195 Años de la Apertura del Instituto Literario en la Ciudad de Toluca"

Dr. Virgilio Eduardo Trujillo Condes
Presidente del CEI

Dra. Adriana C. Pliego Carrillo
Secretaria del CEI

COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN FACULTAD DE MEDICINA

Ccp. Archivo

Jesús Carranza, esq. Paseo Tollocan s/n
Col. Moderna de la Cruz, C.P. 50180,
Toluca, Estado de México. Tel: 722 217 35 52
medicina.uaemex.mx

Apéndice C
Carta de consentimiento informado



Universidad Autónoma del Estado de México

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA PARTICIPACIÓN EN ESTUDIO DE INVESTIGACIÓN

A través de la presente, el Dr. Jorge Rodríguez Arce y el Ing. Miguel Ángel Hernández Marín, investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, te invitan a participar de forma voluntaria en el estudio titulado "Inducción de Estrés Fisiológico mediante Realidad Virtual en Entornos Controlados", desarrollado como parte de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, ubicada en Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria, C.P. 50100, Toluca, Estado de México.

¿Qué queremos lograr con este estudio?

Queremos entender cómo reacciona el cuerpo de las personas cuando realizan una tarea bajo condiciones estresantes en un entorno virtual seguro. Usaremos gafas de realidad virtual y un sensor pequeño en la mejilla (que no duele ni lastima) para medir cómo cambia tu ritmo cardíaco durante la actividad.

¿En qué consistirá tu participación?

Participarás en una sesión con tres partes diferentes:

- **Práctica:** Primero explorarás el laberinto virtual sin retos para acostumbrarte al equipo.

- **Relajación:** Realizarás la tarea de recolección en el laberinto bajo condiciones normales y tranquilas.
- **Reto:** Repetirás la misma tarea en el mismo laberinto, pero ahora con elementos visuales y sonoros diseñados para generarte un poco de estrés controlado.

Riesgos

Algunas personas podrían presentar:

- Leve molestia por usar las gafas de realidad virtual.
- Dolor de cabeza temporal.
- Mareo leve durante o después de la sesión.

Estos efectos son temporales y desaparecerán poco después de terminar la sesión. Tendrás supervisión constante y podrás detener la actividad en cualquier momento si lo deseas.

Beneficios

Por participar en este estudio recibirás:

- Información sobre tus signos vitales básicos (ritmo cardíaco).
- Evaluación de tus respuestas al estrés controlado.
- Experiencia con tecnología de realidad virtual.

Tu participación es voluntaria

- Puedes decidir no participar o retirarte en cualquier momento sin consecuencia alguna.
- Tus datos serán completamente confidenciales y anónimos.

- Los resultados solo se usarán para fines de investigación académica.

Si tienes cualquier duda ahora o durante el estudio, puedes preguntarnos libremente.

Declaración de Consentimiento

Después de haber leído toda la información proporcionada y tras haber resuelto cualquier duda, acepto de manera consciente y libre participar en el proyecto de investigación que se lleva a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Declaración	**SI**	**NO**
Se me explicó el objetivo, implicaciones y procedimientos que se llevarán a cabo, además han sido resueltas todas las preguntas y dudas de forma clara y precisa.	☐	☐
Estoy de acuerdo que se me realice la medición de la frecuencia cardiaca asociada al estrés.	☐	☐
Estoy de acuerdo que mis datos sean utilizados con fines de investigación, conservando la confidencialidad y el anonimato.	☐	☐

Universidad Autónoma del Estado de México

En caso de dudas o aclaraciones relacionadas con el estudio, podrá dirigirse a:

Investigador Responsable:

Dr. Jorge Rodríguez Arce, UAEMéx, Facultad de Ingeniería

Teléfono: (722) 214 08 55 ext. 1221

Correo electrónico: jrodrigueza@uaemex.mx

Colaborador:

Ing. Miguel Ángel Hernández Marín, UAEMéx, Facultad de Ingeniería

Teléfono: (722) 8779974

Correo electrónico: mhernandezm128@alumno.uaemex.mx

La decisión de participar o no en el estudio es: completamente voluntaria, gratuita e independiente de las actividades académicas en la Facultad de Ingeniería de la UAEMéx.

Nombre y firma de quien otorga el consentimiento	Nombre y firma de quien obtiene el consentimiento
Nombre y firma del primer testigo	Nombre y firma del segundo testigo

Apéndice D
Cuestionario de salud general

Instrucciones: Marque con una **X** la opción correspondiente o complete la respuesta cuando se indique.

1. ¿Padece alguna enfermedad crónica?

   [ ] Sí [ ] No

   En caso afirmativo, especifique: _____

2. ¿Ha sido diagnosticado con algún trastorno psiquiátrico?

   [ ] Sí [ ] No

3. ¿Tiene actualmente alguna afección en el sistema circulatorio o respiratorio?

   [ ] Sí [ ] No

4. ¿Está bajo algún tratamiento médico en este momento?

   [ ] Sí [ ] No

   En caso afirmativo, ¿cuál?: _____

5. ¿Ha experimentado previamente mareos, náuseas o dolores de cabeza al utilizar dispositivos de realidad virtual?

   [ ] Sí [ ] No

6. ¿Ha participado recientemente en algún otro estudio psicológico o fisiológico?

   [ ] Sí [ ] No

   En caso afirmativo, ¿cuándo?: _____

7. ¿Realiza actividad física de forma regular?

   [ ] Sí [ ] No

8. ¿Considera que su estado de salud actual es bueno?

   [ ] Sí [ ] No

   Si respondió "No", explique brevemente:

Firma del participante: _____ **Fecha:** _____

Apéndice E
Cuestionarios subjetivos tipo Likert

Cuestionarios

Instrucciones

1. Al finalizar la prueba de Realidad Virtual del **Escenario 1**, marque con una **X** la casilla que mejor describa su experiencia en cada sección del cuestionario.

2. Repita el mismo procedimiento para el **Escenario 2** después de completar su prueba correspondiente.

3. Asegúrese de responder todas las preguntas con honestidad, basándose en su experiencia inmediata.

Nota: Ambos cuestionarios son anónimos y sus respuestas ayudarán a evaluar la experiencia en RV.

Estrés Percibido

A continuación, se describen los niveles de estrés percibido:

- **No en lo absoluto:** no sentí estrés en absoluto durante la tarea.
- **Un poco:** sentí un poco de estrés, pero fue manejable.
- **Neutro:** sentí un nivel moderado de estrés, no fue ni demasiado bajo ni demasiado alto.
- **Bastante:** sentí bastante estrés que afectó mi desempeño.
- **Mucho:** sentí mucho estrés, me resultó muy difícil manejarlo.

Indica cuál fue el nivel de estrés percibido en el escenario 1:

Indica cuál fue el nivel de estrés percibido en el escenario 2:

No en lo absoluto	Un poco	Neutro	Bastante	Mucho

No en lo absoluto	Un poco	Neutro	Bastante	Mucho

Complejidad de la tarea

A continuación, se describen los niveles de complejidad:

- **Muy Baja:** la tarea fue muy fácil y no requirió mucho esfuerzo.
- **Baja:** la tarea fue fácil con poco esfuerzo requerido.
- **Moderada:** la tarea tuvo un nivel de complejidad moderado, requirió un esfuerzo razonable.
- **Alta:** la tarea fue difícil y requirió un esfuerzo considerable.
- **Muy Alta:** la tarea fue muy difícil y requirió un esfuerzo significativo.

Indica cuál fue la complejidad en el escenario 1:

Muy Baja	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta

Indica cuál fue la complejidad en el escenario 2:

Muy Baja	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta

¿Cuál de los dos escenarios de pareció más complejo?

Escenario 1	Escenario 2	Ambos

Satisfacción de desempeño

A continuación, se describen los niveles de satisfacción:

- **Muy Insatisfecho:** No estoy nada satisfecho con mi desempeño.
- **Insatisfecho:** estoy insatisfecho con mi desempeño, podría haberlo hecho mejor.
- **Neutral:** mi desempeño fue aceptable, pero no excepcional.
- **Satisfecho:** estoy satisfecho con mi desempeño, cumplí con las expectativas.
- **Muy Satisfecho:** estoy completamente satisfecho con mi desempeño, superé las expectativas.

Indica que tan satisfecho te sientes con tu desempeño en el escenario 1:

Muy Insatisfecho	Insatisfecho	Neutral	Satisfecho	Muy Satisfecho

Indica que tan satisfecho te sientes con tu desempeño en el escenario 2:

Muy Insatisfecho	Insatisfecho	Neutral	Satisfecho	Muy Satisfecho

¡GRACIAS POR TU PARTICIPACIÓN!

Apéndice F
Script MATLAB para
Procesamiento de señal PPG

```
% Script para an lisis de PRV con ventanas m viles, ventana  nica  y an lisis de promedios
% Incluye detecci n avanzada de picos con prominencia y ancho
clc;
clear all;
close all; % Cierra todas las figuras existentes antes de empezar

% --- Configuraci n y Selecci n Autom tica de Orden de Filtro ---
% Frecuencia de muestreo
fs = 12.5;
N = 2^nextpow2(length(0:1/fs:10)); % N mero de puntos para la FFT (potencia de 2 para eficiencia)

% Rangos de frecuencia del filtro pasabanda (CORREGIDO: 0.67-2.17 Hz para que coincida con el documento)
f_pass_low = 0.67;   % Corresponde a ~40 BPM
f_pass_high = 2.17;  % Corresponde a ~130 BPM

f_stop_low1 = 0;     % Inicio de la primera banda de stop
f_stop_high1 = 0.5;  % Fin de la primera banda de stop
f_stop_low2 = 2.5;   % Inicio de la segunda banda de stop
f_stop_high2 = fs/2; % Fin de la segunda banda de stop

%  rdenes  de filtro a probar para la selecci n autom tica
ordenes_filtro_prueba = 5:8; % Puedes ajustar este rango
num_ordenes_prueba = length(ordenes_filtro_prueba);
metricas = zeros(1, num_ordenes_prueba);
signals_filtradas_prueba = cell(1, num_ordenes_prueba);

% Usar el primer archivo SE como ejemplo para la selecci n del filtro
archivo_ejemplo = 'SE4.CSV'; % Archivo de ejemplo para la selecci n autom tica
id_ejemplo = 'ID4'; % ID correspondiente al archivo de ejemplo
fprintf('Realizando selecci n autom tica del orden del filtro usando: %s\n', archivo_ejemplo);

% Cargar y preprocesar la se al de ejemplo
try
    data_ejemplo = readtable(archivo_ejemplo);
    if ~ismember('signal', data_ejemplo.Properties.VariableNames)
        error('No se encontr  la columna ''signal'' en el archivo de ejemplo: %s.', archivo_ejemplo);
    end
    signal_original_ejemplo = data_ejemplo.signal;
catch
    error('No se pudo cargar el archivo de ejemplo: %s.', archivo_ejemplo);
end

signal_original_ejemplo = signal_original_ejemplo - mean(signal_original_ejemplo);
signal_original_ejemplo = signal_original_ejemplo / max(abs(signal_original_ejemplo));

samples_to_remove_ejemplo = 10 * fs;
if length(signal_original_ejemplo) > samples_to_remove_ejemplo
    signal_trimmed_ejemplo = signal_original_ejemplo(samples_to_remove_ejemplo+1:end);
else
    error('La se al de ejemplo es demasiado corta para eliminar 10 segundos.');
end
```

```
tiempo_trimmed_ejemplo = (0:length(signal_trimmed_ejemplo)-1) / fs;

% Figura 1: An lisis de espectro y se al filtrada para cada orden
figure(1);
set(gcf, 'Name', sprintf('Selecci n  Autom tica de Filtro - %s', id_ejemplo), 'WindowState', 'maximized');

for i = 1:num_ordenes_prueba
    order_actual = ordenes_filtro_prueba(i);
    [b, a] = butter(order_actual, [f_pass_low f_pass_high] / (fs / 2), 'bandpass');
    signal_filtrada_actual = filtfilt(b, a, signal_trimmed_ejemplo);
    signals_filtradas_prueba{i} = signal_filtrada_actual;

    % Calcular el espectro de potencia (usando la FFT)
    fft_signal_actual = fft(signal_filtrada_actual, N);
    P2_actual = abs(fft_signal_actual/length(signal_filtrada_actual));
    espectro_filtrado_actual = P2_actual(1:N/2+1);
    espectro_filtrado_actual(2:end-1) = 2*espectro_filtrado_actual(2:end-1);
    f_espectro = fs*(0:(N/2))/N;

    % Calcular la potencia en las bandas de inter s
    idx_pass_fft = (f_espectro $>=$f_pass_low) & (f_espectro <= f_pass_high);
    idx_stop1_fft = (f_espectro $>=$ f_stop_low1) & (f_espectro <= f_stop_high1);
    idx_stop2_fft = (f_espectro $>=$ f_stop_low2) & (f_espectro <= f_stop_high2);

    potencia_pass_filtrada = sum(espectro_filtrado_actual(idx_pass_fft).^2);
    potencia_stop_filtrada = sum(espectro_filtrado_actual(idx_stop1_fft).^2) + sum(espectro_filtrado_actual(
        idx_stop2_fft).^2);

    fft_original_ejemplo = fft(signal_trimmed_ejemplo, N);
    P2_original_ejemplo = abs(fft_original_ejemplo/length(signal_trimmed_ejemplo));
    espectro_original_ejemplo = P2_original_ejemplo(1:N/2+1);
    espectro_original_ejemplo(2:end-1) = 2*espectro_original_ejemplo(2:end-1);

    potencia_pass_original = sum(espectro_original_ejemplo(idx_pass_fft).^2);
    potencia_stop_original = sum(espectro_original_ejemplo(idx_stop1_fft).^2) + sum(espectro_original_ejemplo(
        idx_stop2_fft).^2);

    ratio_potencia_pass = potencia_pass_filtrada / (potencia_pass_original + eps);
    ratio_atenuacion_stop = potencia_stop_filtrada / (potencia_stop_original + eps);

    metricas(i) = ratio_potencia_pass - ratio_atenuacion_stop;

    subplot(num_ordenes_prueba + 2, 2, 2*i - 1);
    plot(tiempo_trimmed_ejemplo, signal_filtrada_actual);
    title(sprintf('Filtrada (Orden %d), Metrica: %.3f', order_actual, metricas(i)));
    xlabel('Tiempo (s)');
    ylabel('Amplitud');
    grid on;

    subplot(num_ordenes_prueba + 2, 2, 2*i);
    plot(f_espectro, 10*log10(espectro_filtrado_actual + eps));
    title('Espectro de Potencia (dB)');
    xlabel('Frecuencia (Hz)');
    ylabel('Potencia (dB)');
    grid on;
end

[mejor_metrica, indice_mejor_orden] = max(metricas);
mejor_orden = ordenes_filtro_prueba(indice_mejor_orden);

subplot(num_ordenes_prueba + 2, 2, [2*num_ordenes_prueba + 1, 2*num_ordenes_prueba + 2]);
plot(tiempo_trimmed_ejemplo, signal_trimmed_ejemplo, 'b', tiempo_trimmed_ejemplo, signals_filtradas_prueba{
    indice_mejor_orden}, 'r');
```

```
title(sprintf('Original (Azul) vs. Filtrada (Orden %d, Rojo)', mejor_orden));
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Amplitud');
legend('Original', sprintf('Filtrada (Orden %d)', mejor_orden));
grid on;

fprintf('\n--- Selecci n Autom tica de Orden de Filtro ---\n');
fprintf('M tricas para cada orden: %s\n', num2str(metricas));
fprintf('El orden de filtro seleccionado autom ticamente es: %d con una m trica de %.3f.\n', mejor_orden,
    mejor_metrica);
fprintf('Revisa la primera figura para ver la comparaci n de las se ales en el tiempo y sus espectros de potencia
    para cada orden.\n');

% Figura 2: Comparaci n Original vs. Filtrada para todos los  rdenes  (disposici n horizontal)
figure(2); % Figura expl cita n mero 2
set(gcf, 'Name', sprintf('Comparaci n Original vs. Filtrada (%s)', id_ejemplo), 'WindowState', 'maximized');

subplot_cols_comparacion = num_ordenes_prueba;
subplot_rows_comparacion = 1;

for i = 1:num_ordenes_prueba
    subplot(subplot_rows_comparacion, subplot_cols_comparacion, i);
    plot(tiempo_trimmed_ejemplo, signal_trimmed_ejemplo, 'b');
    hold on;
    plot(tiempo_trimmed_ejemplo, signals_filtradas_prueba{i}, 'r');
    hold off;
    title(sprintf('Orden %d', ordenes_filtro_prueba(i)));
    xlabel('Tiempo (s)');
    ylabel('Amplitud');
    legend('Original', 'Filtrada');
    grid on;
end
sgtitle('Comparaci n Original vs. Filtrada para Diferentes  rdenes ');
fprintf('La segunda figura muestra la comparaci n directa de la se al original vs. filtrada para cada orden.\n');

% --- Procesamiento Principal de Archivos ---
% Lista de archivos CSV a analizar (SE y SN)
archivos_SE = {'SE4.CSV', 'SE5.CSV', 'SE6.CSV', 'SE7.CSV', 'SE8.CSV','SE15.CSV','SE16.CSV','SE12.CSV','SE14.CSV','SE17.
    CSV','SE18.CSV','SE19.CSV'};
archivos_SN = {'SN4.CSV', 'SN5.CSV', 'SN6.CSV', 'SN7.CSV', 'SN8.CSV','SN15.CSV','SN16.CSV','SN12.CSV','SN14.CSV','SN17.
    CSV','SN18.CSV','SN19.CSV'};

% Generar IDs para los archivos SN (asumiendo que los IDs son los mismos para SE y SN)
ids = cellfun(@(x) ['ID', regexp(x, '\d+', 'match', 'once')], archivos_SN, 'UniformOutput', false);

% Inicializar una tabla para almacenar los datos descartados
datos_descartados = table('Size',[0 2], 'VariableTypes',{'string','string'}, 'VariableNames',{'Archivo','Motivo'});

% Procesar archivos SE
fprintf('\nProcesando archivos SE con el orden de filtro seleccionado (%d)...\n', mejor_orden);
% Aseg rate de que fs se pasa como argumento a process_signals
[datos_descartados, resultados_SE_ventanas, resultados_SE_unica] = process_signals(archivos_SE, ids, 'SE',
    datos_descartados, mejor_orden, fs);

% Procesar archivos SN
fprintf('\nProcesando archivos SN con el orden de filtro seleccionado (%d)...\n', mejor_orden);
[datos_descartados, resultados_SN_ventanas, resultados_SN_unica] = process_signals(archivos_SN, ids, 'SN',
    datos_descartados, mejor_orden, fs);

fprintf('\nProcesamiento de se ales completado para todos los archivos.\n');

% Guardar resultados de ventanas m viles
if ~isempty(resultados_SE_ventanas)
```

```
    writetable(resultados_SE_ventanas, 'resultados_SE_ventanas.csv');
    fprintf('Resultados de ventanas m viles para SE guardados en: resultados_SE_ventanas.csv\n');
end
if ~isempty(resultados_SN_ventanas)
    writetable(resultados_SN_ventanas, 'resultados_SN_ventanas.csv');
    fprintf('Resultados de ventanas m viles para SN guardados en: resultados_SN_ventanas.csv\n');
end

% Guardar resultados de ventana  nica
if ~isempty(resultados_SE_unica)
    writetable(resultados_SE_unica, 'resultados_SE_ventana_unica.csv');
    fprintf('Resultados de ventana  nica  para SE guardados en: resultados_SE_ventana_unica.csv\n');
end
if ~isempty(resultados_SN_unica)
    writetable(resultados_SN_unica, 'resultados_SN_ventana_unica.csv');
    fprintf('Resultados de ventana  nica  para SN guardados en: resultados_SN_ventana_unica.csv\n');
end

% Mostrar los datos descartados
if height(datos_descartados) > 0
    fprintf('\n--- Archivos y datos descartados ---\n');
    disp(datos_descartados);
    writetable(datos_descartados, 'datos_descartados.csv');
    fprintf('Datos descartados guardados en: datos_descartados.csv\n');
else
    fprintf('\nNo se descartaron archivos ni datos durante el procesamiento.\n');
end

% --- An lisis de Promedios y Pruebas Estad sticas ---
fprintf('\n--- Calculando promedios de las primeras 5 ventanas por sujeto ---\n');
% Inicializar tabla para promedios
resultados_promedios = table('Size', [0, 14], ...
    'VariableTypes', {'string', 'string', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', ...
                      'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double'}, ...
    'VariableNames', {'ID', 'Tipo', 'NumPicos', 'MeanIBI', 'StdIBI', 'RMSSD', 'HRMean', 'CV', ...
                      'NumPicos_SN', 'MeanIBI_SN', 'StdIBI_SN', 'RMSSD_SN', 'HRMean_SN', 'CV_SN'});

% Lista de m tricas a promediar
metricas_hrv_temporales = {'NumPicos', 'MeanIBI', 'StdIBI', 'RMSSD', 'HRMean', 'CV'}; % Renombrada para claridad
num_ventanas_promedio = 5; % Promediar las primeras 5 ventanas

for i = 1:length(ids)
    current_id = ids{i};

    % Filtrar datos para el sujeto actual
    datos_SE = resultados_SE_ventanas(strcmp(resultados_SE_ventanas.ID, current_id) & resultados_SE_ventanas.Ventana <=
          num_ventanas_promedio, :);
    datos_SN = resultados_SN_ventanas(strcmp(resultados_SN_ventanas.ID, current_id) & resultados_SN_ventanas.Ventana <=
          num_ventanas_promedio, :);

    % Validar n mero de ventanas
    if height(datos_SE) < num_ventanas_promedio
        fprintf('Advertencia: ID %s (SE) tiene solo %d ventanas, promediando las disponibles.\n', current_id, height(
             datos_SE));
    end
    if height(datos_SN) < num_ventanas_promedio
        fprintf('Advertencia: ID %s (SN) tiene solo %d ventanas, promediando las disponibles.\n', current_id, height(
             datos_SN));
    end

    % Calcular promedios para SE
    promedios_SE = struct();
    if ~isempty(datos_SE)
```

```
        for m = 1:length(metricas_hrv_temporales)
            metrica = metricas_hrv_temporales{m};
            promedios_SE.(metrica) = mean(datos_SE.(metrica), 'omitnan');
        end
    else
        for m = 1:length(metricas_hrv_temporales)
            promedios_SE.(metricas_hrv_temporales{m}) = NaN;
        end
    end

    % Calcular promedios para SN
    promedios_SN = struct();
    if ~isempty(datos_SN)
        for m = 1:length(metricas_hrv_temporales)
            metrica = metricas_hrv_temporales{m};
            promedios_SN.(metrica) = mean(datos_SN.(metrica), 'omitnan');
        end
    else
        for m = 1:length(metricas_hrv_temporales)
            promedios_SN.(metricas_hrv_temporales{m}) = NaN;
        end
    end

    % Crear nueva fila con 14 columnas
    new_row = {current_id, 'SE', ...
               promedios_SE.NumPicos, promedios_SE.MeanIBI, promedios_SE.StdIBI, ...
               promedios_SE.RMSSD, promedios_SE.HRMean, promedios_SE.CV, ...
               promedios_SN.NumPicos, promedios_SN.MeanIBI, promedios_SN.StdIBI, ...
               promedios_SN.RMSSD, promedios_SN.HRMean, promedios_SN.CV};

    % Concatenar a resultados_promedios
    resultados_promedios = [resultados_promedios; new_row];
end

% Guardar promedios
writetable(resultados_promedios, 'resultados_promedios.csv');
fprintf('Promedios de las primeras 5 ventanas guardados en: resultados_promedios.csv\n');

% --- Pruebas de Normalidad y Comparaciones Estad sticas ---
fprintf('\n--- Realizando pruebas de normalidad y comparaciones estad sticas ---\n');
% Inicializar tabla para resultados de pruebas
resultados_pruebas = table('Size', [length(metricas_hrv_temporales), 3], ...
    'VariableTypes', {'string', 'string', 'double'}, ...
    'VariableNames', {'Metrica', 'Prueba', 'PValor'});

for m = 1:length(metricas_hrv_temporales)
    metrica = metricas_hrv_temporales{m};
    datos_SE = resultados_promedios.(metrica);
    datos_SN = resultados_promedios.([metrica '_SN']);

    % Eliminar NaN para pruebas
    valid_idx = ~isnan(datos_SE) & ~isnan(datos_SN);
    datos_SE = datos_SE(valid_idx);
    datos_SN = datos_SN(valid_idx);

    % Verificar si hay suficientes datos para pruebas
    if length(datos_SE) < 2
        fprintf('Advertencia: No hay suficientes datos v lidos para %s. Omitiendo prueba.\n', metrica);
        resultados_pruebas(m, :) = {metrica, 'Ninguna', NaN};
        continue;
    end

    % Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov)
```

```
    try
        % swtest requiere Statistics and Machine Learning Toolbox
        [h_SE, p_SE] = swtest(datos_SE);
        [h_SN, p_SN] = swtest(datos_SN);
        normal = (p_SE > 0.05) && (p_SN > 0.05);
    catch % Fallback a kstest si swtest no est  disponible
        [h_SE, p_SE] = kstest((datos_SE - mean(datos_SE))/std(datos_SE));
        [h_SN, p_SN] = kstest((datos_SN - mean(datos_SN))/std(datos_SN));
        normal = (p_SE > 0.05) && (p_SN > 0.05);
    end

    % Realizar prueba estad stica
    if normal
        [~, p_valor] = ttest(datos_SE, datos_SN);
        prueba = 't-test';
    else
        p_valor = signrank(datos_SE, datos_SN);
        prueba = 'Wilcoxon';
    end

    fprintf('M trica: %s, Normalidad (SE p=%.4f, SN p=%.4f), Prueba: %s, p-valor: %.4f\n', ...
            metrica, p_SE, p_SN, prueba, p_valor);

    % Guardar resultados de la prueba
    resultados_pruebas(m, :) = {metrica, prueba, p_valor};
end

% Guardar resultados de pruebas
writetable(resultados_pruebas, 'resultados_pruebas.csv');
fprintf('Resultados de pruebas estad sticas guardados en: resultados_pruebas.csv\n');

% --- Visualizaci n con Boxplots ---
figure(3); % Figura expl cita n mero 3
set(gcf, 'Name', 'Comparaci n de Promedios SE vs SN', 'WindowState', 'maximized');
for m = 1:length(metricas_hrv_temporales)
    metrica = metricas_hrv_temporales{m};
    subplot(2, 3, m);
    boxplot([resultados_promedios.(metrica), resultados_promedios.([metrica '_SN'])], ...
            {'SE', 'SN'});
    title(['Promedio de ', metrica]);
    ylabel(metrica);
    grid on;
end
sgtitle('Comparaci n de Promedios de M tricas (SE vs SN)');


% --- Funci n para procesar se ales con ventanas m viles y  nica  ---
function [datos_descartados, resultados_ventanas, resultados_unica] = process_signals(archivos, ids, type_prefix,
     datos_descartados, filter_order, fs)
    % Inicializar tablas para almacenar resultados
    resultados_ventanas = table('Size', [0, 9], ...
        'VariableTypes', {'string', 'string', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double'},
             ...
        'VariableNames', {'ID', 'Tipo', 'Ventana', 'NumPicos', 'MeanIBI', 'StdIBI', 'RMSSD', 'HRMean', 'CV'});

    resultados_unica = table('Size', [0, 9], ...
        'VariableTypes', {'string', 'string', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double'},
             ...
        'VariableNames', {'ID', 'Tipo', 'Ventana', 'NumPicos', 'MeanIBI', 'StdIBI', 'RMSSD', 'HRMean', 'CV'});

    % Configuraci n de ventanas
    ventana_duracion = 5 * 60; % 5 minutos en segundos
    ventana_muestras = ventana_duracion * fs;
```

```
solapamiento = 0.5; % 50% de solapamiento
paso_ventana = ventana_duracion * (1 - solapamiento);
paso_muestras = paso_ventana * fs;
ventana_unica_inicio = 5 * 60 * fs;
ventana_unica_fin = 10 * 60 * fs;

for i = 1:length(archivos)
    current_file = archivos{i};
    current_id = ids{i};
    fprintf('Procesando archivo: %s (ID: %s)\n', current_file, current_id);

    % Cargar los datos desde el archivo CSV
    try
        data = readtable(current_file);
        if ~ismember('signal', data.Properties.VariableNames)
            warning('No se encontr  la columna ''signal'' en el archivo: %s. Se omite este archivo.', current_file
                );
            datos_descartados = [datos_descartados; table(string(current_file), string('Columna "signal" no
                encontrada'), 'VariableNames', {'Archivo', 'Motivo'})];
            continue;
        end
        signal = data.signal;
    catch
        warning('No se pudo cargar el archivo: %s. Se omite este archivo.', current_file);
        datos_descartados = [datos_descartados; table(string(current_file), string('Error al cargar el archivo'), '
            VariableNames', {'Archivo', 'Motivo'})];
        continue;
    end

    % Preprocesamiento de la se al
    signal = signal - mean(signal);
    signal = signal / max(abs(signal));
    % Eliminar primeros 10 segundos
    samples_to_remove = 10 * fs;
    if length(signal) <= samples_to_remove
        warning('La se al es demasiado corta para eliminar 10 segundos. Se omite el archivo: %s', current_file);
        datos_descartados = [datos_descartados; table(string(current_file), string('Se al demasiado corta para
            eliminar 10 segundos'), 'VariableNames', {'Archivo', 'Motivo'})];
        continue;
    else
        signal = signal(samples_to_remove+1:end);
    end
    if length(signal) <= ventana_muestras
        warning('La se al es demasiado corta para una ventana de 5 minutos. Se omite el archivo: %s', current_file
            );
        datos_descartados = [datos_descartados; table(string(current_file), string('Se al demasiado corta para
            ventana de 5 minutos'), 'VariableNames', {'Archivo', 'Motivo'})];
        continue;
    end

    % Dise o del filtro (  CORRECCIN   APLICADA AQU  PARA LA CONSISTENCIA!)
    % Usa las mismas frecuencias que en la secci n de selecci n autom tica de orden del filtro
    f_low = 0.67; % ~40 BPM
    f_high = 2.17; % ~130 BPM
    [b, a] = butter(filter_order, [f_low f_high] / (fs / 2), 'bandpass');

    % Aplicar filtro a la se al completa
    filtered_signal = filtfilt(b, a, signal);

    % --- Procesamiento de Ventanas M viles ---
    num_ventanas = floor((length(filtered_signal) - ventana_muestras) / paso_muestras) + 1;
    fprintf('  Procesando %d ventanas m viles de 5 minutos con 50%% de solapamiento...\n', num_ventanas);
    for v = 1:num_ventanas
```

```
            inicio = (v-1) * paso_muestras + 1;
            fin = inicio + ventana_muestras - 1;
            if fin > length(filtered_signal)
                fin = length(filtered_signal);
            end
            ventana_signal = filtered_signal(inicio:fin);

            % Calcular m tricas para la ventana
            metricas_ventana = calcular_metricas(ventana_signal, fs);
            if isempty(metricas_ventana)
                fprintf('  Ventana %d omitida: no se detectaron suficientes picos.\n', v);
                continue;
            end

            % A adir resultados a la tabla
            new_row = {current_id, type_prefix, v, ...
                       metricas_ventana.NumPicos, metricas_ventana.MeanIBI, ...
                       metricas_ventana.StdIBI, metricas_ventana.RMSSD, ...
                       metricas_ventana.HRMean, metricas_ventana.CV};
            resultados_ventanas = [resultados_ventanas; new_row];
        end

        % --- Procesamiento de Ventana  nica  (Minutos 5 a 10) ---
        if length(filtered_signal) >= ventana_unica_fin
            ventana_unica_signal = filtered_signal(ventana_unica_inicio+1:ventana_unica_fin);
            fprintf('  Procesando ventana  nica  (minutos 5 a 10)...\n');

            metricas_unica = calcular_metricas(ventana_unica_signal, fs);
            if ~isempty(metricas_unica)
                new_row = {current_id, type_prefix, -1, ... % -1 indica ventana  nica
                           metricas_unica.NumPicos, metricas_unica.MeanIBI, ...
                           metricas_unica.StdIBI, metricas_unica.RMSSD, ...
                           metricas_unica.HRMean, metricas_unica.CV};
                resultados_unica = [resultados_unica; new_row];
            else
                fprintf('  Ventana  nica  omitida: no se detectaron suficientes picos.\n');
            end
        else
            warning('La se al es demasiado corta para la ventana  nica  (minutos 5 a 10). Se omite el archivo: %s',
                 current_file);
            datos_descartados = [datos_descartados; table(string(current_file), string('Se al demasiado corta para
                 ventana  nica '), 'VariableNames', {'Archivo', 'Motivo'})];
        end
    end
end

% --- Funci n para calcular m tricas de HRV con detecci n avanzada de picos ---
function metricas = calcular_metricas(signal, fs)
    % Calcular derivada
    dt = 1 / fs;
    derivative_signal = diff(signal) / dt;
    if length(derivative_signal) < length(signal)
        derivative_signal = [derivative_signal; derivative_signal(end)];
    end

    % Detecci n de picos con prominencia y ancho
    min_peak_height = 0.05 * max(abs(derivative_signal));
    min_peak_distance = 0.5 * fs;
    min_peak_prominence = 0.005 * max(abs(derivative_signal));

    [peaks, locs, widths, prominences] = findpeaks(derivative_signal, ...
        'MinPeakHeight', min_peak_height, ...
        'MinPeakDistance', min_peak_distance, ...
```

```
        'MinPeakProminence', min_peak_prominence, ...
        'WidthReference', 'halfprom', ...
        'Annotate', 'extents');

    num_peaks = length(peaks);

    % Verificar si hay suficientes picos
    if num_peaks < 2
        metricas = [];
        return;
    end

    % C lculo de IBI (Intervalos entre latidos)
    ibi = diff(locs) * (1/fs) * 1000; % Convertir a milisegundos

    % Limpieza de artefactos (IBI < 300ms o > 1500ms)
    valid_idx = (ibi >= 300) & (ibi <= 1500);
    ibi_clean = ibi(valid_idx);

    % Verificar si hay suficientes IBI v lidos
    if length(ibi_clean) < 2
        metricas = [];
        return;
    end

    % Suavizado con filtro de mediana
    window_size = min(5, length(ibi_clean)); % Asegura que el tama o de la ventana no exceda la longitud del IBI
    ibi_smooth = movmedian(ibi_clean, window_size);

    % C lculo de m tricas
    mean_ibi = mean(ibi_smooth);
    std_ibi = std(ibi_smooth);
    rmssd = sqrt(mean(diff(ibi_smooth).^2));
    hr_mean = 60000 / mean_ibi;
    cv = (std_ibi / mean_ibi) * 100;

    % Crear estructura de resultados
    metricas = struct('NumPicos', num_peaks, 'MeanIBI', mean_ibi, 'StdIBI', std_ibi, ...
                      'RMSSD', rmssd, 'HRMean', hr_mean, 'CV', cv);
end
```

Listing F.1: Script de análisis de PRV en MATLAB

Apéndice G
Script MATLAB para
Procesamiento de IDARE

Este apéndice muestra el script desarrollado en MATLAB para calcular automáticamente las puntuaciones crudas, T y percentiles del IDARE. Además, interpreta los niveles de ansiedad como baja, media o alta, según la normativa del instrumento.

```
% INICIO DEL SCRIPT
clc; clear all; close all;

% --- Configuraci n inicial ---
num_items_SXR = 20;
num_items_SXE = 20;

negativos_SXR = [21, 26, 27, 30, 33, 36, 39];
negativos_SXE = [1, 2, 5, 8, 10, 11, 15, 16, 19, 20];

% --- Solicitar datos generales del participante ---
ID = input('Ingrese el ID del participante: ', 's');
Genero = input('Ingrese el g nero del participante (M/F/O): ', 's');
Edad = input('Ingrese la edad del participante: ');
Licenciatura = input('Ingrese el nivel acad mico del participante: ', 's');
Semestre = input('Ingrese el semestre del participante: ');
ExpRV = input('Ingrese la experiencia en realidad virtual ExpRv (1-3): ');
ConSus = input('Consumo de Sutancias Cs (1-0): ');
CalSue = input('Ingrese la calidad del sue o Cl (1-3): ');
EstPer1 = input('Ingrese el estr s percibido EstPer1 (Escenario 1,1-5): ');
EstPer2 = input('Ingrese el estr s percibido EstPer2 (Escenario 2, 1-5): ');
ComTa1 = input('Ingrese la complejidad de la tarea ComTa1 (Escenario 1, 1-5): ');
ComTa2 = input('Ingrese la competencia t ctica ComTa2 (Escenario 2, 1-5): ');
Comp = input('Ingrese la complejidad entre E1 y E2 Comp (1-3): ');
SatDese1 = input('Ingrese la satisfacci n del desempe o SatDese1 (Escenario 1, 1-5): ');
SatDese2 = input('Ingrese la satisfacci n del desempe o SatDese2 (Escenario 2, 1-5): ');

% --- Solicitar respuestas para SXE del Escenario 1 ---
fprintf('\nIngrese las respuestas para la escala SXE (1 a 20) - Escenario 1:\n');
respuestas_SXE1 = zeros(1, num_items_SXE);
for i = 1:num_items_SXE
    respuestas_SXE1(i) = input(sprintf(' tem  %d: ', i));
end

% --- Solicitar respuestas para SXE del Escenario 2 ---
fprintf('\nIngrese las respuestas para la escala SXE (1 a 20) - Escenario 2:\n');
respuestas_SXE2 = zeros(1, num_items_SXE);
for i = 1:num_items_SXE
    respuestas_SXE2(i) = input(sprintf(' tem  %d: ', i));
end

% --- Solicitar respuestas para SXR ---
fprintf('\nIngrese las respuestas para la escala SXR (21 a 40):\n');
respuestas_SXR = zeros(1, num_items_SXR);
for i = 1:num_items_SXR
    respuestas_SXR(i) = input(sprintf(' tem  %d: ', i + 20));
```

```
end

% --- Proceso de inversi n ---
% Funci n para invertir respuestas
invertir = @(x) 5 - x;

% Invertir respuestas negativas
respuestas_SXE1(negativos_SXE) = invertir(respuestas_SXE1(negativos_SXE));
respuestas_SXE2(negativos_SXE) = invertir(respuestas_SXE2(negativos_SXE));
respuestas_SXR(negativos_SXR - 20) = invertir(respuestas_SXR(negativos_SXR - 20)); % Ajustar  ndice  para SXR

% --- Definir  tems  para Total A y Total B ---
% Para Ansiedad Rasgo (SXR)
items_TotalA_SXR = [22, 23, 24, 25, 28, 29, 31, 32, 34, 35, 37, 38, 40] - 20; % Ajustar  ndices
items_TotalB_SXR = [21, 26, 27, 30, 33, 36, 39] - 20; % Ajustar  ndices

% Para Ansiedad Estado (SXE)
items_TotalA_SXE = [3, 4, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 17, 18];
items_TotalB_SXE = [1, 2, 5, 8, 10, 11, 15, 16, 19, 20];

% --- Calcular Total A y Total B ---
% Para Ansiedad Rasgo (SXR)
TotalA_SXR = sum(respuestas_SXR(items_TotalA_SXR));
TotalB_SXR = sum(respuestas_SXR(items_TotalB_SXR));

% Para Ansiedad Estado (SXE) - Escenario 1
TotalA_SXE1 = sum(respuestas_SXE1(items_TotalA_SXE));
TotalB_SXE1 = sum(respuestas_SXE1(items_TotalB_SXE));

% Para Ansiedad Estado (SXE) - Escenario 2
TotalA_SXE2 = sum(respuestas_SXE2(items_TotalA_SXE));
TotalB_SXE2 = sum(respuestas_SXE2(items_TotalB_SXE));

% --- Aplicar f rmulas ---
% Ansiedad Rasgo
puntuacion_rasgo = (TotalA_SXR - TotalB_SXR) + 35;

% Ansiedad Estado - Escenario 1
puntuacion_estado1 = (TotalA_SXE1 - TotalB_SXE1) + 50;

% Ansiedad Estado - Escenario 2
puntuacion_estado2 = (TotalA_SXE2 - TotalB_SXE2) + 50;

fprintf('\nPuntuaci n cruda de Ansiedad Estado (SXE) - Escenario 1: %d\n', puntuacion_estado1);
fprintf('\nPuntuaci n cruda de Ansiedad Estado (SXE) - Escenario 2: %d\n', puntuacion_estado2);
fprintf('\nPuntuaci n cruda de Ansiedad Rasgo (SXR): %d\n', puntuacion_rasgo);

% --- Solicitar puntuaciones T y percentiles manualmente ---
fprintf('\nIngrese las puntuaciones T y percentiles:\n');
puntuacion_T_rasgo = input('Puntuaci n T para Ansiedad Rasgo: ');
percentil_rasgo = input('Percentil para Ansiedad Rasgo: ');

puntuacion_T_estado1 = input('Puntuaci n T para Ansiedad Estado - Escenario 1: ');
percentil_estado1 = input('Percentil para Ansiedad Estado - Escenario 1: ');

puntuacion_T_estado2 = input('Puntuaci n T para Ansiedad Estado - Escenario 2: ');
percentil_estado2 = input('Percentil para Ansiedad Estado - Escenario 2: ');

% --- Interpretaci n de los resultados ---
interpretar_ansiedad = @(puntuacion_T) ...
    (puntuacion_T < 40) * 1 + ...  % Baja ansiedad
    (puntuacion_T >= 40 && puntuacion_T <= 60) * 2 + ...  % Ansiedad media
    (puntuacion_T > 60) * 3;  % Alta ansiedad
```

```
interpretacion_rasgo = interpretar_ansiedad(puntuacion_T_rasgo);
interpretacion_estado1 = interpretar_ansiedad(puntuacion_T_estado1);
interpretacion_estado2 = interpretar_ansiedad(puntuacion_T_estado2);

% --- Mostrar resultados ---
fprintf('\n--- Resultados ---\n');
fprintf('Puntuaci n cruda de Ansiedad Rasgo (SXR): %d\n', puntuacion_rasgo);
%fprintf('Puntuaci n T de Ansiedad Rasgo: %.2f\n', puntuacion_T_rasgo);
%fprintf('Percentil de Ansiedad Rasgo: %.2f\n', percentil_rasgo);
%fprintf('Interpretaci n de Ansiedad Rasgo: ');
switch interpretacion_rasgo
    case 1
        fprintf('Baja ansiedad\n');
    case 2
        fprintf('Ansiedad media\n');
    case 3
        fprintf('Alta ansiedad\n');
end

fprintf('\nPuntuaci n cruda de Ansiedad Estado (SXE) - Escenario 1: %d\n', puntuacion_estado1);
%fprintf('Puntuaci n T de Ansiedad Estado - Escenario 1: %.2f\n', puntuacion_T_estado1);
%fprintf('Percentil de Ansiedad Estado - Escenario 1: %.2f\n', percentil_estado1);
%fprintf('Interpretaci n de Ansiedad Estado - Escenario 1: ');
switch interpretacion_estado1
    case 1
        fprintf('Baja ansiedad\n');
    case 2
        fprintf('Ansiedad media\n');
    case 3
        fprintf('Alta ansiedad\n');
end

fprintf('\nPuntuaci n cruda de Ansiedad Estado (SXE) - Escenario 2: %d\n', puntuacion_estado2);
%fprintf('Puntuaci n T de Ansiedad Estado - Escenario 2: %.2f\n', puntuacion_T_estado2);
%fprintf('Percentil de Ansiedad Estado - Escenario 2: %.2f\n', percentil_estado2);
%fprintf('Interpretaci n de Ansiedad Estado - Escenario 2: ');
switch interpretacion_estado2
    case 1
        fprintf('Baja ansiedad\n');
    case 2
        fprintf('Ansiedad media\n');
    case 3
        fprintf('Alta ansiedad\n');
end
```

Listing G.1: Script para cálculo automatizado del IDARE

Apéndice H
Script MATLAB para análisis espectral

```
% MATLAB Script: An lisis Espectral de IBI para HRV (LF, HF) y Visualizaci n
clc;
clear all;
close all;

% --- 1. Configuraci n Inicial ---
fs = 12.5; % Frecuencia de muestreo (Hz) de la se al PPG
f_pass_low = 0.67; % 40 lpm para filtro PPG
f_pass_high = 2.17; % 130 lpm para filtro PPG
filter_order = 7; % Orden del filtro PPG

% Duraci n de la ventana de an lisis para HRV (5-10 min recomendado)
% Para IBI, es com n usar ventanas de 5 minutos para HF y 2-5 minutos para LF
% Aqu  usaremos los mismos 5-10 minutos que ya utilizas para el segmento fijo
window_start_sec = 5 * 60; % Inicio de la ventana fija (minuto 5)
window_end_sec = 10 * 60; % Fin de la ventana fija (minuto 10)

% Archivos de ejemplo
archivos_SE = {'SE4.CSV', 'SE5.CSV', 'SE6.CSV', 'SE7.CSV', 'SE8.CSV', 'SE15.CSV', 'SE16.CSV', 'SE12.CSV', 'SE14.CSV', '
     SE17.CSV', 'SE18.CSV', 'SE19.CSV'};
archivos_SN = {'SN4.CSV', 'SN5.CSV', 'SN6.CSV', 'SN7.CSV', 'SN8.CSV', 'SN15.CSV', 'SN16.CSV', 'SN12.CSV', 'SN14.CSV', '
     SN17.CSV', 'SN18.CSV', 'SN19.CSV'};

ids = cellfun(@(x) ['ID', regexp(x, '\d+', 'match', 'once')], archivos_SN, 'UniformOutput', false);

% Dise o del filtro pasabanda para la se al PPG
[b_ppg, a_ppg] = butter(filter_order, [f_pass_low f_pass_high] / (fs / 2), 'bandpass');

% --- 2. Preparaci n para Almacenar Resultados HRV (temporales y espectrales) ---
% Ajusta esta tabla para incluir las m tricas espectrales de IBI
resultados_hrv_espectral = table('Size', [length(ids), 8], ...
    'VariableTypes', {'string', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'double', 'string'}, ...
    'VariableNames', {'Sujeto', 'LF_SN', 'HF_SN', 'LFHF_Ratio_SN', 'LF_SE', 'HF_SE', 'LFHF_Ratio_SE', '
         Espectro_Relevante'});

% --- Bucle principal para cada sujeto ---
for i = 1:length(archivos_SE)
    current_id = ids{i};
    fprintf('Procesando sujeto: %s\n', current_id);

    % --- Cargar y Preprocesar Se ales PPG ---
    [signal_SE, fs_SE] = load_and_preprocess(archivos_SE{i}, fs, b_ppg, a_ppg, window_start_sec, window_end_sec);
    [signal_SN, fs_SN] = load_and_preprocess(archivos_SN{i}, fs, b_ppg, a_ppg, window_start_sec, window_end_sec);

    if isempty(signal_SE) || isempty(signal_SN)
        % Si hubo un error en la carga/preprocesamiento, asignar NaN y saltar
        resultados_hrv_espectral(i, :) = {current_id, NaN, NaN, NaN, NaN, NaN, NaN, "Error_Carga"};
        continue;
    end
```

```
% --- Detecci n de Picos y C lculo de IBI ---
[picos_SE, ibi_SE] = detect_ppg_peaks_and_ibi(signal_SE, fs_SE);
[picos_SN, ibi_SN] = detect_ppg_peaks_and_ibi(signal_SN, fs_SN);

% Asegurarse de tener suficientes IBIs para el an lisis espectral (m nimo 2 minutos)
% A 60 lpm, 2 minutos son 120 IBIs. A 40 lpm, son 80 IBIs. Usaremos un umbral de 80.
if length(ibi_SE) < 80 || length(ibi_SN) < 80
    fprintf('Advertencia: Insuficientes IBIs para an lisis espectral en %s. Asignando NaN.\n', current_id);
    resultados_hrv_espectral(i, :) = {current_id, NaN, NaN, NaN, NaN, NaN, NaN, "N/A"};
    continue;
end

% --- 3. An lisis Espectral de IBI (PSD con Welch) ---

% Par metros para el m todo de Welch
window_welch = 128; % Tama o de la ventana (ej. 128 muestras de IBI)
noverlap = 64;   % Solapamiento de la ventana (50% de la ventana)
nfft = 512;       % N mero de puntos FFT (debe ser >= window_welch)

% Adaptar los par metros de Welch si la secuencia IBI es m s corta
current_window_sn = min(window_welch, length(ibi_SN));
current_noverlap_sn = min(noverlap, floor(current_window_sn / 2));
current_window_se = min(window_welch, length(ibi_SE));
current_noverlap_se = min(noverlap, floor(current_window_se / 2));

% Fs para pwelch en IBI se calcula como 1000 / mean(IBI_ms) para obtener la frecuencia en Hz del espectro
% Esto es crucial porque pwelch espera una frecuencia de muestreo para el dominio de tiempo
% y el IBI es una serie de eventos, no muestreada a una Fs fija como el PPG.
fs_ibi_sn = 1000 / mean(ibi_SN);
fs_ibi_se = 1000 / mean(ibi_SE);

% Calcular PSD para SN
[pxx_sn, f_ibi_sn] = pwelch(ibi_SN, current_window_sn, current_noverlap_sn, nfft, fs_ibi_sn);

% Calcular PSD para SE
[pxx_se, f_ibi_se] = pwelch(ibi_SE, current_window_se, current_noverlap_se, nfft, fs_ibi_se);

% --- Cuantificaci n de Bandas de Frecuencia IBI ---
% Rangos de frecuencia est ndar para HRV espectral (PSD de IBI)
f_vlf_low = 0.003; f_vlf_high = 0.04;
f_lf_low = 0.04; f_lf_high = 0.15;
f_hf_low = 0.15; f_hf_high = 0.4; % L mite superior de 0.4 Hz para HF es com n

% Funci n auxiliar para integrar potencia en bandas
[LF_SN, HF_SN, LFHF_Ratio_SN] = calculate_ibi_bands(pxx_sn, f_ibi_sn, f_lf_low, f_lf_high, f_hf_low, f_hf_high);
[LF_SE, HF_SE, LFHF_Ratio_SE] = calculate_ibi_bands(pxx_se, f_ibi_se, f_lf_low, f_lf_high, f_hf_low, f_hf_high);

% Determinar si hay un cambio relevante en el espectro (ej. en LF/HF Ratio > 10% absoluto)
espectro_relevante_str = "No";
if ~isnan(LFHF_Ratio_SN) && ~isnan(LFHF_Ratio_SE) && LFHF_Ratio_SN ~= 0
    cambio_lfhf_porc = ((LFHF_Ratio_SE - LFHF_Ratio_SN) / LFHF_Ratio_SN) * 100;
    if abs(cambio_lfhf_porc) > 10
        espectro_relevante_str = "S  ";
    end
end

% Guardar resultados espectrales en la tabla
resultados_hrv_espectral(i, :) = {current_id, LF_SN, HF_SN, LFHF_Ratio_SN, LF_SE, HF_SE, LFHF_Ratio_SE,
     espectro_relevante_str};

% --- Generar Gr ficos de PSD de IBI ---
% Ajustes para evitar el "amontonamiento"
figure('Name', sprintf('PSD de IBI - %s', current_id), 'Position', [200, 200, 900, 550]); % Ligeramente m s grande
```

```
    plot(f_ibi_sn, 10*log10(pxx_sn + eps), 'b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'SN (Sin Estr s)');
    hold on;
    plot(f_ibi_se, 10*log10(pxx_se + eps), 'r', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'SE (Con Estr s)');
    hold off;

    title(sprintf('Densidad Espectral de Potencia (PSD) de IBI - %s', current_id), 'FontSize', 14);
    xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontSize', 12);
    ylabel('PSD (dB/Hz)', 'FontSize', 12);
    legend('Location', 'best', 'FontSize', 10); % Ajusta la ubicaci n de la leyenda autom ticamente

    % Limita el eje X para ver las bandas de HRV, dando un poco de margen extra
    xlim([0.003 0.45]);
    grid on;

    % --- Marcado y etiquetado de Bandas de Frecuencia IBI ---
    % Marcar solo los l mites principales de las bandas con l neas sin etiquetas de texto directas
    % Esto evita la superposici n de etiquetas que viste en la imagen.
    xline(f_lf_low, 'k--', 'LineWidth', 0.8); % L mite entre VLF y LF (0.04 Hz)
    xline(f_hf_low, 'g--', 'LineWidth', 0.8); % L mite entre LF y HF (0.15 Hz)

    % --- A adir etiquetas de texto para las bandas directamente sobre el gr fico (Opcional) ---
    % Estas etiquetas son m s flexibles en su posicionamiento.
    % Calcula la posici n Y para el texto. y_limits son los l mites actuales del eje Y del gr fico.
    y_limits = ylim;
    y_text_pos = y_limits(1) + (y_limits(2) - y_limits(1)) * 0.9; % Posici n al 90% del rango Y

    % Posici n X para centrar el texto en cada banda
    x_lf_center = (f_lf_low + f_lf_high) / 2;
    x_hf_center = (f_hf_low + f_hf_high) / 2;

    % Etiquetas de texto para las bandas LF y HF
    % Comenta estas l neas si prefieres no tener texto directo en el gr fico
    text(x_lf_center, y_text_pos, 'Banda LF', ...
         'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'top', 'FontSize', 9, 'Color', 'k');
    text(x_hf_center, y_text_pos, 'Banda HF', ...
         'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'top', 'FontSize', 9, 'Color', 'g');

    saveas(gcf, sprintf('PSD_IBI_%s.png', current_id)); % Guarda el gr fico como PNG
end

% Mostrar la tabla final de resultados espectrales de IBI
fprintf('\n--- Resultados del An lisis Espectral de IBI (LF, HF, LF/HF Ratio) ---\n');
disp(resultados_hrv_espectral);

% --- Funciones Auxiliares (deben estar al final del script principal o en archivos .m separados) ---

function [signal_filtered, actual_fs] = load_and_preprocess(filepath, target_fs, b_filter, a_filter, start_sec, end_sec
    )
    signal_filtered = [];
    actual_fs = target_fs; % Asumimos que la frecuencia de muestreo es la misma para todos

    try
        data = readtable(filepath);
        raw_signal = data.signal;

        % Preprocesamiento: normalizaci n, eliminaci n de 10 segundos iniciales
        raw_signal = raw_signal - mean(raw_signal);
        raw_signal = raw_signal / max(abs(raw_signal));

        samples_to_remove = 10 * actual_fs;
        if length(raw_signal) > samples_to_remove
            raw_signal = raw_signal(samples_to_remove+1:end);
```

```
        else
            fprintf('Advertencia: Se al demasiado corta en %s para eliminar los primeros 10s. Usando se al completa.\
                n', filepath);
        end

        % Aplicar filtro pasabanda
        signal_filtered = filtfilt(b_filter, a_filter, raw_signal);

        % Seleccionar segmento de 5-10 minutos (o hasta el final si es m s corto)
        start_sample = start_sec * actual_fs + 1;
        end_sample = end_sec * actual_fs;
        if end_sample <= length(signal_filtered)
            signal_filtered = signal_filtered(start_sample:end_sample);
        else
            fprintf('Advertencia: Se al en %s es m s corta que la ventana de an lisis (5-10 min). Usando hasta el
                final.\n', filepath);
            signal_filtered = signal_filtered(start_sample:end);
        end

    catch ME
        fprintf('Error procesando archivo %s: %s\n', filepath, ME.message);
    end
end

function [peak_locs, ibi] = detect_ppg_peaks_and_ibi(signal, fs)
    % Par metros de detecci n de picos (ajusta seg n tus observaciones)
    % Estos par metros deben ser robustos para diferentes morfolog as de PPG
    min_peak_height_perc = 0.05; % 5% del m ximo
    min_peak_distance_sec = 0.5; % 0.5 segundos (evita detecciones m ltiples)
    min_peak_prominence_perc = 0.005; % 0.5% del m ximo

    % Calcula la primera derivada para mejorar la detecci n
    % Los picos de la derivada suelen ser m s agudos y f ciles de detectar
    derivative_signal = diff(signal);

    % Calcula los umbrales absolutos basados en la se al derivada
    min_peak_height = max(derivative_signal) * min_peak_height_perc;
    min_peak_prominence = max(derivative_signal) * min_peak_prominence_perc;

    % Detecci n de picos en la derivada. 'MinPeakHeight' y 'MinPeakProminence'
    % son importantes para filtrar ruido y picos falsos.
    [~, peak_locs_deriv] = findpeaks(derivative_signal, 'MinPeakHeight', min_peak_height, ...
                                     'MinPeakDistance', min_peak_distance_sec * fs, ...
                                     'MinPeakProminence', min_peak_prominence);

    % Asume que las ubicaciones de los picos en la derivada corresponden a los latidos.
    % Podr as necesitar un ajuste fino si el pico de la derivada no coincide
    % exactamente con el pico sist lico del PPG.
    peak_locs = peak_locs_deriv;

    % Validar y calcular IBI
    if length(peak_locs) > 1
        ibi_samples = diff(peak_locs);
        ibi_ms = (ibi_samples / fs) * 1000; % Convertir a milisegundos

        % Filtrado de artefactos de IBI (l mites fisiol gicos)
        % Esto es crucial para remover IBIs at picos que pueden distorsionar el an lisis.
        valid_ibi_idx = (ibi_ms >= 300) & (ibi_ms <= 1500); % Corresponde a 200 lpm a 40 lpm
        ibi = ibi_ms(valid_ibi_idx);

        % Opcional: Filtrado de mediana para remover artefactos de IBI m s sutiles
        % ibi = medfilt1(ibi, 3); % Ventana de 3 para suavizar artefactos, si es necesario
    else
```

```
        ibi = []; % No hay suficientes picos para calcular IBIs v lidos
    end
end

function [LF_power, HF_power, LFHF_Ratio] = calculate_ibi_bands(pxx, f, f_lf_low, f_lf_high, f_hf_low, f_hf_high)
    % Integrar potencia en las bandas LF y HF
    idx_lf = (f >= f_lf_low) & (f <= f_lf_high);
    idx_hf = (f >= f_hf_low) & (f <= f_hf_high);

    % Calcula el ancho de banda para la integraci n.
    % Asume que 'f' es equiespaciado (como lo es con pwelch).
    if length(f) > 1
        delta_f = f(2) - f(1);
    else
        delta_f = 0; % Evitar error si f tiene un solo punto o est  vac o
    end

    LF_power = sum(pxx(idx_lf)) * delta_f;
    HF_power = sum(pxx(idx_hf)) * delta_f;

    % Calcular las unidades normalizadas (LFnu, HFnu) y el ratio LF/HF
    % Aunque no las devolvemos directamente, son conceptos importantes para la discusi n.
    total_lf_hf = LF_power + HF_power;
    if total_lf_hf > 0
        LF_nu = (LF_power / total_lf_hf) * 100; % Porcentaje de LF en el total LF+HF
        HF_nu = (HF_power / total_lf_hf) * 100; % Porcentaje de HF en el total LF+HF
    else
        LF_nu = NaN;
        HF_nu = NaN;
    end

    if HF_power > 0
        LFHF_Ratio = LF_power / HF_power;
    else
        LFHF_Ratio = NaN; % Evitar divisi n por cero si no hay potencia en HF
    end
end
```

Listing H.1: Script para Análisis Espectral

Apéndice I
Script MATLAB para slope plots

```
%% MATLAB Script para Generar Gr ficos de Cambios Individuales (Slope Plots)
% para M tricas de HRV (Temporales y Espectrales)

% Limpiar workspace y cerrar figuras anteriores
clear;
close all;
clc;

% --- Datos Generales ---
subject_ids = {'ID4', 'ID5', 'ID6', 'ID7', 'ID8', 'ID12', 'ID14', 'ID15', 'ID16', 'ID17', 'ID18', 'ID19'};
num_subjects = length(subject_ids);

% --- Datos de M tricas Temporales (Extra dos de las im genes "Resultados SN" y "Resultados SE") ---
% num_picos
NumPicos_SN = [471, 586, 635, 656, 601, 594, 598, 567, 563, 485, 573, 487];
NumPicos_SE = [467, 659, 532, 661, 643, 558, 619, 547, 505, 573, 602, 682];

% media_ibi (MeanIBI)
MeanIBI_SN = [694.02, 560.12, 521.87, 502.40, 552.32, 557.19, 555.08, 584.28, 592.51, 643.08, 579.52, 649.95];
MeanIBI_SE = [700.12, 500.27, 622.75, 498.41, 512.44, 594.38, 538.74, 607.72, 652.87, 579.33, 552.28, 483.47];

% std_ibi (StdIBI)
StdIBI_SN = [112.11, 40.12, 81.30, 44.20, 71.91, 56.56, 53.01, 55.07, 58.07, 76.53, 158.45, 69.11];
StdIBI_SE = [120.35, 35.15, 63.60, 45.41, 66.86, 52.12, 52.89, 53.05, 49.33, 75.31, 152.09, 52.15];

% rmssd (RMSSD)
RMSSD_SN = [82.52, 33.00, 61.34, 31.90, 54.34, 43.14, 38.99, 41.52, 43.85, 57.65, 124.96, 53.07];
RMSSD_SE = [89.28, 28.53, 47.93, 27.27, 48.06, 38.30, 37.91, 39.81, 36.87, 55.77, 118.84, 38.35];

% fc_media (HRMean)
HRMean_SN = [86.45, 107.12, 114.97, 119.42, 108.63, 107.60, 108.09, 102.68, 101.27, 93.30, 103.53, 92.31];
HRMean_SE = [85.70, 119.93, 96.34, 120.39, 117.08, 100.94, 111.37, 98.73, 91.90, 103.57, 108.64, 124.10];

% cv (CV)
CV_SN = [16.15, 7.16, 15.58, 8.80, 13.02, 10.15, 9.55, 9.42, 9.80, 11.90, 27.34, 10.63];
CV_SE = [17.19, 7.03, 10.21, 9.11, 13.05, 8.77, 9.82, 8.73, 7.56, 13.00, 27.54, 10.79];


% --- Datos de M tricas Espectrales (Extra dos de la Tabla 2.3) ---
LF_SN = [395.9, 507.03, 1269, 6530.1, 744.36, 3874.6, 1567.3, 3242.6, 1720.9, 1462.5, 7473.8, 778.31];
LF_SE = [947.46, 529.55, 800.37, 2950.9, 1549.2, 1532.9, 465.67, 988.37, 1163.6, 2008, 6098.7, 482.51];

HF_SN = [310.45, 434.96, 2161.9, 21494, 2140, 8144.2, 2987.6, 6522, 1451.6, 3075.8, 7207.9, 1409.6];
HF_SE = [339.45, 460.44, 856.53, 5873.5, 2082.4, 2431.6, 275.27, 2425.2, 737.87, 3565.5, 13443, 336.21];

LFHF_Ratio_SN = [1.28, 1.17, 0.59, 0.30, 0.35, 0.48, 0.52, 0.50, 1.19, 0.48, 1.04, 0.55];
LFHF_Ratio_SE = [2.79, 1.15, 0.93, 0.50, 0.74, 0.63, 1.69, 0.41, 1.58, 0.56, 0.45, 1.44];


% --- Estructura de Datos para el Bucle de Ploteo ---
% Combine todos los datos en una estructura para facilitar la iteraci n
metrics = struct(...
    'Temporal', struct(...
```

```
        'NumPicos',     struct('SN', NumPicos_SN, 'SE', NumPicos_SE, 'Unit', 'Picos', 'Name', 'N mero de Picos (
            NumPicos)'), ...
        'MeanIBI',      struct('SN', MeanIBI_SN,  'SE', MeanIBI_SE,  'Unit', 'ms',    'Name', 'Intervalo Interlatido
            Medio (MeanIBI)'), ...
        'StdIBI',       struct('SN', StdIBI_SN,   'SE', StdIBI_SE,   'Unit', 'ms',    'Name', 'Desviaci n Est ndar de
             IBI (StdIBI)'), ...
        'RMSSD',        struct('SN', RMSSD_SN,    'SE', RMSSD_SE,    'Unit', 'ms',    'Name', 'RMSSD'), ...
        'HRMean',       struct('SN', HRMean_SN,   'SE', HRMean_SE,   'Unit', 'lpm',   'Name', 'Frecuencia Card aca
            Media (HRMean)'), ...
        'CV',           struct('SN', CV_SN,       'SE', CV_SE,       'Unit', '%',     'Name', 'Coeficiente de
            Variaci n (CV)') ...
    ), ...
    'Espectral', struct(...
        'LF_Power',     struct('SN', LF_SN,       'SE', LF_SE,       'Unit', 'ms^2',  'Name', 'Potencia LF (LF Power)')
            , ...
        'HF_Power',     struct('SN', HF_SN,       'SE', HF_SE,       'Unit', 'ms^2',  'Name', 'Potencia HF (HF Power)')
            , ...
        'LFHF_Ratio',   struct('SN', LFHF_Ratio_SN, 'SE', LFHF_Ratio_SE, 'Unit', '',      'Name', 'Ratio LF/HF') ...
    ) ...
);

% --- Generar Gr ficos para cada M trica ---
x_coords = [1, 2]; % 1 para SN, 2 para SE

% Colores para la leyenda
color_increase = [0.85 0.33 0.1]; % Rojo
color_decrease = [0 0.45 0.74]; % Azul
color_no_change = [0.5 0.5 0.5]; % Gris

% Lista de tipos de m tricas (Temporal, Espectral)
metric_types = fieldnames(metrics);

for type_idx = 1:length(metric_types)
    current_type = metric_types{type_idx};
    current_metrics = fieldnames(metrics.(current_type));

    for metric_idx = 1:length(current_metrics)
        metric_field = current_metrics{metric_idx};
        current_data = metrics.(current_type).(metric_field);

        figure;
        hold on;

        % Obtener los datos SN y SE
        sn_vals = current_data.SN;
        se_vals = current_data.SE;

        % Calcular las diferencias para determinar el color de la l nea
        diff_values = se_vals - sn_vals;

        % Iterar sobre cada sujeto para dibujar una l nea
        for j = 1:num_subjects
            % Determinar el color de la l nea
            if diff_values(j) > 0.01 % Umbral para aumento (se puede ajustar)
                line_color = color_increase;
            elseif diff_values(j) < -0.01 % Umbral para disminuci n (se puede ajustar)
                line_color = color_decrease;
            else
                line_color = color_no_change;
            end

            % Dibujar la l nea para el sujeto actual
```

```
            plot(x_coords, [sn_vals(j), se_vals(j)], 'Color', line_color, 'LineWidth', 1.5, 'Marker', 'o', '
                MarkerFaceColor', line_color, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'MarkerSize', 6);

            % Opcional: A adir etiquetas de texto para cada punto si el n mero de sujetos es peque o
            % if num_subjects < 20
            %     text(x_coords(1) - 0.05, sn_vals(j), subject_ids{j}, 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontSize', 8,
                'Color', line_color);
            %     text(x_coords(2) + 0.05, se_vals(j), subject_ids{j}, 'HorizontalAlignment', 'left', 'FontSize', 8, '
                Color', line_color);
            % end
        end

        % Configuraci n del gr fico
        xlim([0.5, 2.5]);
        xticks([1, 2]);
        xticklabels({'Sin Estr s (SN)', 'Con Estr s (SE)'});
        ylabel(sprintf('%s (%s)', current_data.Name, current_data.Unit));
        title(sprintf('Cambio Individual de %s: SN vs. SE', current_data.Name));
        grid on;
        set(gca, 'FontSize', 10);

        % A adir una leyenda personalizada para los colores
        h_inc = plot(NaN, NaN, 'Color', color_increase, 'LineWidth', 1.5); % Aumento
        h_dec = plot(NaN, NaN, 'Color', color_decrease, 'LineWidth', 1.5); % Disminuci n
        h_no_change = plot(NaN, NaN, 'Color', color_no_change, 'LineWidth', 1.5); % Sin cambio
        legend([h_inc, h_dec, h_no_change], 'Aumento (SN a SE)', 'Disminuci n (SN a SE)', 'Sin cambio significativo',
            'Location', 'best');

        hold off;

        % Guardar el gr fico
        filename = sprintf('%s_Individual_Changes.png', metric_field);
        saveas(gcf, fullfile(pwd, filename));
        fprintf('Gr fico guardado: %s\n', filename);
    end
end

fprintf('\nProceso completado. Se han generado los gr ficos para todas las m tricas.\n');
```

Listing I.1: Script para Generar Slope Plots

Apéndice J
Script MATLAB para métricas conductuales

```
% SEGUNDA PARTE DEL SCRIPT
clc; clear; close all;

% Solicitar el nombre del archivo CSV
archivo_trayectoria = input('Introduce el nombre del archivo CSV de trayectorias del escenario Neutro: ', 's');
if ~endsWith(archivo_trayectoria, '.csv')
    archivo_trayectoria = [archivo_trayectoria, '.csv'];
end

% Cargar datos
data = csvread(archivo_trayectoria);
x = data(:, 1);
y = data(:, 2);
z = data(:, 3);
time = data(:, 4);
objects_collected = data(:, 5);

% C lculos
distancias = sqrt(diff(x).^2 + diff(y).^2 + diff(z).^2);
E1Distanciatotal = sum(distancias);
E1Distanciatotal_laberinto = 629791.76;
E1PorcentajeR = (E1Distanciatotal / E1Distanciatotal_laberinto) * 100;
tiempo_total = time(end);
E1Timetotal = tiempo_total / 60;
E1Objetototal = objects_collected(1) - objects_collected(end);

% Crear carpeta si no existe
carpeta_salida = 'trayectorias_3D';
if ~exist(carpeta_salida, 'dir')
    mkdir(carpeta_salida);
end

% Crear figura
figure('Color', 'w');
plot3(x, y, z, '-', 'Color', [0.5 0.5 0.5], 'LineWidth', 2); hold on;
plot3(x(1), y(1), z(1), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % inicio
plot3(x(end), y(end), z(end), 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % fin

% Puntos de recolecci n
object_changes = find(diff(objects_collected) < 0);
for i = 1:length(object_changes)
    idx = object_changes(i) + 1;
    plot3(x(idx), y(idx), z(idx), 'b^', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2);
end

xlabel('Coordenada X');
ylabel('Coordenada Y');
zlabel('Coordenada Z');
title('Trayectoria 3D del Participante - Escenario Neutro');
grid on;
view(3);
```

```
legend({'Trayectoria', 'Inicio', 'Fin', 'Recolecci n'}, 'Location', 'best');
box on;

% Exportar figura
[~, nombre_base, ~] = fileparts(archivo_trayectoria);
nombre_salida = fullfile(carpeta_salida, [nombre_base, '_trayectoria3D.pdf']);
saveas(gcf, nombre_salida);

% Mostrar m tricas en consola
fprintf('\n--- Resultados del escenario Neutro ---\n');
fprintf('Tiempo total de juego: %.2f minutos\n', E1Timetotal);
fprintf('Cantidad de objetos recolectados: %d\n', E1Objetototal);
fprintf('Distancia total recorrida: %.2f unidades\n', E1Distanciatotal);
fprintf('Porcentaje del laberinto recorrido: %.2f%%\n', E1PorcentajeR);
fprintf('\nGr fica exportada a: %s\n', nombre_salida);
%% ESTRES


%% Solicitar el nombre del archivo CSV de trayectoria Escenario ESTRES
archivo_trayectoria = input('Introduce el nombre del archivo CSV de trayectorias del escenario ESTRES: ', 's');

% A adir la extensi n .csv si no est  presente
if ~endsWith(archivo_trayectoria, '.csv')
    archivo_trayectoria = [archivo_trayectoria, '.csv'];
end

% Cargar los datos desde un archivo CSV
data = csvread(archivo_trayectoria); % Cambia el nombre del archivo si es necesario

% Asignar las columnas a variables
x = data(:, 1); % Columna de coordenadas x
y = data(:, 2); % Columna de coordenadas y
z = data(:, 3); % Columna de coordenadas z
time = data(:, 4); % Columna de tiempo en segundos
objects_collected = data(:, 5); % Columna de objetos recolectados

% Calcular la distancia total recorrida
distancias = sqrt(diff(x).^2 + diff(y).^2 + diff(z).^2); % Distancia entre puntos consecutivos
E2DistanciaT = sum(distancias); % Sumar todas las distancias

% Definir la distancia total del laberinto (seg n tu c lculo anterior)
E2DistanciaT_laberinto = 629791.76; % Cambia este valor seg n lo que calculaste

% Calcular el porcentaje del laberinto recorrido por el usuario
E2PorcentajeT = (E2DistanciaT / E2DistanciaT_laberinto) * 100;

% Graficar la trayectoria en 3D
figure;
plot3(x, y, z, '-o');
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
title('Trayectoria del Actor en el Espacio 3D escenario Estres');
grid on;

% Marcar el inicio y el fin de la trayectoria
hold on;
plot3(x(1), y(1), z(1), 'go', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % Punto de inicio en verde
plot3(x(end), y(end), z(end), 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2); % Punto de fin en rojo

% Identificar los puntos donde se recolectan objetos
object_changes = find(diff(objects_collected) < 0); % Encuentra cambios en los objetos recolectados
```

```
% Marcar los puntos donde se recolectan objetos
for i = 1:length(object_changes)
    idx = object_changes(i) + 1; %  ndice  del punto donde se recolect  un objeto
    plot3(x(idx), y(idx), z(idx), 'ks', 'MarkerSize', 8, 'LineWidth', 2); % Punto de recolecci n en azul
end

% Tomar el tiempo total de juego de la  ltima  lectura
tiempo_total = time(end); %  ltimo  valor en milisegundos
E2tiempoT = tiempo_total / 60;

% Calcular la cantidad de objetos recolectados
E2ObjetosT = objects_collected(1) - objects_collected(end); % Diferencia entre el primer y  ltimo  valor

% Mostrar los resultados en consola
fprintf('Tiempo total de juego Escenario 2: %.2f minutos\n', E2tiempoT);
fprintf('Cantidad de objetos recolectados Escenario 2: %d\n', E2ObjetosT);
fprintf('Distancia total recorrida Escenario 2: %.2f unidades\n', E2DistanciaT);
fprintf('Porcentaje del laberinto recorrido por el usuario Escenario 2: %.2f%%\n', E2PorcentajeT);



% --- Guardar resultados en archivo Excel ---
filename = 'resultados_UE_IDARE.xlsx';

% Comprobar si el archivo ya existe
if exist(filename, 'file') == 2
    % Si el archivo ya existe, agregar los resultados en la siguiente fila disponible
    data = {ID, Genero, Edad, Licenciatura, Semestre, ExpRV, ConSus, CalSue, EstPer1, EstPer2, ComTa1, ComTa2, Comp,
         SatDese1, SatDese2, ...
             E1Objetototal, E1Distanciatotal, E1PorcentajeR, ...
            E2ObjetosT, E2DistanciaT, E2PorcentajeT, ...
            puntuacion_rasgo, puntuacion_estado1, puntuacion_estado2, ...
            puntuacion_T_rasgo, percentil_rasgo, interpretacion_rasgo, ...
            puntuacion_T_estado1, percentil_estado1, interpretacion_estado1, ...
            puntuacion_T_estado2, percentil_estado2, interpretacion_estado2};
    writetable(cell2table(data), filename, 'WriteMode', 'append', 'WriteVariableNames', false);
else
    % Si el archivo no existe, crear una nueva tabla y guardar los resultados
    headers = {'ID', 'G nero', 'Edad', 'Nivel Academico', 'Semestre', 'ExpRV', 'ConSus', 'CalSue', 'EstPer1', 'EstPer2
         ', 'ComTa1', 'ComTa2', 'Comp', 'SatDese1', 'SatDese2',...
              'E1ObTo', 'E1DiTo', 'E1PoTo', ...
              'E2ObTo', 'E2DiTo', 'E2PoTo', ...
    'AR', 'AE1', 'AE2', ...
              'ART', 'ARP', 'IAR', ...
              'AE1T', 'AE1P', 'IAE1', ...
              'AE2T', 'AE2P', 'IAE2'};
    data = {ID, Genero, Edad, Licenciatura, Semestre, ExpRV, ConSus, CalSue, EstPer1, EstPer2, ComTa1, ComTa2, Comp,
         SatDese1, SatDese2, ...
          E1Objetototal, E1Distanciatotal, E1PorcentajeR, ...
             E2ObjetosT, E2DistanciaT, E2PorcentajeT, ...
    puntuacion_rasgo, puntuacion_estado1, puntuacion_estado2, ...
            puntuacion_T_rasgo, percentil_rasgo, interpretacion_rasgo, ...
            puntuacion_T_estado1, percentil_estado1, interpretacion_estado1, ...
            puntuacion_T_estado2, percentil_estado2, interpretacion_estado2};
    T = cell2table([headers; data]);
    writetable(T, filename);
end
fprintf('Datos guardados correctamente en resultados_UE__IDARE.xlsx ');
```

Listing J.1: Script para métricas conductuales