

## Capítulo 5

---

# Análisis del comportamiento físico de tripulaciones y su impacto en la toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas

Óscar Fernando Arias Suárez\*

---

\* Magíster en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana. Correo electrónico: oscar.arias@fac.mil.co

## CÓMO CITAR

Arias Suárez, O. F. (2021). Análisis del comportamiento físico de tripulaciones y su impacto en la toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas. En R. Mezú (Ed.), *Gaviotas de Luces. Un aporte desde la investigación formativa a las ciencias militares aeronáuticas en Colombia* (pp. 181–239). Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana.

**Colección Ciencia y Poder Aéreo N.º 17**

**GAVIOTAS DE LUCES**

*Un aporte desde la investigación formativa a las ciencias militares aeronáuticas en Colombia*

### **CAPÍTULO 5.**

**Análisis del comportamiento físico de tripulaciones y su impacto en la toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas**

ISBN: 978-958-53696-0-3

E-ISBN: 978-958-53696-1-0

<https://doi.org/10.18667/9789585369603.05>

Bogotá, Colombia

Noviembre, 2021



## RESUMEN

---

La presente investigación aborda la posibilidad de mejorar los procesos de toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas, a partir del desarrollo de una herramienta tecnológica que permite la adquisición de señales biomédicas con el propósito analizarlas para establecer diversos comportamientos de las tripulaciones, mediante su interpretación desde el área de medicina aeroespacial, y así validar, a través de procesos de simulación, la relación entre la variabilidad de las señales biomédicas y la conducta y desempeño de las tripulaciones, detectando factores determinantes cuando se requiera tomar decisiones en operaciones aéreas en tiempo real, y, además, mejorando la seguridad operacional. En la actualidad, las señales biomédicas pueden ser empleadas para verificar el estado de salud y condición física de una persona; no obstante, y bajo el análisis e investigación realizados en este trabajo, también se concluye que pueden ser empleadas para mejorar procesos de toma de decisiones. Lo anterior, estableciendo comportamientos de las tripulaciones, las reacciones biomédicas de sus cuerpos y la interpretación de especialistas en el área de medicina de aviación, lo cual puede llegar a determinar factores cuando se requiera tomar decisiones en operaciones aéreas en tiempo real, coadyuvando al mejoramiento de la seguridad operacional.

## PALABRAS CLAVE

---

Biométrica; doctrina; mando y control; modelos; seguridad operacional; señales; toma de decisiones.

Es común que se empleen tecnologías de información y comunicaciones en la toma de decisiones tanto en ámbito militar como civil: análisis estadístico, *forecasting*, minería de datos, lógica difusa, diagramas de optimización, entre otros, son herramientas que permiten analizar todas las variables para determinar y calcular riesgos en ese proceso.

En ese sentido, Pilar (2011) asegura que “la formulación objetiva de un problema de toma de decisiones es complicada por las imprecisiones e incertidumbres inherentes, que crean un ambiente difuso para el tomador de decisiones” (p. 19). Por ello, esta investigación tiene como propósito establecer una herramienta que les permita a los comandantes que planean y programan operaciones aéreas reducir la incertidumbre y su riesgo inherente, basándose en el análisis del comportamiento de variables fisiológicas de sus tripulaciones.

Entre 1995 y el 2007 en Colombia se presentó un 72,72 % de fallas de buen criterio de las tripulaciones, un 18,18 % por circunstancias imprevistas superiores a su capacidad y un 9,09 % en la elección de un área inadecuada para despegue, aterrizaje o rodaje (Montoya & Roldan, 2007). Esto evidencia no solo la necesidad de optimizar la fabricación, mantenimiento o diseño de equipos tecnológicos en la aeronave, sino también, de analizar el factor humano para mejorar la toma de decisiones en las operaciones con una herramienta que, además, mejore la seguridad operacional.

Se requiere de un apoyo tecnológico con herramientas que monitoreen el estado físico y mental de las tripulaciones, y analicen su comportamiento en vuelo y en diferentes situaciones. De ese modo se crearán perfiles que identifiquen el tipo de tripulaciones requeridas para las operaciones. Este sistema proyectaría la integración de la medicina aeroespacial en los Centros de Comando y Control, así, no solo se evaluarían las variables de terreno y enemigo, sino también se observaría el comportamiento de las tripulaciones propias para generar medidas de apoyo.

Esta investigación plantea el desarrollo de un sistema de transmisión con redes militares de radiofrecuencia, compuestas por equipos de comunicaciones que operan en la banda del espectro electromagnético de VHF/FM, precisamente por la posibilidad con que cuenta la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) de poseer una red de estaciones en tierra y en las aeronaves, que por la altura y ubicación con la que operan garantizan la línea de vista (*Line of sight*, LOS), propia de las transmisiones en esta banda del espectro radioeléctrico —con el cual es posible transmitir señales biomédicas o datos

fisiológicos de tripulaciones o pacientes de evacuaciones aeromédicas a distancia— para su análisis y monitoreo, permitiendo la creación de perfiles que indiquen al comandante el diseño de operaciones aéreas y la reducción del riesgo e incertidumbre debidos al factor humano.

El sistema propuesto tiene un componente de *hardware* (dispositivos electrónicos y sensores) que facilita la obtención y transmisión de señales biomédicas extraídas del cuerpo de cualquier individuo a evaluar. Un componente de transmisión y recepción de las señales obtenidas con los radios militares de las aeronaves de la FAC —que son comunes con otras Fuerzas Armadas (FF. AA.) en Colombia— y que aprovecha la banda de VHF/FM del espectro de radiofrecuencia. Así mismo, un bloque de procesamiento de estas señales, mediante una interfaz de usuario adecuada, hace posible su visualización y toma de decisiones.

## Brecha en el proceso de toma de decisiones

Para cualquier comandante es indispensable tener herramientas de toma de decisiones; sin embargo, son muy pocas las que se han desarrollado con el propósito de apoyar la planeación y ejecución de operaciones aéreas. La información se obtiene de la doctrina y de la estrategia, del proceso de planeamiento y ejecución que finaliza en planes de guerra, campaña y operaciones. A estos, se suma información de inteligencia, alistamiento y estado de aeronaves, tipo de armamento, puntos de tanqueo y posibles pistas para recuperación de aeronaves y tripulaciones.

Aun así, son escasos los análisis del comportamiento de las tripulaciones en operaciones aéreas, los cuales, en su mayoría, se efectúan posterior a su desarrollo cuando se han presentado novedades o en la revisión después de la acción (RDA). De igual forma, los estudios presentados se enfocan en mejorar la seguridad operacional, mas no en su desempeño en la misión. Revisando la doctrina fundamental de la FAC, en el Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial (MADBA, 2013), este no proyecta modelos de toma de decisiones.

Los procesos militares de toma de decisiones (PMTD) para el diseño, seguimiento y ejecución de las operaciones no tienen en cuenta el desempeño o respuesta física de los hombres, sean de tierra, mar o aire, que cumplen las misiones. Esta información permitiría catalogar y proyectar capacidades de manera precisa frente al tipo de misión a cumplir.

El Manual de Estado Mayor y Mando Conjunto (MEMMC) de las FF. MM. propone una secuencia de acciones en el proceso militar de toma de decisiones, pero no habla del empleo de herramientas que soporten esa toma en la doctrina:

**Tabla 1.** Proceso militar de toma de decisiones

Primer paso	Recibo de la misión
Segundo paso	Análisis de la misión
Tercer paso	Desarrollo de los cursos de la acción
Cuarto paso	Análisis de los cursos de la acción
Quinto paso	Comparación de los cursos de la acción
Sexto paso	Aprobación de los cursos de acción
Séptimo paso	Elaboración de planes y órdenes

Fuente: *Fuerzas Militares de Colombia (2004)*.

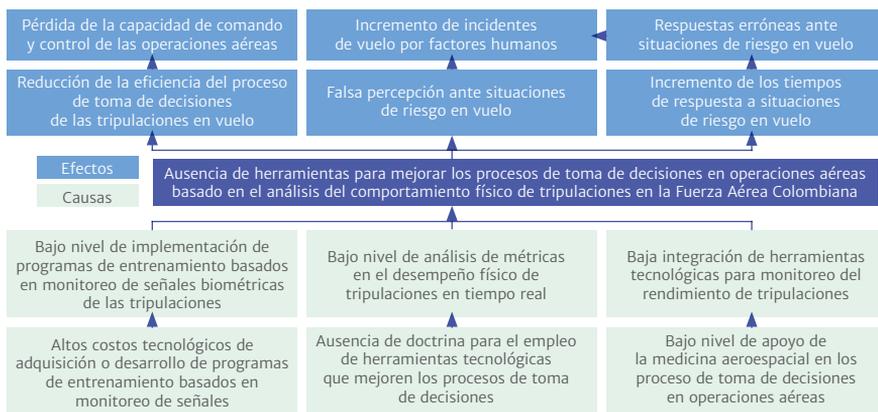
Además, hay una baja integración de herramientas tecnológicas que faciliten el análisis o la obtención de información respecto a los individuos. Entre estas herramientas se encuentran sistemas de obtención, transmisión y análisis de señales fisiológicas, con lo cual se pueden analizar y monitorear desempeños y comportamientos.

Aunque sistemáticamente se realizan controles médicos y físicos a las tripulaciones, pocas veces se integran a desarrollos que establezcan el desempeño de las tripulaciones en tiempo real y evita que se usen para mejorar su rendimiento y nivel de seguridad y acierto.

El alto costo o la dificultad de adquisición de tecnología —que permita desarrollar sistemas de monitoreo de tripulaciones y que apoye el proceso de toma de decisiones, entrenamiento, selección de pilotos, tripulantes y el seguimiento a programas de seguridad en vuelo— también entorpece el proceso.

Dichas causas han generado varios efectos: la reducción de la eficiencia en el proceso de toma de decisiones; la falta de percepción ante situaciones de riesgo en vuelo, y, por ello, elección de respuestas erróneas; el incremento en los tiempos de respuesta a situaciones de riesgo, entre otros.

Dicho lo anterior, se plantea la pregunta de investigación: ¿Cómo mejorar el proceso de toma de decisiones para la ejecución de operaciones aéreas basado en el análisis del comportamiento físico de tripulaciones de la FAC?



**Figura 1.** Árbol de problemas

Fuente: *elaboración propia.*

## Antecedentes

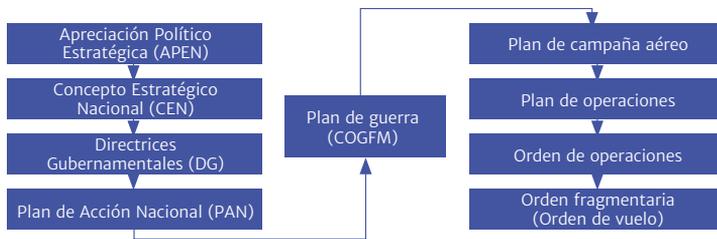
Uno de los referentes doctrinarios de la FAC es el MADBA, el cual contiene los fundamentos para el desarrollo de la estrategia del poder aéreo y espacial en Colombia, en cabeza de la FAC:

La Nación tendrá para su defensa unas Fuerzas Militares permanentes constituidas por el Ejército, la Armada y la Fuerza Aérea. Las Fuerzas Militares tendrán como finalidad primordial la defensa de la soberanía, la independencia, la integridad del territorio nacional y del orden constitucional (Constitución Política, 1991, art. 217).

En el Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial de la FAC se evidencia el proceso de planeamiento y ejecución para las FF. MM., que incluye el planeamiento proyectado para la FAC, que va desde el nivel estratégico (apreciación político estratégica de la Nación —APEN—; formulación del concepto estratégico Nación —CEN—; emisión de directrices gubernamentales —DG— y plan de acción nacional —PAN—) hasta las órdenes fragmentarias de nivel táctico (Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial, 2013). A partir de allí se genera el plan de guerra que determinará acciones, directrices, instrucciones y demás órdenes para emplear el poder militar a fin de preservar, proteger o alcanzar los intereses nacionales (FAC, 2013). De acuerdo con lo establecido en el Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial de la FAC, del plan de guerra se deriva el plan de campaña, definido como:

[un] conjunto de prescripciones y normas emitidas por el comandante de una Fuerza Institucional, comandante Funcional, o el comandante del Teatro de Operaciones para el uso apropiado de los recursos de la respectiva Fuerza o teatro, con el propósito de alcanzar los objetivos estratégicos principales establecidos en el Plan de Guerra. En este nivel se encuentra el Plan de Campaña Aéreo el cual puede ser elaborado por el Comando de la Fuerza Aérea o por el Comando Funcional Aéreo (MADBA, 2013, p. 23).

El planeamiento (figura 2) establece los objetivos para una acción militar. Es ahí cuando la proyección de herramientas para la toma de decisiones le facilita al comandante su accionar, al minimizar el riesgo y disminuir la incertidumbre de las múltiples variables, pero no menciona el proceso de toma de decisiones que apoya la planeación de las operaciones aéreas a nivel táctico.



**Figura 2.** Secuencia del proceso de planeamiento

Fuente: MADBA (2013, p. 30).

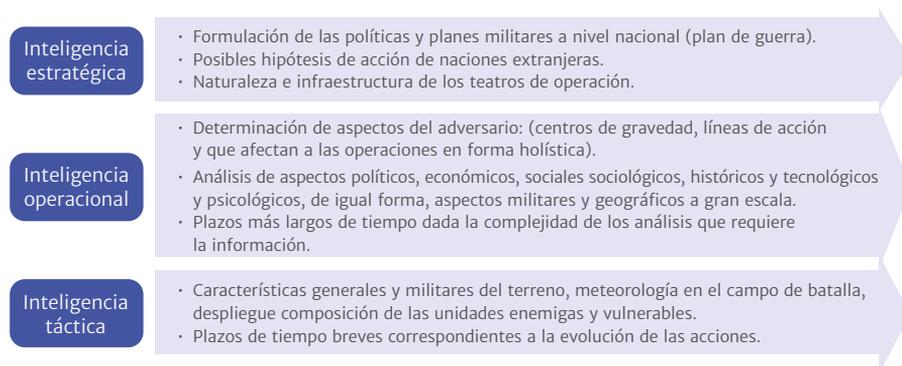
Aunque no hay investigaciones para mejorar este tema en la FAC, sí existen antecedentes para aplicar en la fase de análisis y descripción del proceso de toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas. Es el caso de los trabajos desarrollados que emplearon aplicaciones TIC, con el fin de mejorar el proceso de toma de decisiones, por ejemplo: “Diseño de una aplicación digital para la virtualización del primer paso del proceso militar para la toma de decisiones en una unidad táctica del Ejército de Colombia” de Gallardo (2015) y “Modelo para la toma de decisiones militares. Una nueva opción para el ámbito gerencial” de Forero (2012). También se incluye el análisis y revisión de modelos que se emplean en la toma de decisiones en entornos civiles, como lo expuesto por Lozano y Muñoz (2012) en “Algunos modelos de toma de decisiones” y “Herramientas para la gestión y toma de decisiones” de Jorge Pilar (2012).

En estos procesos se encuentra el PMTD usado por el Ejército Nacional, que ha generado doctrina en este ámbito. El Manual Básico de Liderazgo plantea el proceso de toma de decisiones desde la definición y comprensión de quien debe tomarlas —es decir, el ser humano—, desde una dimensión biológica, social y psicológica, con un componente espiritual, dimensiones en las que se encuentran las emociones. Goleman (1997) afirma que además del intelecto, las emociones lo guían cuando se trata de enfrentar momentos difíciles y tareas demasiado importantes. De modo que:

Cuando se trata de dar forma a nuestras decisiones, a nuestras acciones, los sentimientos cuentan tanto como el pensamiento y a menudo más [...] es decir, la emoción es tan importante para el pensamiento eficaz, tanto en la toma de decisiones acertadas como en el simple hecho de permitirnos pensar con claridad (FF. MM., 2014, p.15).

Entonces, ¿qué variables se requieren o son las adecuadas para tomar decisiones asertivas en el desarrollo de una operación aérea? Es necesario basarse en la información de inteligencia militar, entendida en los tres niveles: estratégico, operacional y táctico. Esta información es la base del diseño de las operaciones militares, por esa razón:

La inteligencia [es] una actividad continua en el tiempo, que a los niveles de decisión más elevados ha de ejercerse de forma activa desde la normalidad de la paz ya que, además de adelantarse al futuro, ha de evitar la sorpresa estratégica y alertar en tiempo oportuno a los sistemas de reacción (Asta, 2000, p. 453).



**Figura 3.** Niveles de la inteligencia militar

Fuente: Asta (2000, pp. 453-456).

Otros estudios, como el de Morillo (2008), han establecido el seguimiento de las señales fisiológicas como medio de revisión del comportamiento humano, incluso en enfermedades como el trastorno del sueño, y en la inducción al error que, en aviación, ha desembocado en accidentes aéreos. Es decir, las señales biomédicas pueden ser usadas para analizar eventos externos que inducen a respuestas fisiológicas en el ser humano.

Con los avances tecnológicos sobre desarrollos de vigilancia, respuestas oportunas a condiciones de salud, respuestas del ser humano a situaciones de conflicto o laborales diarias, la investigación también ha tenido puesta su mirada en la ayuda y fortalecimiento de modelos y herramientas que permitan pronosticar el comportamiento humano. Esta predicción permite conocer el desempeño de tripulaciones por parte de los comandantes de misiones de vuelo, al establecer un panorama de la misión con más variables que reduzcan la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones.

En la Universidad de Lund, Suecia, se desarrolló una norma de comunicación destinada al monitoreo y vigilancia de implantes médicos remotos, en los que se utiliza la banda de frecuencia entre 402 MHz y 405 MHz, que permite el desarrollo y control del sistema a distancias más lejanas de las que se venían utilizando, ofrece una velocidad de transmisión de datos de 600 Kbps y una tasa de error de bytes del 2% en enlace descendente, y 1% en enlace ascendente, en un enlace de estación base e implante remoto (Johansson, 2004).

Otra investigación se centra en la transmisión de datos de implantes mediante la técnica de modulación FSK —modulación por desplazamiento de frecuencia—. Esta ofrece una velocidad de transmisión de 2.083 Mbps, con tasas de error de bytes en la recepción del 0% y configurado en el intervalo de frecuencias de 4,17 MHz y 6,25 MHz (Jung *et al.*, 2007).

## La teoría

Según Clark (2008), un problema está bien estructurado cuando se dispone de toda la información y se establece una respuesta verificable. De lo contrario, se clasificarían como lo hace Schön (1995): desordenados y difíciles.

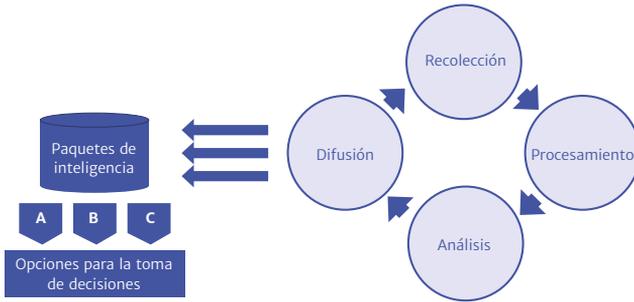
De la misma manera, son necesarios conceptos como el de mando tipo misión, que evolucionó por la necesidad de tomar decisiones tácticas en forma rápida, por lo complejo y lento de las comunicaciones desde el

Estado Mayor. Esta táctica prusiana alemana, conocida como *Auftragstaktik*, les daba iniciativa a comandantes subordinados (Carpenter, 2017). El concepto es aplicado en la FAC como “mando centralizado, ejecución descentralizada”. El comandante subordinado requiere herramientas para el proceso de toma de decisiones para la misión programada, sin contacto directo con su Estado Mayor. A lo que se suma la facilidad de establecer nodos de comunicaciones que impulsan a analizar los Centros de Operaciones Aéreas (AOC).

La planificación en los ejércitos abarca múltiples facetas; desde la determinación de su entidad, composición y misiones, hasta el establecimiento de posibles escenarios de intervención. Han de tenerse en cuenta datos conocidos y factores falsos referidos, especialmente a los riesgos o amenazas que presumiblemente tendrán que afrontar o evitar (Asta, 2000).

## Variables en el proceso de toma de decisiones

La información que suministra el ciclo de inteligencia también se cuenta entre los datos requeridos para el planeamiento de misiones (figura 4).

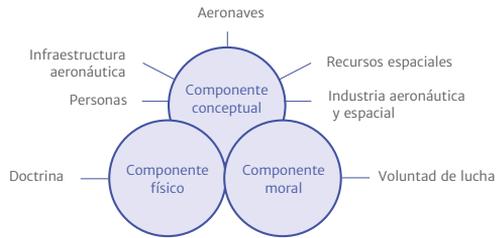


**Figura 4.** Ciclos de inteligencia

Fuente: *elaboración propia*.

Otra de las variables que impacta el proceso de toma de decisiones es la doctrina:

Cuando la doctrina no se basa en experiencias y no ofrece un punto de partida o nunca se ha puesto en práctica, resulta ser ineficiente para la toma de decisiones y, por consiguiente, para el cumplimiento de los objetivos (FAC, 2013, p. 46).



**Figura 5.** Componentes del poder aéreo y espacial

Fuente: FAC (2013, p. 61).

Cuando se analizan las variables en el proceso de toma de decisiones por parte de los comandantes, se reduce la incertidumbre y se minimiza el riesgo, lo cual se ve reflejado justamente en uno de los principios del poder aéreo: el balance, entendido como “la evaluación de los resultados esperados frente a los riesgos proyectados implica poseer información apropiada y a tiempo, con el fin de producir una decisión efectiva” (FAC, 2013, p. 64).

## Herramientas para la toma de decisiones

A continuación, se presentan algunas herramientas para la toma de decisiones tenidas en cuenta para esta investigación:

**Ábaco de Régnier:** concebido por el doctor François Régnier se usa para interrogar a los expertos y tratar sus respuestas en tiempo real o virtual, a partir de una escala de colores (Vásquez *et al.*, 2010). Según Godet (2000) y Mojica (2005), este reduce la incertidumbre, confronta el punto de vista de un grupo con el de otros y, a la vez, toma conciencia de la mayor o menor variedad de opiniones. Se guía por los tres colores del semáforo, más el verde y el rojo claro. El blanco permite el voto en blanco, y el negro, la abstención (Vásquez *et al.*, 2010).

	Experto 1	Experto 2	Experto 3
Absolutamente indispensable			
Indispensable			
Importante			
Poco importante			
Sin importancia			
Sin respuesta			
01. Meteorología			
02. Geografía, análisis del terreno			
03. Informes de inteligencia			
04. Doctrina			
05. Comportamiento de tripulaciones			

**Figura 6.** Ábaco de Régnier

Fuente: elaboración propia.

*Matriz de priorización:* permite crear criterios de evaluación jerarquizando los planes de acción con los que puede contar el comandante para establecer la mejor línea de acción, mediante el desglose de una serie de variables y el empleo de una base en escalas cualitativas apreciadas por paneles de expertos o grupos de trabajo. Combina elementos cualitativos con calificaciones subjetivas, que pueden ponderarse y calificarse para obtener votaciones y consensos. Sirve para cuantificar juicios, valores y puntos de vista de un grupo humano (Popper, 2008), tal como lo define Vásquez *et al.* (2010).

*Matriz de decisiones:* es la representación gráfica que facilita a un equipo o individuo identificar y verificar la proporción de la fuerza de las relaciones entre conjuntos de información (Alfaro, 2018). Es muy empleado en la toma de decisiones de proyectos para la estimación de soluciones alternativas y desarrollo de posibles soluciones. Para su elaboración se deben conocer estrategias, estados de la naturaleza, probabilidades y resultados o desenlaces. Una vez establecida la matriz, se aplican los siguientes criterios para tomar decisiones en situaciones de incertidumbre:

- Criterio optimista: se elige la estrategia que arroje el mejor resultado.
- Criterio pesimista o de Wald: se realiza la selección de la estrategia que presente el valor más grande entre los más pequeños existentes de todas las posibilidades planteadas, o el valor mínimo entre los máximos.
- Criterio de Laplace: cuando se desconocen las probabilidades de cada estado en la naturaleza, se le establece a cada uno la misma posibilidad.
- Criterio de Hurwicz: solo importan los valores más grandes, así como los más pequeños de cada estrategia, para lo cual se suma el mejor resultado de cada una ponderado el coeficiente de optimismo ( $\alpha$ ), con el más malo de los resultados de cada una realizando la ponderación con el coeficiente de pesimismo ( $1 - \alpha$ ). Cabe mencionar que, para este criterio, el coeficiente de optimismo es intrínseco a la persona que va a tomar la decisión.
- Criterio de Savage: es el más común de ser empleado por quienes temen equivocarse al tomar decisiones, por tanto, se genera una matriz nueva de desenlaces en términos de coste de oportunidad, para finalmente presentar lo que se deja de ganar por escoger una estrategia equivocada (Alfaro, 2018).

## Modelos propuestos para la toma de decisiones

Gámez (2007) plantea que “dado que la toma individual de decisiones no es un proceso simple, y que se encuentra condicionado por metas, características psicológicas y marcos de referencia de quien toma las decisiones” (p. 104). El apoyo de tecnologías de la información mejora el proceso porque:

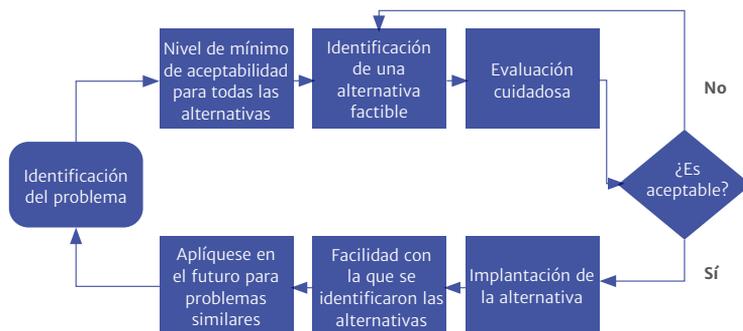
Los sistemas deben ser esbozados de forma tal que ofrezcan facilidades al momento de realizar la toma de decisiones, ofreciendo diferentes opciones para manejar y procesar la información, evaluarla, y presentarla de tal forma que apoye las características personales, permitiendo realizar variaciones en la medida en que los individuos aprenden y establecen sus prioridades. Los diseñadores de sistemas de información deben encontrar la forma de construir sistemas de información que apoyen la toma de decisiones en la institución (Gámez, 2007, pp. 104-113).

Para analizar los modelos de toma de decisiones, Gámez los agrupa en individuales —cuando se abordan desde el ser humano como eje central del proceso— y en institucionales —como colectivos o grupos establecidos dentro de políticas y normas— tales como las FF. MM.

En los modelos individuales presenta el racional —o modelo satisfactor—, que considera a quien toma decisiones como un sujeto enfocado y preparado para administrar. Se toma la primera alternativa que satisfaga las necesidades del problema planteado.

El modelo clásico de elección racional aplicado en economía en los años setenta sostenía que la persona elige la alternativa evaluando la probabilidad de cada resultado posible, determinando la utilidad de cada una y combinando estas dos evaluaciones. La opción elegida era aquella que ofrece la combinación óptima de probabilidad y utilidad (Kohan & Macbeth, 2008). Sin embargo, este modelo posee inconvenientes que no reducen la incertidumbre como se quisiera. Uno de ellos es que “las evaluaciones de probabilidad y riesgos de las personas no suelen estar de acuerdo con las leyes de la probabilidad” (Kohan & Macbeth, 2008, pp. 68-73). Trabajos como el de Paul Meehl (1954) permitieron dilucidar esto, teniendo en cuenta que comparó la predicción diagnóstica con métodos clínicos y estadísticos o actuariales, demostrando que el método estadístico obtenía mejores resultados (Meehl, 2015).

Por otra parte, Simon (1957) señaló que un total de racionalidad suponía que el modelo de elección racional era poco realista para el juicio humano. Propuso un criterio más limitado para la realidad del accionar, al cual llamó “racionalidad limitada”, el cual reconocía en el proceso mental humano limitaciones inherentes; las personas eligen y razonan racionalmente, pero solamente dentro de las restricciones impuestas por su búsqueda limitada y sus capacidades de cálculo.



**Figura 7.** Modelo de racionalidad limitada

Fuente: Gámez (2007).

De igual forma, el modelo de satisfacción expone una realidad finita, reducida y limitada dado que:

Afirma que las personas buscan satisfacción, es decir, eligen la primera opción disponible y que se encuentre orientada hacia su propósito u objetivo prioritario. Por tanto, considera que las personas evitan alternativas nuevas e inciertas, y en vez de esto, confían en reglas ciertas y probadas (Gámez, 2007, pp. 114-116).

Por último, dentro de estos modelos también es posible citar el psicológico, aquel en el que todos los individuos que realizan un proceso de toma de decisiones optan por lograr fines u objetivos, pero se diferencian en cuanto a la forma de recopilación y evaluación de la información requerida: “Los pensadores sistemáticos imponen un orden en percepción y evaluación. Los intuitivos usan modelos y perspectivas múltiples de evaluar información” (Gámez, 2007, p. 110).

Otra posibilidad de clasificación es aquella que se centra en las organizaciones, para lo cual se exponen los siguientes modelos:

- Modelo burocrático: parte del hecho que para una estructura u organización los problemas deben ser muy complejos para ser enfrentados como un todo, por esta razón, los divide y distribuye a diferentes áreas y grupos especializados. Cada área tiene procesos y procedimientos estándar para solucionar el problema (Gámez, 2007). En cierta forma, este modelo hace parte del proceso de toma de decisiones militares, en los cuales se recurre a los Procedimientos de Operación Estándar (SOP).
- Modelo político: en este se plantea que las decisiones son consecuencia de la relación dinámica de negociación y competición entre los colectivos de interés dentro de la institución y sus dirigentes. Al final de esta relación se puede observar que las acciones no son necesariamente racionales y que los resultados de esas acciones no son los que precisamente un individuo busca (Gámez, 2007).
- Modelo del bote de basura: las organizaciones son transitorias dado que tienden a desaparecer bajo los cambios de las condiciones del entorno, debido a la dificultad de adaptarse. La toma de decisiones se da dentro de un flujo de información con situaciones cambiantes, problemas y soluciones en tiempos cortos, asociados en forma aleatoria. Por ello se debe tener un grado de flexibilidad y proporcionar diversas opciones para el manejo de información y su evaluación; dar apoyo con una gran variedad de estilos, habilidades y conocimientos. Cambiar a medida que las personas aprenden y aclaran sus valores y contar con modelos múltiples analíticos e intuitivos para seguir alternativas y consecuencias (Gámez, 2007).

A la vez, se presentan estudios de modelos aplicados a la toma de decisiones, como el del mayor Williams (2011), integrante del Ejército de los Estados Unidos, quien expone que los procesos heurísticos en la toma de decisiones llevan a sesgos que afectan el resultado.

Si ahora se considera brevemente la naturaleza subjetiva de la guerra —los medios por los cuales la guerra debe ser librada—, más que nunca parecerá como un juego de apuesta. Desde el principio hay una interacción de posibilidades, probabilidades, buena y mala suerte que preparan el camino (Clausewitz, 1976). Por tanto, en todo el amplio espectro de relaciones y acciones humanas, la guerra es similar y tiene un componente parecido a un juego de cartas.

Este caos hace necesario que la organización o estructura de proyecciones supuestas en sus constructos mentales sean cuestionadas por parte de quienes tendrán a cargo la toma de decisiones, teniendo en cuenta que el proceso de regla empírica que se aplica en el proceso militar de toma de decisiones incrementa el conocimiento, pero, a su vez, presenta divergencias durante el proceso.

## Herramientas de tecnología como soporte de la toma de decisiones

Los desarrollos deben estar enfocados a entornos de simulación que aprovechen las herramientas tecnológicas de la FAC. Por ello se empleó como *software* para la adquisición de datos de señales fisiológicas un desarrollo en Labview<sup>®</sup>, una plataforma de programación y desarrollo para esbozar sistemas que contienen *hardware* y *software* para pruebas, control y diseño en ambientes simulados, reales o embebidos, basado en un entorno de programación visual. Ofrece un enfoque de programación gráfica que ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación. Esa visualización hace que sea más fácil integrar *hardware* de medidas de cualquier proveedor, representar una lógica compleja en el diagrama, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar interfaces de usuario personalizadas (National Instruments, 2019).

Los programas desarrollados con Labview<sup>®</sup> son Instrumentos Virtuales (VIS) y provienen del control de instrumentos, aunque hoy en día se han expandido al control de todo tipo de electrónica y a su programación embebida, comunicaciones, matemáticas, etc. Un lema entre sus objetivos es el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no solo en ámbitos de pruebas, control y diseño) y el permitir la entrada a la informática de profesionales en cualquier otro campo. Se combina con todo tipo de *software* y *hardware*, tanto del propio fabricante, como de otros fabricantes (RICE University, 2019).

## Los conceptos

### El factor humano como variable en la toma de decisiones

La presentación y diseño de una herramienta que mejore la toma de decisiones en las operaciones aéreas debe incluir, además de psicología, la

medicina de aviación y la ingeniería electrónica, dado que se requiere tomar señales fisiológicas y tratarlas como eléctricas, que puedan ser transmitidas, monitoreadas e interpretadas, bajo parámetros de comportamiento.

Tal y como lo señala la doctora Lina Sánchez (2010) en su investigación *El estudio del factor humano en accidentes de aviación*: “Muchos pilotos que cumplen todos los parámetros de aptitud psicofísica establecidos se accidentan por factor humano” (p. 143). Se debe superar la forma tradicional de ejercer la medicina y la psicología, sustentada en la clínica, la evaluación psicofísica y la interpretación de pruebas y exámenes de laboratorio basada en modelos adquiridos durante la formación profesional acorde con exigencias del sistema de salud (Sánchez, 2010).

Es importante reforzar los modelos de la formación profesional de médicos y psicólogos de aviación con herramientas tecnológicas que beneficien la evaluación de resultados y el análisis del comportamiento de tripulaciones, con el fin de mejorar su calidad de vida y aportar al desarrollo doctrinario en el proceso de toma de decisiones.

El aspecto cultural también debe tenerse en cuenta. Las estadísticas de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) identifican que la mayoría de los accidentes de aviación se presentan en el Caribe, Latinoamérica, Asia y África, en parte, por la falta de modelos de adaptación en cuanto a normas, técnicas y procedimientos de otras regiones. Helmreich (1994), citado en Sánchez (2010), menciona que muchos programas de entrenamiento para tripulaciones son importados y están desconectados de la cultura, lo que influye en la manera de actuar ante situaciones de crisis que afectan la capacidad para trabajar en equipo y la actitud hacia la automatización y la comunicación (Sánchez, 2010).

Por su parte, Maurino (1994), citado en Sánchez (2010), enfatiza en la necesidad de establecer el entrenamiento aeronáutico en el contexto donde la actividad se desarrolle, puesto que el adecuado manejo del riesgo varía en las regiones según percepción social, religiosa, moral, ética y valores sociales (Sánchez, 2010).

Así mismo, el grupo de ingeniería clínica de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina desarrolló un sistema de monitoreo de parámetros fisiológicos en forma remota. Es un sistema integral de telemedicina en la provincia de Córdoba, que tiene como finalidad el telediagnóstico, el monitoreo de pacientes alejados de los centros de atención, la interconsulta y

una base de datos con los parámetros de cada individuo para posteriores estudios (Juri, 2005).

Los parámetros son el electrocardiograma (ECG), la presión arterial y la oximetría de pulso, los cuales son adquiridos por una unidad portátil con canales de comunicación serie RS-232 y USB, que facilitan su conexión a una PC. Mediante un *software* de visualización se muestran los datos para su posterior transmisión vía TCP/IP, a través de la línea telefónica. En un futuro se intentará migrar el canal de comunicación a una plataforma inalámbrica, como pueden ser GPRS, wifi o Bluetooth (Juri, 2005). Este antecedente permite que se evalúe la adquisición de las señales fisiológicas y que se envíen en tiempo real para ser analizadas por personal capacitado y tomar decisiones basados en las conductas de las tripulaciones y sus respuestas funcionales.

Otro de los antecedentes en el estudio del error y la incidencia del factor humano en el mismo, lo realizan Wiegmann y Shapell (2003) en su libro *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis. The Human Factors Analysis and Classification System*, realiza una completa revisión de las perspectivas para el estudio del error humano. Esta constituye un muy buen marco de referencia respecto a los aportes generados al conocimiento de este fenómeno a través de la historia y permite aclarar el campo de acción de los profesionales de la salud y otras disciplinas (Sánchez, 2010).

Otro análisis del comportamiento del factor humano en aviación es el de Gary (2002), quien habla de la perspectiva conductual como el desempeño relacionado a la motivación y las experiencias vividas, en el que influyen los reconocimientos, premios o castigos que se adoptan con frecuencia como prácticas de seguridad dentro de las organizaciones. Una perspectiva de gran desarrollo y reconocimiento es la cognitiva, ampliamente utilizada en procesos de selección y entrenamiento que atribuye el error al piloto de acuerdo con esquemas mentales, percepción, atención, memoria, procesamiento de información y toma de decisiones (Strater, 2005).

El estudio del proceso de toma de decisiones desde esta perspectiva se complementa con desarrollos que integran el análisis de la mayor cantidad de información y pueden traducirse en patrones que descifren cómo es este proceso en el ser humano, sobre todo, en situaciones nuevas o de incertidumbre. Tales desarrollos se enfocan en el análisis del cambio de variables fisiológicas del ser humano, incluso en situaciones de temor o alegría.

En ese sentido, Sánchez (2010) identifica otra perspectiva que desarrolla el concepto de Crew Resource Management (CRM). Este manejo de recursos de cabina establece que en gran parte los errores de toma de decisiones o fallas inducidas por el factor humano se presentan en la relación establecida por piloto y tripulación. Esta teoría afirma que los errores y fallas son cimentados socialmente, y establece que en el aspecto psicosocial se ven las operaciones de vuelo como actividades sociales que encierran relaciones e interactividades en un amplio espectro de individuos.

La perspectiva predominante es la aeromédica. Un proceso que radica en la estimación y cuantificación de la condición física y mental para actividades de vuelo, con patrones o modelos aeromédicos establecidos en la normatividad internacional y nacional, que mejoran los procesos de prevención de accidentes debido al factor humano, sin embargo, tiene un alcance limitado (Orford & Silverman, 2008).

Al contar con las señales fisiológicas de las tripulaciones en tiempo real, se evalúa su comportamiento proactivo y no reactivo. Se evalúan cuando se presentan los factores que alteran las condiciones normales de las tripulaciones en desarrollo y ejecución de operaciones aéreas, y no, en evaluaciones posteriores, cuando las causas de los errores han desaparecido.

La biometría y el transporte de estas señales en tiempo real se han convertido en grandes aliadas de la medicina de aviación y psicología:

La telemetría es una poderosa herramienta para medir, monitorear y controlar remotamente variables en tiempo real. Esta tecnología facilita el transporte de datos adquiridos por un dispositivo a una estación distante para ser desplegados, guardados y analizados por personal especializado (Dodge, 2012, p. 68).

Las variables clínicas que generalmente se monitorean son frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria, temperatura y presión arterial. Estas mediciones básicas determinan el funcionamiento de los órganos vitales del cuerpo y detectan problemas de salud (López *et al.*, 2015).

En el análisis del factor humano se incluye el PMDT por ser un modelo lineal fundado en actividades que forman cursos de acción específicos, muy útil para analizar los problemas de estabilidad, que se basan en supuestos de la racionalidad técnica (Williams, 2011). Este proceso induce a errores cuando se toma como verdad absoluta, como lo expresa Sun Tzu:

Todas las guerras se basan en el engaño. El enemigo debe ignorar en dónde me propongo librar la batalla, porque si lo ignora, deberá estar preparado en muchos lugares; y cuando se prepare en muchos sitios, me permitirá combatir a unos cuantos hombres en cualquiera de ellos (2003, p. 54).

Por eso debe incorporar otras herramientas que avalen muchos más criterios para tomar decisiones sin sesgos. Así se evidenció en escenarios de confrontación reales, como el de Irak, donde la lucha contra insurgente les sugirió a los Estados Unidos una planeación de operaciones diferente a las preconcebidas, ya que, en principio, les dificultó su accionar y consolidación del territorio. Otro caso es el conflicto interno armado en Colombia. El cambio en el pensamiento militar en la planeación de operaciones, supuso hacerlo de forma conjunta y coordinada, y la proyección y aplicación del uso del poder aéreo en la planeación de operaciones aéreas a objetivos estratégicos, sumado a la capacitación, entrenamiento, uso de las aeronaves y su armamento, cambió la respuesta a incursiones insurgentes.

El análisis de la heurística y de los sesgos, como lo llama Williams (2011), inició debido a la insatisfacción con las finanzas clásicas para explicar la toma de decisiones humanas. El autor cita a Kahneman y Tversky, quienes desarrollaron los principios de una disciplina ampliamente conocida como las finanzas conductuales. En ella establecen que el ser humano utiliza tres métodos heurísticos en la toma de decisiones bajo incertidumbre, para medir probabilidades y predecir valores, y que estos métodos, si bien son legítimos, conducen a errores sistemáticos (Bonatti, 2007). Sus reglas conductuales son:

---

**Tabla 2.** Reglas de las finanzas conductuales

---

Representatividad: es utilizada cuando las personas deben estimar la probabilidad de un evento. El error es ignorar el grado de representatividad de las muestras consideradas.

---

Disponibilidad de escenarios: es utilizado cuando se debe estimar la frecuencia de clase o la factibilidad de un hecho en particular.

---

No tener en cuenta hechos reales, sino los que producen mayor impresión. Lo “disponible” es lo que produce una emoción intensa.

---

Anclaje: utilizado en predicciones numéricas cuando los valores relevantes están disponibles. Conceder un peso desproporcionado a la primera información que se recibe.

---

Fuente: *elaboración propia.*

## Tecnologías de la información y toma de decisiones

La biomedicina es otra redefinición de la medicina, en la que intervienen factores científicos y tecnológicos aplicando conocimientos de ciencia mediante el estudio de los procesos fisiopatológicos del paciente. Allí convergen ciencias como biología, genética, anatomía, fisiología, ingeniería biomédica y microbiología para realizar la medición de las actividades del individuo y el funcionamiento de los órganos (Flores & Onofre, 1995).

Una señal fisiológica cuenta con potencial información que puede permitir descifrar qué factores influyeron en su producción; es así como un médico puede generar un diagnóstico. Dichos diagnósticos también pueden ser analizados como información sobre el comportamiento del ser humano bajo ciertas condiciones. Tal es el caso de las tripulaciones, que en muchas ocasiones se ven abocadas a condiciones especiales durante la ejecución de operaciones aéreas.

Para la medicina, las medidas se agrupan en diferentes categorías, a saber: mecánicas, biopotenciales, imágenes, acústicas, señales biomagnéticas, impedancias y señales bioquímicas. Es a partir de estas señales y su información que predice el comportamiento de las tripulaciones. Al ser señales eléctricas, con la tecnología actual se pueden transmitir tras diferentes medios, como las redes militares de radiofrecuencia de la FAC (Martínez, 2011).

Por su parte, la telemetría es una tecnología que permite la obtención remota de magnitudes físicas, para posteriormente permitir la centralización de los datos obtenidos en un centro de control. Este tipo de transmisión se hace básicamente mediante señales inalámbricas en las cuales el centro de control es el encargado de la gestión de todo el sistema de telemetría.

Así, se llega a la telemetría biométrica, la cual apunta a la monitorización remota del paciente para aumentar la calidad del servicio de salud y reducir costos de transporte y atención hospitalaria. En la telemetría biomédica se registran parámetros fisiológicos del paciente, enviados por señales electromagnéticas que permiten ofrecer una atención de calidad, optimizar funciones y reducir tiempos de recuperación y estadía en hospitales.

Otras aplicaciones en que la biotelemetría se ha utilizado son monitorización cardíaca, monitorización de presión sanguínea, monitorización respiratoria o de episodios de apnea y monitorización de la saturación arterial de oxígeno.

A continuación, la tabla 3 expone algunos de los componentes de los sistemas de telemetría biométrica:

**Tabla 3.** Composición de sistemas de telemetría biométrica

---

Sensores: detectan magnitudes físicas o químicas (en el caso de la biomedicina: presión arterial, ritmo cardíaco, etcétera) para transformarlas en variables eléctricas.

---

Procesador de señales: está compuesto por *hardware* y *software*. Su fin es captar señales en tiempo continuo para manipular la información obtenida según se requiera.

---

Equipo de comunicaciones: se usa para transmisión y recepción de los datos obtenidos por señales electromagnéticas o cableadas.

---

Dispositivo de almacenamiento y presentación de la información: se usa para el almacenamiento de la información.

---

Fuente: *elaboración propia*.

La FAC cuenta con radios de comunicación en las bandas VHF/FM y HF que permiten el envío de tramas de datos a distancias remotas. Los que operan en la banda de HF son radios que actúan en la banda de 3 MHz a 30 MHz, en la que las frecuencias electromagnéticas son propagadas en línea recta y rebotan en la ionósfera, donde son recargadas para llegar a distancias muy alejadas, e incluso, dar la vuelta al planeta (Radio Frecuencia (HF), s. f.)

De la misma manera existen factores que intervienen para que esta comunicación llegue hasta donde el usuario desea, como son las variaciones según las estaciones del año y las horas del día, o también, las llamadas tormentas solares. Este espectro está reservado, según se requiera a las FF. MM., radioaficionados, aeronáutica, telefonía inalámbrica y parte del espectro al uso civil.

Se cuenta también con el espectro de frecuencia Very High Frequency (VHF), que ocupa el rango de 30 MHz hasta 300 MHz. Es usado para muchos servicios, como las comunicaciones marítimas, aeronáuticas y la radio en FM.

La comunicación VHF/FM depende de factores que dificultan aún más las comunicaciones respecto a la transmisión en HF, algunos de ellos son la altura de las antenas, la línea de vista que tengan entre sí y las condiciones climáticas.

Ahora bien, el estudio de señales fisiológicas para aplicaciones militares nace a partir de la convocatoria 666 de Colciencias (ahora Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación) en el 2014, cuando se plantea la transmisión de datos empleando redes de radiofrecuencia militares. Bajo este proyecto, el mayor Arias Suárez, investigador principal, demostró la capacidad de los equipos VHF/FM para transmitir datos a otras aeronaves, personal en tierra o centros C2 (Comando y Control).

Posteriormente, Colciencias abrió otra convocatoria de investigación acerca de la posibilidad de transmitir señales fisiológicas para el monitoreo de pacientes, dado que las señales fisiológicas pueden transmitirse por radiofrecuencia y emplearse para extraer información del comportamiento del cuerpo humano en determinadas condiciones durante operaciones aéreas.

## Las normas

Dentro de las responsabilidades establecidas para el Estado colombiano se proyecta que, a través de sus FF. MM., específicamente la Fuerza Aérea Colombiana, se cumplan obligaciones y deberes acordes con sus características, naturaleza y ambiente operacional establecidas para cada una de ellas, las cuales derivan de la Constitución nacional:

Por tanto, para la FAC, estas funciones hacen parte de roles y responsabilidades que debe aplicar la Fuerza Aérea Colombiana en virtud de su misión institucional establecida, con el fin de obtener o cumplir con los objetivos de la nación, mediante el acatamiento de los principios, así como de toda la normatividad y legislación colombiana sumado a tratados internacionales. La presentación de estas funciones es también derivada de la naturaleza y ámbito operacional de la FAC (aire y espacio), así como de sus capacidades propias, las obligaciones, deberes y características generales de una fuerza militar, así como principios propios del poder aéreo y espacial, y los ambientes de empleo donde interactúa el poder aéreo y espacial (FAC, 2019, p. 80).

Del anterior principio rector derivan otros que se compilan en manuales y documentos, uno de estos es el Manual de Estado Mayor y Mando Conjunto (MEMMC) para las FF. MM., en el cual se establece la responsabilidad de los comandantes de llevar a cabo el proceso militar de toma de decisiones PMDT. Otro de los manuales doctrinarios es el MADBA, un referente normativo que establece los principios rectores que definen la organización para el combate, así como las funciones de la FAC y proyecta los ambientes de empleo del poder aéreo y espacial.

Teniendo en cuenta el ámbito en el que se establece el PMTD, como doctrina en apoyo a los comandantes e integrantes de los Estados Mayores, en el MEMMC para las FF. MM.:

Establece la doctrina que debe aplicar la organización militar para obtener la acción unificada de sus Fuerzas, en el planeamiento, conducción y ejecución de las operaciones conjuntas, en que participen componentes provenientes de cualquiera de sus Fuerzas Institucionales: el Ejército, la Armada o la Fuerza Aérea. La doctrina que aquí se precisa incluye las funciones generales que con respecto al Mando Conjunto y las Operaciones Conjuntas cumple el Comando General de las Fuerzas Militares y los Comandos de Fuerza (Flores-Henao, 2012, p. 224).

Por otro lado, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es el organismo especializado de la ONU para las TIC, es el encargado de la normatividad en el sector a nivel global. Esta normatividad se presenta como recomendaciones: “En el seno del UIT-T, los trabajos sobre biometría comenzaron en el 2001 bajo la responsabilidad de la Comisión de Estudio 17 del UIT-T que coordina estas actividades a través de todos sus Grupos de Trabajo” (UIT, 2010, p. 6).

Al considerar que el componente de obtención y análisis de las señales fisiológicas parte de la normatividad que aborda la metrología médica, entendida esta como “la especialidad de la metrología que estudia las mediciones relacionadas con las magnitudes fisiológicas, generadas por el cuerpo humano y traducidas por los equipos médicos. Además de las magnitudes físicas que generan algunos equipos médicos” (Cely, 2016, p. 7). Esta permite regular las actividades de toma de datos de señales fisiológicas y crear unos lineamientos para su uso y aplicaciones, previniendo la afectación de la vida humana o que esta sea empleada sin un componente ético. Dicho lo anterior, se presenta el resumen de la normatividad relevante en temas de metrología médica y aspectos que la regulan en la siguiente tabla:

**Tabla 4.** Normatividad de la metrología médica

Resolución 1.043 de abril 3 del 2006. Anexo Técnico n.º 1, estándar 3, numeral 3.2. Requisitos de habilitación.
La norma ISO 9.001: 2008. Numeral 7.6. Control de los equipos de seguimiento y medición.
Decreto 4.725 del 2005.
Resolución 4.816 del 2008 (Reglamentación).
Estándares de acreditación en salud.
Gestión de la tecnología y gerencia del ambiente físico.
ISO 376 que trata de la gestión de los sensores de patrón.
Decreto 1.011 del 2006, que establece el Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad de la Atención de Salud (SOGCS).
Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad de la Atención de Salud del Sistema General de Seguridad Social en Salud.

Fuente: *elaboración propia.*

## Metodología y estado del arte

La metodología de este proyecto se alinea con el proceso de investigación cualitativa, que tiene por fin describir o formar una teoría a partir de estudios sobre el quehacer cotidiano de las personas o grupos pequeños (Lerma, 2003). Los investigadores desarrollan conceptos, intelecciones y comprensiones que parten de pautas de los datos, y no, recogiendo datos para evaluar modelos, hipótesis o teorías preconcebidas (Benjumea, 1995).

Se divide en cuatro grandes áreas de trabajo: un estudio de los elementos necesarios para el proceso de toma de decisiones y cómo el análisis de señales fisiológicas de tripulaciones permite mejorar la ejecución de operaciones aéreas; un prediseño del sistema según las señales a evaluar y los medios de transmisión de la información; el desarrollo de algoritmos de procesamiento de la información suministrada por los sensores y algoritmos de transmisión de la información, y la articulación de los componentes en una arquitectura para el monitoreo y control remoto de las tripulaciones y su estructuración en el modelo de toma de decisiones.

Para esta investigación, se tomó como población de referencia a las tripulaciones de la FAC; sin embargo, y por situación de realización de comités de ética, se tomaron los datos de sistemas simulados, los cuales, en cuanto a referencia, son idénticos a los generados por los seres humanos, así, se emplearon las señales generadas por *dummies*. Con ellos se obtuvieron las señales fisiológicas para las pruebas y el monitoreo sin afectar la salud y condiciones físicas de los seres humanos. Asimismo, este método se empleó para la recolección de datos, para las pruebas de transmisión y la verificación de los cambios frente a las diversas situaciones presentadas.

## Estudio de los elementos del sistema

La telemetría se define como:

Tecnología que admite la realización de medida y rastreo de magnitudes físicas de distancia o remotamente para que un especialista pueda conseguir, generalmente de manera inalámbrica, datos de diferentes zonas. Estos sistemas telemétricos ofrecen información sobre los estados de procesos y permiten monitorearlos y tomar acción sobre ellos a distancia. El funcionamiento de la telemetría se basa en la manipulación y

transformación de señales adquiridas por un sensor en señales eléctricas que son transmitidas para su registro y posterior medición. Algunos tipos de señales corresponden generalmente a variables físicas como: vibraciones, temperatura, presión y voltaje (Cengage, 2021, p. 1).

La telemetría se ha usado en el ámbito médico para supervisar o monitorear reacciones o estados físicos en los seres humanos; no obstante, en el ámbito médico se emplea el término de biotelemetría que se establece como un sistema teledetección y transmisión de señales biológicas. Se entiende como señal biológica un tipo de señal generada por procesos biológicos del ser humano como los cambios hormonales, electroquímicos, mecánicos o bioquímicos (Carrión *et al.*, 2007).

Los sistemas biotelemétricos tienen grandes ventajas en el diagnóstico médico y en la vigilancia del paciente. Facilitan la transmisión de datos telemétricos al evitar conexiones directas al equipo de monitoreo, que muchas veces genera incomodidad en el paciente y restricción de movimiento (Kline, 2012), por lo que se utilizan para monitorear pacientes con enfermedades como diabetes o padecimientos cardíacos, y en algunos casos, en neurociencia para monitorear la actividad neuronal, dadas las dificultades para observar o vigilar condiciones críticas durante las 24 horas del día o las rondas establecidas en clínicas o en hospitales.

Dentro de las necesidades de la evolución de la medicina de aviación se proyecta el empleo de herramientas que, como la telemetría, puedan ofrecer datos para el monitoreo del estado físico y médico de las tripulaciones y aporten mejoras a los procesos de toma de decisiones en el ámbito militar.

La telemetría inició su uso en aviación para reducir el riesgo en la máquina, al monitorear en tiempo real parámetros como combustible, motores, temperatura y velocidad del viento, pero no para monitorear a las tripulaciones encargadas de tomar decisiones frente a las variables. Con esta investigación, se presenta la posibilidad de aplicar estos desarrollos en los procesos de toma de decisiones.

Por otro lado, Veloza y Rentería (2007) enuncian lo siguiente:

Por motivo a las alteraciones fisiológicas del ser humano cuando es sometido a los efectos de cambio de altura, aceleraciones y desaceleraciones, variación de la presión atmosférica y en general a todos los cambios en los diferentes ambientes aeronáuticos; es posible “según medicina de

aviación”, que se puedan presentar los accidentes aéreos debido a la falta de dispositivos encargados de supervisar el comportamiento fisiológico humano de los pilotos en sus diferentes tareas aéreas, conllevando a fallas humanas por reacciones tardías en los procedimientos operacionales (Veloza & Rentería, 2007, p. 30).

Otro estudio en el cual se emplean las características elementales de las señales fisiológicas, que se ha usado para que los seres humanos aprendan a modificar su actividad con el propósito de mejorar su rendimiento y salud es el *biofeedback*. Este término definido en 1969 por la Biofeedback Society of America, que se instauró en Norte América, más exactamente en California, con el propósito de discutir sobre la actividad biológica y la retroalimentación.

En el 2008, la Asociación de Psicofisiología Aplicada y Biofeedback (AAPB), la Alianza Internacional de Certificación de Biofeedback (BCIA) y la Sociedad Internacional de Neurofeedback e Investigación (ISNR) propusieron una definición de *biofeedback*, que incluye tanto elementos procesuales como objetivos a alcanzar en el tratamiento:

El *biofeedback* es la técnica que permite a un individuo aprender a modificar la actividad fisiológica, a efectos de mejorar la salud y el rendimiento. Mediante el empleo de instrumentos de gran precisión se miden distintas respuestas o actividades fisiológicas del organismo, tal como: ondas cerebrales, función cardíaca, respiración, actividad muscular, temperatura de la piel, actividad electro-dermal, entre otros. Estos instrumentos presentan de forma rápida y precisa (*feedback*) la información al usuario, la cual, en combinación de cambios en el pensamiento, las emociones y la conducta, apoya los cambios fisiológicos deseados. Con el tiempo, estos cambios se pueden sostener sin el uso continuo de un instrumento (Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback, 2011, citado por Nieto & Vega, 2017, p. 45).

## Evaluación de sensores a utilizar

Dentro del rango de sensores empleados para el proceso de investigación se encuentran los transductores denominados electrodos, que, por su diseño, convierten el potencial iónico en variaciones eléctricas para ser medidas con procesos de instrumentación.

La tabla 5 expone las principales características eléctricas de algunas de las señales que son de interés para la adquisición y la búsqueda de los sensores requeridos.

**Tabla 5.** Características de las señales a ser adquiridas

Señal	Ancho de banda	Unidad	Voltaje	Unidad
ECG	0,01 a 150	Hz	0,5 a 4	mV
EEG	0,5 a 150	Hz	5 a 300	uV
Señales del ecógrafo	2 a 10	MHZ		

Fuente: Guerrero (2011, p. 2).

Otras características consultadas dentro del proceso de investigación que se evaluaron teniendo en cuenta cada tipo de célula, presentan una actividad eléctrica característica y la medida de esta actividad proporcionan información sobre su funcionamiento. Como las disfunciones se revelan frecuentemente en la señal bioeléctrica, se puede obtener información para el diagnóstico a partir de estos registros, pero al ser señales eléctricas, estas deben ser tratadas y verificadas de acuerdo a los siguientes parámetros para el manejo de señales: exactitud, precisión, resolución, repetitividad, control estático, sensibilidad, desplazamiento del origen, rangos e impedancia de entrada.

Con esta información, y dado que la investigación busca demostrar el uso de señales fisiológicas para evaluar comportamientos, se analizó el mercado de sensores y sistemas de adquisición de datos para proyectar un modelo que permita adquirir las señales y transmitir las con el mayor grado de exactitud y precisión posible. Por esta razón se evaluaron los fabricantes Honeywell®, Cubic®, Viomedex®, Anton Paar®, Delsys® y Vernier®, y, al final, se seleccionó a Vernier® por emplearse en la academia para diferentes proyectos y trabajos técnicos con una precisión elevada. De acuerdo con el sistema propuesto (figura 8), el esquema de comunicación con los sensores se realiza a través de un computador especializado PXI, con dispositivos para adquirir datos y señales.

La plataforma de adquisición de datos seleccionada para elaborar el modelo dentro del proceso de investigación es una plataforma PXI de National Instruments (NI) acompañado de sensores Vernier, altamente compatibles con NI que permiten una adecuada adquisición de datos teniendo en cuenta que como sensores son empleados en medicina, sobre todo, para señales muy precisas ajustadas a las necesidades del proyecto.



**Figura 8.** Esquema del sistema propuesto para adquisición y transmisión de datos

Fuente: NI (s. f.).

## Evaluación de redes de comunicación

El radio Tádiran CNR-9.000 VHF/FM es el escogido para el desarrollo del prototipo, por la alta cobertura nacional. Es común en la FAC y el Ejército Nacional, pues da la posibilidad de establecer comunicación en cualquier parte del territorio y ofrece servicios de seguridad y encriptación de voz y datos.

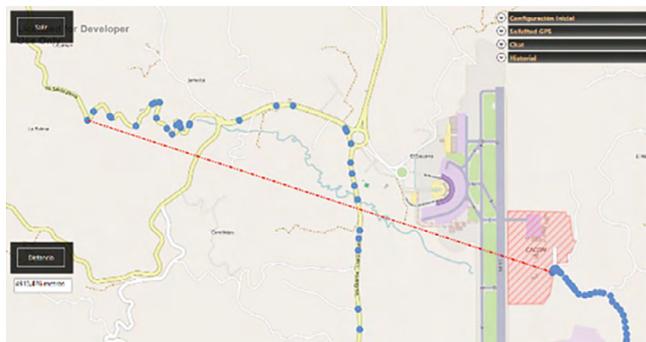


**Figura 9.** Radio Tádiran CNR-9.000

Fuente: [https://www.armyrecognition.com/december\\_2010\\_army\\_military\\_defense\\_industry\\_news/elbit\\_systems\\_to\\_supply\\_a\\_european\\_country\\_with\\_communication\\_systems\\_cnr\\_9000\\_and\\_hf\\_6000.html](https://www.armyrecognition.com/december_2010_army_military_defense_industry_news/elbit_systems_to_supply_a_european_country_with_communication_systems_cnr_9000_and_hf_6000.html).

Gran parte de la red militar se compone de radios CNR-9.000, dispuestos en diferentes configuraciones como son nodos finales y repetidores para conformar varias topologías de red que amplían el rango de comunicación. Estas topologías extienden el radio de transmisión al sacrificar aspectos de velocidad y tiempo de respuesta en la comunicación. Se identificaron tres modos de comunicación —clr, sec, aj— que implementan diferentes protocolos de transmisión e influyen directamente en los tiempos de respuesta y velocidades. Para esta etapa, se usaron los radios disponibles en el taller de mantenimiento CEMCA y se realizó un estudio exhaustivo de sus diferentes funcionalidades y la identificación de los protocolos de transmisión.

Se obtuvieron tiempos de respuesta apropiados para esta propuesta, pero es indispensable contar con un centro de salud cercano al sitio de operación con el fin de no requerir repetidor o, si no es posible, recurrir a repetidores con un sitio de cobertura no tan amplio para que el retraso en la transmisión y recepción de los datos no sea significativo.



**Figura 10.** Rango de cobertura sin repetidor

Fuente: *elaboración propia.*

La figura 10 muestra el rango de cobertura máximo permitido en condiciones normales (sin lluvia), para un enlace de comunicaciones entre dos radios Tádiran (maestro-esclavo) en tierra. Es decir, alrededor de unos 4.500 metros a la redonda para equipos en plataformas aéreas, lo cual incrementa la cobertura al emplearse equipos de aeronaves y repetidores. De ese modo podría enviarse la señal a un Centro de Comando y Control desde una aeronave con una serie de repetidores como con los que cuenta la FAC, viendo en tiempo real las condiciones de las tripulaciones y asegurando las comunicaciones y envío de datos a velocidades aceptables, sin pasar por repetidores. Una vez allí, se realiza el seguimiento y análisis del comportamiento de las tripulaciones y la forma y secuencia en que toman decisiones. Esta es la información que el comandante requiere para dar continuidad o no a la operación, de acuerdo con el desempeño de sus tripulaciones.

El protocolo de comunicación de datos RMTData, inserto en los Radios Tádiran, es el más adecuado para el sistema y para una comunicación con diferentes tarjetas externas. Este protocolo es complejo y permite controlar la mayoría de las funcionalidades del radio a través de comandos, permitiendo el envío de mensajes o datos entre los radios por medio del protocolo RS232 (figura 11).



**Figura 11.** Red de comunicación establecida

Fuente: elaboración propia.

El uso de los diferentes sensores y el almacenamiento de sus señales irán insertos y procesados en una tarjeta de NI, que permite realizar las diferentes funciones.

Existen distintos sistemas de adquisición de datos analógicos y digitales como son los sistemas embebidos Raspberry PI, Arduino y Galileo, pero se encontró que solo son compatibles con ciertos sensores diseñados exclusivamente para ellos, por lo cual, presentan una tasa de error más alta que un sensor biomédico de alta sensibilidad.

Al contrario, los sistemas de adquisición de datos de NI basados en una programación gráfica de diagrama de bloques, especial para tareas de medición, pruebas y control, se ajustan a los requerimientos de este proyecto. En tal sentido, se encontraron dos tipos de plataformas de adquisición de datos dentro de NI: la plataforma CompactDAQ que integra la conectividad y acondicionamiento de señales en E/S modulares para conectar directamente a cualquier sensor o señal, y la variedad de opciones para bus, chasis, controlador y acondicionamiento de E/S, combinada con la naturaleza adaptable del software Labview (figura 12), que son la mejor solución para cualquier aplicación con una cantidad medida de canales.



**Figura 12.** Sistema DAQ

Fuente: Labview (2017).

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso para medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. DAQ es un sistema de sensores, *hardware* de medidas DAQ y una PC con *software* programable.

El *hardware* DAQ actúa como interfaz entre una PC y señales del mundo exterior, digitaliza señales analógicas para que una PC pueda interpretarlas. Sus tres componentes clave para medir la señal son el circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico digital (ADC) y un bus de PC (figura 13).

La plataforma PXI (figura 14) está basada en PC para sistemas de medidas y automatización. Combina características de bus eléctrico PCI con paquete Eurocard modular de Compact PCI, después añade buses de sincronización especializada y características clave de *software*. Es de alto rendimiento y bajo costo de implementación para aplicaciones como las militares y las aeroespaciales. Está compuesta por un *software* de programación exclusivo de NI, basado en programación gráfica que ayuda a desarrollar un potente *software* de pruebas rápidamente. Con compatibilidad para miles de instrumentos y tecnologías como multinúcleo y arreglos de compuertas programables en campo, puede desarrollar sistemas de pruebas automatizadas de alto rendimiento.



**Figura 13.** Diagrama de comunicación DAQ  
Fuente: NI (s. f.).

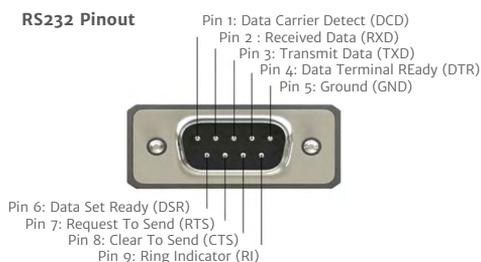


**Figura 14.** Diagrama de interfaz PXI  
Fuente: NI (s. f.).

## Evaluación de protocolos de comunicación

En la figura 14 se muestra un puerto de comunicación RMT/DATA, PC-Radio, el cual utiliza un protocolo serial muy común para comunicación entre

dispositivos, que se incluye de manera estándar en prácticamente cualquier computadora. Gran parte de los actuales equipos de cómputo o sistemas de procesamiento cuentan con dos puertos seriales RS-232. El protocolo de comunicación serial es también común conectando diversos sensores o dispositivos, por lo que existen varios dispositivos compatibles con GPIB que incluyen un puerto RS-232.



**Figura 15.** Pinout Conector RS232

Fuente: *us Converters LLC (s. f.)*.

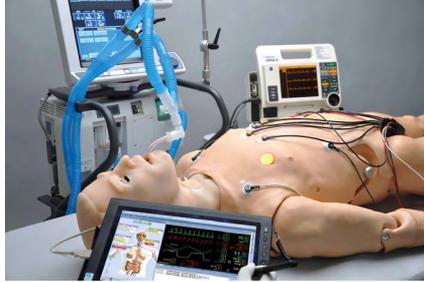
Para una comunicación serial se usan tres canales de transmisión: tierra (o referencia), transmisión y recepción. Se puede realizar envío de datos por una línea y recibirlos por la otra; no obstante, están disponibles otras líneas para intercambio de pulsos de sincronización, pero no se requieren.

Según Rosado (2011), para la transmisión serial es importante tener cuenta la velocidad de transmisión (*baud rate*), que indica el número de bits por segundo que se transfieren y se mide en baudios (*bauds*). Por ejemplo, 300 baudios representan 300 bits por segundo. De acuerdo con lo anterior y para el desarrollo de un sistema de biotelemedicina, las velocidades de transmisión más comunes empleadas para la comunicación de dispositivos (sensores y radios) y para la transmisión de datos en forma serial es de 9.600 o 19.200 bits por segundo.

Otra característica es la cantidad de bits de datos. Cuando se realiza una transmisión, el tamaño del paquete no necesariamente es de ocho bits. Se manejan paquetes de 5, 7 y 8 bits. El número de bits que se envía depende en el tipo de información a transmitir.

Por ejemplo, el empleo de bits de parada para mostrar el fin de la comunicación de un solo paquete, también es importante. Dentro de los valores típicos están 1, 1,5 o 2 bits de parada. Como la información se transfiere por líneas de comunicación y cada dispositivo tiene su propio reloj, lo más

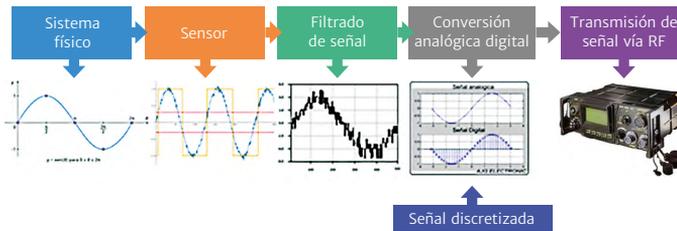
probable es que no estén sincronizados. Los bits presentan un margen de tolerancia para ese desfase de los relojes. Mientras más bits de parada se usen, mayor será la tolerancia a la sincronía de los relojes, pero la transmisión se tornará lenta.



**Figura 16.** Simulador paciente FAC

Fuente: *Simuladores en Medicina. Realidad virtual: Introducción y bienvenida (2016).*

En el simulador de paciente del laboratorio de la FAC, se hicieron pruebas de señales en tiempo real. Está configurado con un puerto USB para generar señales biomédicas las cuales son adquiridas por la PXI de NI y enviadas al radio por RS232. Se obtuvieron las señales verificando que efectivamente la herramienta realiza adquisición de datos validando el prototipo. Para el desarrollo de los diferentes algoritmos de programación y el procesamiento de señales, se hicieron diferentes pruebas, entre ellas la toma de señales con los sensores y la verificación de estas en la PXI; la transmisión entre radios y los algoritmos de visualización y presentación, y las respuestas de los comandos en las pantallas táctiles.



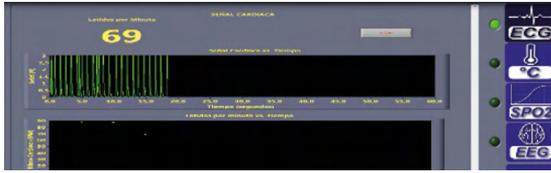
**Figura 17.** Funciones requeridas

Fuente: *II. Conceptos Básicos de NI LabVIEW – National Instruments (s. f.).*

En el sistema físico se realizó la adquisición de las señales corporales mediante los sensores Vernier, que permiten la conversión de una señal



estándar de tres derivaciones para registrar la actividad eléctrica en el corazón, o para recolectar grabaciones EMG de superficie y estudiar las contracciones en los músculos de brazo, pierna o mandíbula (figura 20).



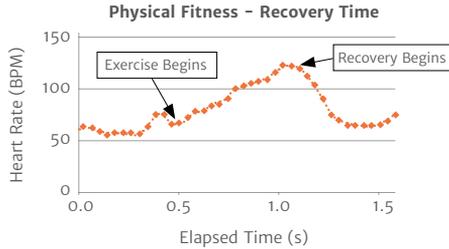
**Figura 20.** Imagen de señal cardíaca generada por la herramienta  
Fuente: *elaboración propia.*

El monitor de ritmo cardíaco HGH-BTA de Vernier (figura 21) censa continuamente el comportamiento del corazón antes y después del ejercicio, como se muestra en la figura 22.

El sensor de temperatura de superficie tiene un termistor expuesto para un tiempo de respuesta extremadamente rápido. Este diseño permite su uso en aire y agua (figura 23), y se obtienen señales como las observadas en la figura 24.



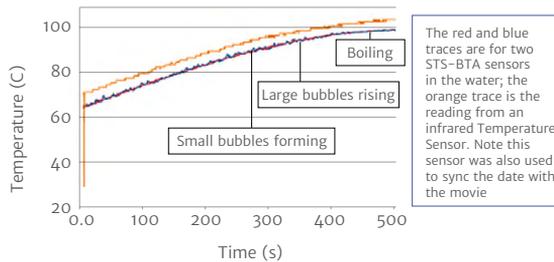
**Figura 21.** Sensor HGH  
Fuente: *Vernier (2007).*



**Figura 22.** Señal HGH. Pruebas realizadas con el sistema  
Fuente: *Vernier (2007).*



**Figura 23.** Sensor de temperatura STS  
Fuente: *Vernier (2007).*



**Figura 24.** Señal STS. Pruebas del sensor  
Fuente: *Vernier (s.f).*

Por último, hay dos sensores (figura 25). Uno mide la presión sanguínea, y el otro es un espirómetro diseñado para mediciones respiratorias humanas en reposo y en actividad moderada.

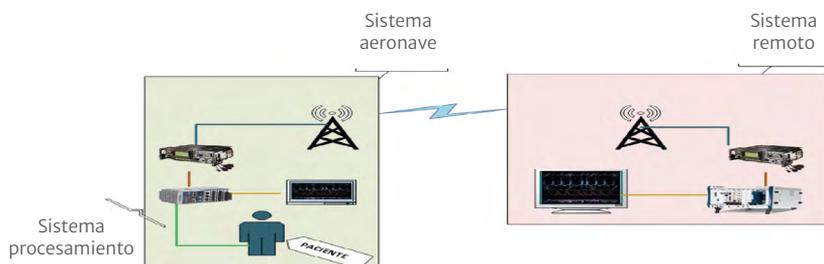


**Figura 25.** Sensores de presión arterial  
Fuente: *Virtual Instruments de México (s. f.)*.

## Los resultados y el análisis

### Prototipo de sistema de transmisión de datos biométricos

El sistema propuesto (figura 26) contempla diferentes etapas de desarrollo y procesamiento, para que tanto el usuario en la aeronave, como el usuario en sitio remoto puedan monitorear el estado de las señales fisiológicas.



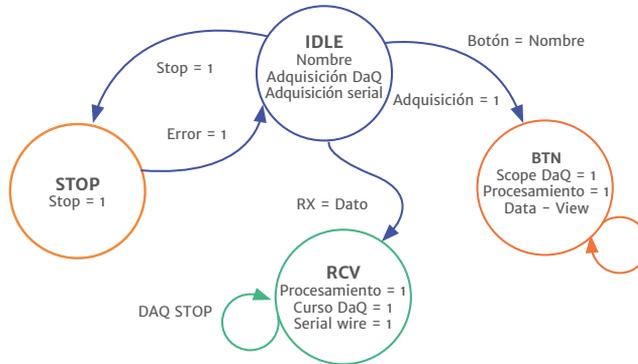
**Figura 26.** Sistema desarrollado para transmisión de señales  
Fuente: *elaboración propia*.

En la primera etapa, *sistema procesamiento*, se da la adquisición de señales fisiológicas del paciente —temperatura, ritmo cardíaco y presión arterial—. La visualización de las variables es automática. Para el sistema de la aeronave se usa CompactDAQ, la cual consta de una plataforma de adquisición de datos que permite la integración efectiva entre *hardware* y



## Máquina de estados principal

Se realiza un modelo de control compuesto por cuatro estados (figura 29):



**Figura 29.** Máquina de estados principales

Fuente: Cardona y López (2017).

- **IDLE:** estado de reposo. Espera la orden por parte del usuario que se imparte por medio de los botones. Se hace la adquisición de las tres señales del paciente y se activa la recepción de datos con el protocolo serial.
- **BTN:** envía el nombre del botón pulsado para activar el *scope* asignado según la señal.
- **RCV:** se procesa el dato recibido por medio del protocolo serial.
- **STOP:** se cierran los procesos y se liberan los buffers de envío de datos.

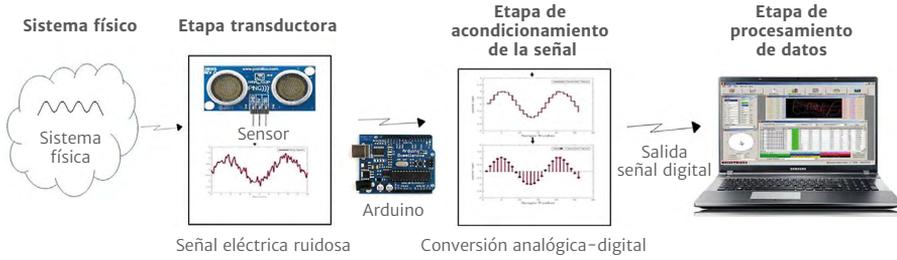
La figura 30 muestra la interfaz de usuario disponible en la aeronave que permite la visualización de las señales mediante los botones de la parte derecha.



**Figura 30.** Interfaz de usuario

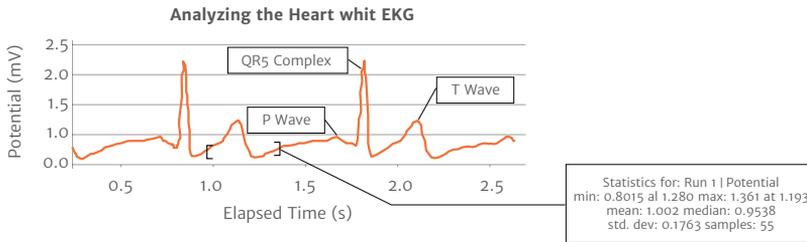
Fuente: elaboración propia.

El esquema de comunicación con los sensores se hace con un PC especializado PXI, con las tarjetas de adquisición de datos y señales descritas (figura 31). Esta plataforma fue desarrollada para pruebas que sustenten la tesis de que el estudio de las variaciones de las señales fisiológicas de seres humanos permite analizar su comportamiento, pronosticar cómo actuarán ante determinados factores externos y, mejorar los procesos de toma de decisiones.



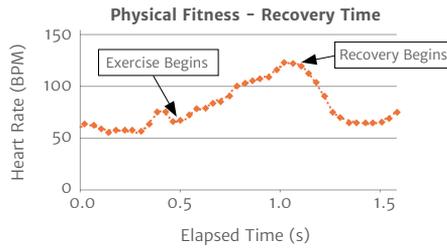
**Figura 31.** Esquema de comunicación y transmisión de señales  
 Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las pruebas realizadas a los equipos de adquisición de datos National Instruments, se seleccionaron sensores Vernier para realizar el proceso de adquisición de señales en forma segura dados dos parámetros: que no fuera invasivo para el individuo y su precisión. Para señales cardíacas se empleó el sensor EKG-BGT, que mide las formas de onda del potencial eléctrico cardíaco. De ese modo, se obtiene una gráfica como la mostrada en la figura 32:



**Figura 32.** Señal cardíaca obtenida con el sistema desarrollado  
 Fuente: Vernier (s. f.).

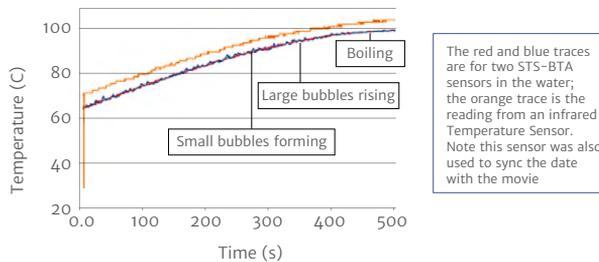
El monitor de ritmo cardíaco HGH-BTA (figura 33) obtiene gran cantidad de valores, empleados para analizar el comportamiento de las tripulaciones.



**Figura 33.** Señal cardíaca discretizada

Fuente: Vernier (s. f.).

El sensor de temperatura de superficie tiene un termistor expuesto con tiempo de respuesta extremadamente rápido. Su diseño permite su uso en aire y agua (figura 34).

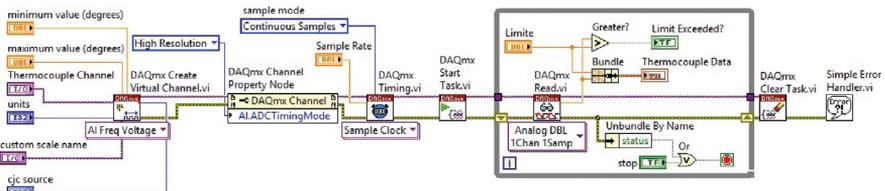


**Figura 34.** Señal de temperatura

Fuente: Vernier (s. f.).

Para el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes, se tienen en cuenta aspectos esenciales en su desarrollo, respecto a sistemas más eficaces y rápidos. Uno de ellos es la adquisición de señales análogas para su procesamiento en cualquier sistema. Es indispensable contar con un procesamiento tal que alcance a cumplir con este teorema:

$$FS > 2 * FN$$



**Figura 35.** Diagrama de bloques para la adquisición de señales en Labview

Fuente: elaboración propia.

En la adquisición de una señal analógica para su procesamiento es importante la resolución con la que es adquirida. Los bits de resolución hacen referencia al número de niveles únicos que un procesador usa para representar una señal. La resolución en un sistema ADC representa la cantidad de piezas en las que la señal máxima se puede llegar a dividir, en donde un código binario representa cada división, por lo que el número de niveles puede ser calculado así:

$$\text{Ancho} = \text{Rango}/2$$

Con estas variables, se puede diseñar un filtro para las señales con el fin de eliminar la mayor cantidad de ruido y obtener una señal confiable.



**Figura 36.** Sistema de adquisición de datos

Fuente: Vernier (s. f.).

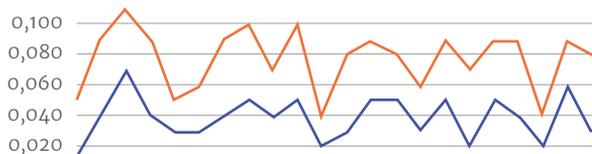
De ese modo, se proyectó un sistema de transmisión de las señales para tomarlas directamente de las tripulaciones, en labores rutinarias en la aeronave o en los ejercicios de cámara de altura. Se pensó en emplear una red VHF/FM Tádiran, disponible en la mayoría de los equipos de vuelo, sobre todo, en helicópteros y aeronaves de combate para aprovechar las capacidades de transmisión de señales del proyecto “Sistema de posicionamiento de aeronaves y personal de superficie con confirmación de blancos”, desarrollado por la FAC, en convenio con Colciencias.

Como centro de ejecución y control se tomó como punto de partida el envío de los datos mediante las señales RF, ejecutadas por los radios CNR-9.000. Por tanto, una de las variables fundamentales es la toma de los tiempos de transmisión de los equipos.

A los CNR-9.000, multi VHF/FM con sistema COMSEC/CCME voz y data, se les realizaron pruebas de transmisión para establecer datos y tiempos de operación a través de estaciones repetidoras y conexión PC-Radio. Esto, con el fin de validar los tiempos de espera de llegadas de paquetes y comunicación a través del puerto RMT/DATA de la familia de radios PRC-9.000. De esa manera se asegura la transmisión en tiempo real, sin pérdida de información.

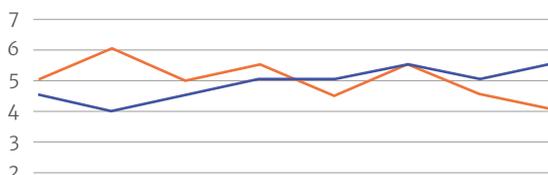
Modo de Transmisión CLR: rango de frecuencias encontrado, 30-108 MHz; número canales encontrados en el radio, 27; mensajes de texto pregrabados, 10. En este modo el radio no usa técnicas de cifrado. Su modulación es FM.

Prueba 1-Radio a Radio. Tiempo promedio de llegada de mensaje pregrabado 0,05s, distancia entre radios 10 metros. Se realizaron 100 envíos con línea de vista y con pérdidas de zonas de Fresnel.



**Figura 37.** Gráfico de Fresnel y línea de vista

Fuente: elaboración propia.

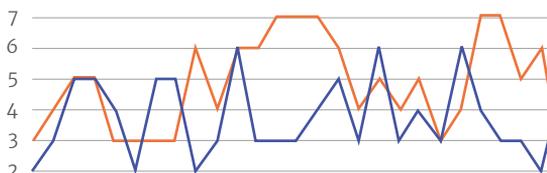


**Figura 38.** Repetidor con Fresnel y línea de vista

Fuente: elaboración propia.

Prueba 2-Radio a Radio. Tiempo promedio de llegada de mensaje pregrabado: 0,45s. Distancia entre radios: 300km. 100 envíos con línea de vista y con pérdidas de zonas de Fresnel.

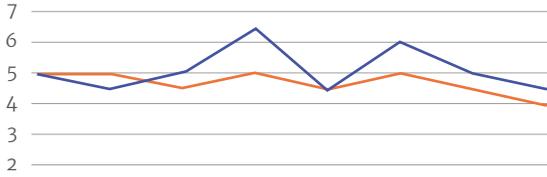
Modo de Transmisión Seguro SEG: rango de frecuencias encontrado, 30-108 MHz; número canales encontrados en el radio 27; mensajes de texto pregrabados, 10. En este modo el radio usa técnicas de cifrado. Su modulación es FM.



**Figura 39.** Transmisión seg con zonas de Fresnel

Fuente: elaboración propia.

Prueba 3-Radio a Radio. Tiempo promedio de llegada de mensaje pregrabado: 0,6s. Distancia entre radios: 200km. 100 envíos con pérdidas de zonas de Fresnel.



**Figura 40.** Transmisión con repetidor y zonas de Fresnel  
Fuente: elaboración propia.

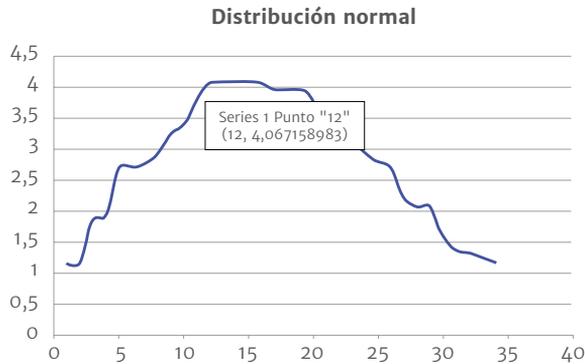
Prueba 4-Radio-Repetidor-Radio. Tiempo promedio de llegada de mensaje pregrabado: 0,5s. Distancia entre radios: 30km. 100 envíos con pérdidas de zonas de Fresnel.

**Pruebas de red**

La zona con línea de vista es de 75 % en un día sin nubosidad y el error se estima en 9 %.

Datos	Ds Normal
-0,25452609	1,14684184
-0,2541711	1,15355196
-0,22151225	1,86336666
-0,21902733	1,92368035
-0,18778843	2,71512175
-0,18778843	2,71512175
-0,1856585	2,76921194
-0,1799787	2,91192094
-0,16506922	3,26885528
-0,15903443	3,40259412
-0,13773518	4,80070179
-0,11324104	4,06715898
-0,09868655	4,10853606
-0,09336173	4,10069394
-0,09300674	4,09973326
-0,08697196	4,07509397
-0,07561235	3,98711445
-0,07525737	3,98351729
-0,07454739	3,97617325
-0,06318779	3,83252483
-0,03194888	3,22767392

Media	-0,09940696
Desv. Estándar	0,09709816

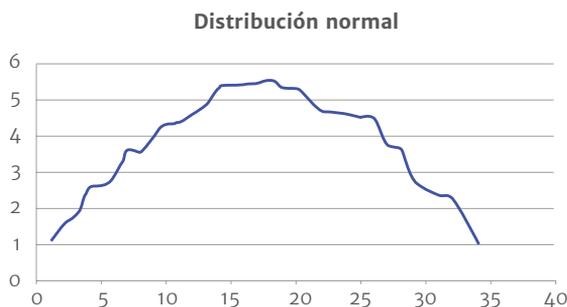


**Figura 41.** Distribución normal del error de medición del GPS con zona Fresnel 25%  
Fuente: elaboración propia.

Zona con línea de vista 90 % en un día sin nubosidad, el error se estima en un 2 %.

Datos	Ds Normal
-0,11008111	1,07039454
-0,0967555	1,47243565
-0,0877752	1,7904432
-0,06923523	2,55195271
-0,0674971	2,62919337
-0,06257242	2,85191598
-0,047219	3,65687687
-0,04692932	3,57937243
-0,03621089	4,06962849
-0,02983778	4,34640563
-0,02954809	4,35861118
-0,0225956	4,63942057
-0,0153542	4,90223816
0,00347625	5,39521674
0,00695249	5,45050824
0,00753187	5,45853871
0,01158749	5,50507408
0,02085747	5,54632489

Media	0,2038886
Dev. Estándar	0,0719276



**Figura 42.** Distribución normal del error de medición del GPS con zona Fresnel 10%

Fuente: elaboración propia.

## Mediciones y resultados obtenidos con el sistema

Se midieron actividades diarias como reposo, trabajo en oficina, caminar, levantarse y sentarse con repeticiones, actividades de cardio en bicicleta a baja y media intensidad y, sentadillas. La medición se hizo con un hombre de 25 años y cada prueba fue de cinco minutos.

**Tabla 5.** Resultados según actividad física realizada

Actividad	FC – Latidos por minuto		FR – Ciclos por minuto		Temperatura °C		Presión arterial	
	M.A	D.E	M.A	D.E	M.A	D.E	M.A	D.E
Reposo	56,95	2,78	13,45	5,05	40,02	0,079	51,68	0,029
Oficina	60,46	4,99	13,10	3,06	36,88	0,09	50,24	0,045
Caminar	71,32	12,58	12,81	4,39	24,80	0,0081	51,32	0,05
Ciclo parado y sentado	64,35	9,84	13,83	4,61	24,93	0,01	51,87	0,03
Bicicleta baja intensidad	73,54	7,06	14,56	3,88	25,09	0,01	51,63	0,02
Bicicleta media intensidad	80,44	24,38	15,22	4,90	24,79	0,006	51,39	0,01
Sentadillas	83,10	20,26	14,89	5,25	24,51	0,009	52,31	0,02

Nota. MA= Media Aritmética, DE = Desviación Estándar.

Fuente: elaboración propia.

Las Normas Técnicas de Prevención en España (NTP) son guías de buenas prácticas del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Según esta institución, la respuesta fisiológica al estrés es la

reacción del organismo ante los estímulos estresantes. Una serie de reacciones fisiológicas activa el eje hipofisopararrenal (HSP) y el sistema nervioso vegetativo.

El HSP está compuesto por el hipotálamo —estructura nerviosa en la base del cerebro que actúa de enlace entre el sistema endocrino y el sistema nervioso—; la hipófisis —glándula situada en la base del cerebro—, y las glándulas suprarrenales —ubicadas en el polo superior de cada uno de los riñones, compuestas por la corteza y la médula—. El sistema nervioso vegetativo (SNV) es el conjunto de estructuras nerviosas que se encarga de regular el funcionamiento de los órganos internos y controla algunas de sus funciones de manera involuntaria e inconsciente. “Ambos producen la liberación de hormonas, sustancias elaboradas en las glándulas que, transportadas a través de la sangre, excitan, inhiben o regulan la actividad de los órganos” (INSST, 2008, p. 1).

El proceso de reacción del cuerpo humano al estrés, que se activa frente a agresiones físicas y psíquicas genera respuestas químicas al segregar hormonas y preparar al organismo para enfrentar la situación. Estas secreciones inciden en la corteza de las glándulas suprarrenales. Lo que da lugar a la producción de corticoides que pasan al torrente sanguíneo y producen múltiple incidencia orgánica. Los corticoides que se liberan son (INSST, 2008):

- Los glucocorticoides: el más importante es el cortisol que facilita la excreción de agua y el mantenimiento de la presión arterial, afecta a los procesos infecciosos y produce una degradación de las proteínas intracelulares. Así mismo, tiene una acción hiperglucemiante (aumenta la concentración de glucosa en sangre) y se produce un aumento de calcio, de lípidos y de fosfatos liberados por los riñones.
- Los andrógenos: son las hormonas que promueven el desarrollo de las características secundarias masculinas y estimulan el aumento tanto de la fuerza como de la masa muscular.

Al generarse estos cambios, el cuerpo humano busca retornar a un estado de equilibrio. El encargado es el SNV, que mantiene la homeostasis. La activación simpática supone la secreción de catecolaminas:

- La adrenalina segregada por la médula suprarrenal especialmente en casos de estrés psíquico y de ansiedad.

- La noradrenalina segregada por las terminaciones nerviosas simpáticas, aumentando su concentración principalmente en el estrés físico, en situaciones de alto riesgo o de agresividad.

Estas hormonas adaptan al cuerpo para enfrentar la situación y permiten enlazar el estrés con los fenómenos psicofisiológicos de la emoción. Son tres las fases del estrés: alarma, resistencia o adaptación y agotamiento. Estas fases generan respuestas del organismo, con consecuencias asociadas a variaciones en las señales fisiológicas que pueden ser verificadas mediante transductores o sensores que las convierten en respuestas eléctricas.

La tabla 6 presenta las principales consecuencias biológicas del estrés con reacciones que se pueden traducir en señales eléctricas. Esto confirma la posibilidad de evaluar esos cambios en un proceso de toma de decisiones.

**Tabla 6.** Consecuencias biológicas del estrés

Afección	Tensión (fase inicial)	Estrés
Cerebro	Ideación clara y rápida	Dolor de cabeza, tics nerviosos, temblor, insomnio, pesadillas
Humor	Concentración mental	Ansiedad, pérdida del sentido del humor
Saliva	Muy reducida	Boca seca, nudo en la garganta
Músculos	Mayor capacidad	Tensión y dolor muscular, tics
Pulmones	Mayor capacidad	Hiperventilación, tos, asma, taquipnea
Estómago	Secreción ácida aumentada	Ardores, indigestión, dispepsia, vómitos
Intestino	Aumenta la actividad motora	Diarrea, cólico, dolor colitis ulcerosa
Vejiga	Flujo disminuido	Poliuria
Sexualidad	Regulaciones menstruales	Impotencia, amenorrea, frigidez, dismenorrea
Piel	Menor humedad	Sequedad, prurito, dermatitis, erupciones
Energía	Aumentos del gasto energético, aumento del consumo de oxígeno	Fatiga fácil
Corazón	Aumento del trabajo cardíaco	Hipertensión, dolor precordial

Fuente: elaboración propia con base en INSST (2008).

El estrés no es generado solo por situaciones negativas. Hay estrés negativo (*distrés*) y positivo (*eustrés*). Este último, comprende entonces todos los estímulos externos físicos, fisiológicos y psicológicos que proyectan situaciones de alegría y pequeños dolores que adaptan al organismo a situaciones que le llevan a mantenerse con vida.



**Figura 43.** Relación entre procesos de trabajo y respuestas neuroendocrinas  
Fuente: *INSST (2008)*.

## Proceso de toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas

De acuerdo con lo observado en esta investigación, el proceso continúa con una doctrina rígida y poco analizada. No obstante, al estar inmerso el PMTD en los manuales de Estado Mayor, no se tiene en cuenta la tecnología para mejorarlo, solo se ha empleado para incrementar la cantidad de información que se le ofrece al comandante para su decisión.

Así cambien los ejércitos, de acuerdo con las oleadas planteadas por Toffler y Toffler (1993), es claro que en una confrontación lo que se busca es doblegar la voluntad del adversario. Por ello, es pertinente preguntarse si con la revolución tecnológica, existirán otras formas o manifestaciones de aplicación del poder militar aún no contempladas para doblegar esa voluntad (Asta, 2000).

Un proceso militar de toma de decisiones, por su condición de planeación, debe ser analítico, singular, sistemático y comprobado. El análisis es vital por su enfoque hacia la resolución de problemas. El proceso para llegar a una decisión contempla conocimiento profesional, lógica, detalles, claridad y discernimiento, y cumplirse en forma planeada, detallada y continua permitirá un análisis y comparación de múltiples cursos de acción.

El proceso militar de toma de decisiones tiene dos inconvenientes para su aplicación efectiva: la cantidad de tiempo requerido para desarrollarlo, y que, como proceso heurístico, posee sesgos cognitivos:

- *Bandwagon* o efecto de arrastre: se presenta cuando se obtiene información y apreciaciones de terceros que se toman como ciertas y se adopta por el solo hecho de que otros lo hacen.
- Disponibilidad heurística: se presenta cuando las personas le restan o sobreestiman la importancia de la información así esté documentada, solo por traer recuerdos o anécdotas vividas o escuchadas.
- Efecto *Dumming-Krueger*: aparece en la medida que el ser humano realiza autoevaluaciones al momento de tomar decisiones con superioridad sin tener la capacidad o, en caso contrario, subestimarse.
- Efecto encuadre (*framing effect*): se da cuando no se verifica toda la información recibida. Una misma información puede llevar a diferentes conclusiones.
- Sesgo de confirmación: se presenta al no considerar toda la información disponible sobre el tema y favorecer solo la información que corroboran las propias hipótesis o creencias.
- La maldición del conocimiento: surge cuando personas que sobresalen tienen problemas para ponerse en el lugar de alguien con menos conocimiento.
- Reactancia: se da cuando se proponen cambios. Surge de la amenaza a la libertad de elección.
- La falacia del costo hundido: surge cuando no se separan las emociones de la toma de decisiones.
- El prejuicio de la retrospectiva: se da cuando se reacciona modificando el recuerdo de lo que se pensaba antes, viendo la situación tan obvia que se presenta una predicción del evento antes de que ocurra.
- El efecto anclaje: ocurre cuando no se analiza la información que se obtiene y se queda solo con la primera que llega, lo cual se transforma en ancla.

El proceso de toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas hace parte de un modelo clásico de toma de decisiones racional, por lo que se actúa en un entorno de completa certeza, es decir, que se cuente con toda la información requerida, se involucren todas las alternativas y se controlen las consecuencias del camino a seguir. Una herramienta que permite aplicar el modelo clásico de toma de decisiones es el árbol de decisión, que se elabora así:

**Tabla 7.** Árbol de decisión

Identificación de todas las variables del problema
Priorización
Identificación de la importancia de los criterios
Comenzar a ver variables (fortalezas y debilidades)
Selección de la alternativa
Implementación de la alternativa
Evaluación de la efectividad de la decisión

Fuente: *elaboración propia.*

Con esta información revisada se describe el proceso militar para la toma de decisiones y se indica cómo adaptarlo con la herramienta, para mejorarlo en las operaciones aéreas. El PMTD consta de ocho pasos en cabeza del comandante. Este puede realizar las fases de forma independiente o coordinada con su Estado Mayor, no es un proceso completamente lineal, dado que las variables cambian en cualquier momento y en ocasiones requieren replantear el proceso. El proceso se da así:

- Recibo de la misión.
- Análisis de la misión.
- Desarrollo de los cursos de acción.
- Análisis de los cursos de acción.
- Comparación de los cursos de acción.
- Aprobación del curso de acción.
- Elaboración de planes u órdenes.
- Ensayo, ejecución y evaluación.

La aplicación de planes u órdenes conlleva a la ejecución de las operaciones, en las que se analizó que, con el monitoreo de señales fisiológicas se podría mejorar la toma de decisiones, dado que se presenta información que no se tenía en dicha ejecución.

Dentro de la doctrina de la FAC, si bien es cierto no se plantea en el MADBA un proceso militar de toma de decisiones para la ejecución de operaciones aéreas, se hace énfasis en la necesidad que tiene el comandante de emplear correctamente los principios de la guerra y del poder aéreo, con un equilibrio de decisiones, entre el máximo riesgo que se pueda tolerar sin afectar la institucionalidad y el resultado final de la operación. Esto únicamente se logra con información y aplicación de las variables del proceso de toma de decisiones en forma pertinente.

Reducir al mínimo el riesgo en los procesos de toma de decisiones ha llevado a que se presente la interacción de diversas disciplinas como la medicina y psicología de aviación en la FAC, unidas a ingenierías, con lo cual se han generado modelos más asertivos y no tan reactivos.

La integración de herramientas para mejorar el proceso de toma de decisiones complementaría la forma como se ejecuta hoy, dado que la mayor cantidad de información viene de inteligencia militar (estratégica, operacional y táctica), pero este modelo integra, además, variables que hacen parte de los componentes del poder aéreo, como son las tripulaciones.

Para llegar a la aplicación de herramientas de toma de decisiones que mejoren el proceso se pueden seguir dos posibles métodos, el primero es un método tradicional:

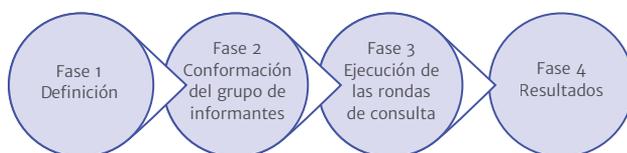
Su punto de partida está en lo ocurrido, por eso se estudia la transición entre el ayer y el ahora, determinando lo que ha permanecido constante y que pueda ser catalogado como “ley” cotejando las diferencias de lo que ha experimentado cambio y, extrapolando, para establecer “hipótesis” sobre las que se fundamentan las decisiones a tomar (Asta, 2000, p. 458).

Se aplica en el corto o mediano plazo para decisiones tácticas, en las cuales las tendencias sufrirán desviaciones pequeñas o su impacto es mínimo frente al valor del objetivo. En la medida en que el nivel de planeación exige pasar a tiempos más amplios, en niveles operacionales y estratégicos, “la influencia del pasado en el futuro se hace más y más imprecisa. Al recorrer las curvas de las ‘tendencias’ pueden presentarse múltiples inflexiones que puedan llevar a conclusiones erradas” (Asta, 2000, p. 459), por lo que se puede, en este caso, optar por emplear la prospectiva.

Asta (2000), citando a Saaty y Boone, dice que “existen cuatro métodos factibles para pronosticar el futuro: por consenso, por extrapolación de tendencias, por análisis histórico y analogía y por la generación sistemática de vías alternativas hacia el futuro” (p. 465), por lo que la herramienta seleccionada para apoyar el proceso militar de toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas debe enfocarse en el consenso, toda vez que el comandante lo hace partiendo del soporte de su Estado Mayor.

Los estudios prospectivos presentan herramientas que facilitan el análisis y están enfocadas en el consenso. El método Delphi, según Reguant y Torrado (2016), es una técnica de recogida de información que permite obtener la opinión de un grupo de expertos a través de la consulta reiterada.

Esta técnica cualitativa es recomendable cuando no se dispone de información suficiente para la toma de decisiones o es necesario recoger opiniones consensuadas y representativas de un colectivo de individuos.



**Figura 44.** Fases del proceso Delphi

Fuente: Reguant y Torrado (2016).

Permite depurar la opinión de expertos, en este caso, el Estado Mayor. Sin embargo, por sí sola no mejoraría el proceso, dado que no concatena los eventos analizados, por lo que se requiere un complemento como la matriz de impacto cruzado, las cuales buscan:

Presentar información probabilística para futuros acontecimientos (supuestos que pueden suceder o no dentro del lapso temporal estimado) y futuros escenarios (configurados por los sucesos). El procedimiento busca no solo la posibilidad de la ocurrencia de eventos en estudio, sino también la de posibles modelos considerando la existencia de relaciones entre acontecimientos, teniendo en cuenta que el hecho de que cualquiera de ellos puede aumentar o disminuir la posibilidad de los demás. Ofreciendo, pues, unos escenarios prospectivos ponderados por su probabilidad de acontecimiento (Asta, 2000, p. 466).

A estos modelos de análisis se les incluye la herramienta propuesta, que proporcionará información sobre condiciones físicas de las tripulaciones al realizar la misión para crear perfiles de los tripulantes y propender porque se tomen decisiones con base en eventos en tiempo real.

Otra de las mejoras al proceso viene dada por la posibilidad de emplear tecnologías de la información. El análisis de los cursos de acción se presenta mediante juegos de guerra, que en últimas, son simuladores desarrollados con tecnología. Se podría llegar a diseñar este tipo de simuladores con inteligencia artificial, es decir, que el propio sistema aprenda de la información y forma de actuar de las tripulaciones para recrear los escenarios en los que deben desempeñarse.

Los actuales sistemas de procesamiento de información continúan en constante evolución de forma vertiginosa, admitiendo la mediación del mando y del nivel que sea, en el ciclo de inteligencia en tiempo real. La interrelación e interoperabilidad de los Sistemas de Mando y Control a nivel global con sistemas de información de inteligencia será total. El mando correspondiente podrá exponer directamente sus necesidades de información sin necesidad de que intervengan otras partes (Asta, 2000).

Por más que se pueda dar un desarrollo tecnológico en el futuro, este no afectará disminuyendo la importancia de la oficiosidad humana en la obtención de información. El hombre siempre será prioritario en cada una de las fases del proceso de toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas, e incluso, lo mejorará, teniendo en cuenta que el comandante que dirige una misión y el personal de apoyo o Estado Mayor podrán trabajar a distancia en un ambiente virtual. Tendrán entonces la posibilidad de intercambiar puntos de vista y analizar en forma conjunta un mismo caso en tiempo real sin necesidad de una condición que establezca presencia física de algún actor, o el desarrollo de operaciones bajo los conceptos de mando centralizado o ejecución descentralizada, teniendo siempre la perspectiva del teatro de operaciones actualizado minuto a minuto.

Tal y como lo afirman Slazinik y Hazen (2018), citando a Deptula, “[...] nuestra capacidad de mandar y controlar (C2) fuerzas aéreas y espaciales se verá afectada por tres tendencias principales relacionadas entre sí: amenazas emergentes, nuevas tecnologías y la velocidad de información”. Y agregan:

Al describir el centro de operaciones de dominios múltiples (MDOC) de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos para el 2035, completo con nuevas divisiones, una adaptación impresionante, capacidades robustas de apoyo electrónico a distancia y una huella menor en el teatro de operaciones, en donde el flujo de información y la toma de decisiones rápidos serán críticos (Slazinik & Hazen, 2018, pp. 2-14).

Este reto permite pensar en el aprovechamiento de las TIC para no solo cambiar las estructuras actuales, también servirá para mejorar los procesos y procedimientos que se realizan en ellas, como es el caso de la toma de decisiones en la ejecución de operaciones aéreas que realizan los Centros de Comando y Control.

## Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con esta investigación, las principales señales fisiológicas para un monitoreo a tripulaciones durante actividades de vuelo o ejercicios en simulador son:

- Señales eléctricas del corazón (electrocardiograma EKG). Permiten detectar la respuesta al estrés.
- Señales temperatura. Complementan la información de las señales eléctricas, debido a que las variaciones de estados de ánimo modifican los valores de temperatura.
- Presión arterial. Permite analizar las reacciones del cuerpo al prepararse para su supervivencia y la posible influencia de las fuerzas de gravedad, en situaciones de vuelo sobre el cuerpo humano.
- Señales respiratorias y saturación de oxígeno. Permiten analizar el comportamiento de las tripulaciones, sabiendo que estas varían en la medida en que se presentan cambios en la mecánica del proceso de respiración, influenciada por factores como la gravedad o las aceleraciones.

El modelo propuesto permite adquirir las señales biométricas más importantes para analizar el comportamiento en los procesos de toma de decisión, por sus variaciones cuando las tripulaciones están sometidas a cargas emocionales. Estas variaciones pueden ser censadas y enviadas a través del sistema de comunicación planteado a un centro de control o a la consola de las cámaras de altura para analizar el comportamiento de las tripulaciones bajo condiciones de vuelo.

El modelo requiere ajustes por ser un proceso lineal racional y la mayor desventaja son los tiempos cortos en que debe desarrollarse. Puede llegar a integrarse en las fases de análisis de la misión y desarrollo de los cursos de acción, herramientas de prospectiva integradas con la obtención y producción de inteligencia en sus tres fases —estratégica, operacional y táctica—.

Dicha herramienta está proyectada para ser aplicada no solo en acciones reales, también puede ser adaptable a procesos de aprendizaje como en simuladores, puesto que desde el entrenamiento se mejoran actitudes y aptitudes.

Se recomienda un centro de comando y control de medicina de aviación, donde sean analizadas tripulaciones para emitir conceptos que establezcan

entrenamientos acordes a las necesidades evidenciadas en el monitoreo de las señales biométricas de las tripulaciones.

Se debe profundizar en la aplicación de prospectiva y otras herramientas que integren la información de las señales fisiológicas para el análisis de situaciones futuras frente a los actuales conceptos de Centros de Comando y Control de Operaciones Aéreas.

Por último, se recomienda analizar la posibilidad de emplear esta herramienta para el seguimiento de tripulaciones en una eventual incursión en carreras espaciales, dada la complejidad y manejo físico que requiere el ser humano en las condiciones dadas en el espacio.

## Referencias

- Alfaro, F. (2018). *Matriz de decisiones*. [http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1624/1624\\_u9\\_Matriz\\_de\\_decisiones.pdf](http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1624/1624_u9_Matriz_de_decisiones.pdf)
- Asta, A. (2000). Inteligencia y planificación en el Ejército. Una aproximación prospectiva. *Arbor*, 165(651), 445-474. <https://doi.org/10.3989/arbor.2000.i651.978>
- Benjumea, C. (1995). *Primer seminario del ciclo de formación sobre investigación y evaluación cualitativa: los procesos, formulación y diseño*. CINDE. <https://www.cinde.org.co/sitio/>
- Bonatti, P. (2007). *Los sesgos y las trampas en la toma de decisiones*. Grandes Pymes. <https://www.grandespymes.com.ar/2015/07/31/los-sesgos-y-las-trampas-en-la-toma-de-decisiones-2/>
- Cardona, M. E., & López, S. (2017). Una revisión de literatura sobre el uso de sistemas de adquisición de datos para la enseñanza de la física en la educación básica, media y en la formación de profesores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39(4). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0308>
- Carpenter, C. (2017). Mando y control de las operaciones conjuntas a través del mando tipo misión. *Air and Space Power Journal*. [https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ\\_Spanish/Journals/Volume-29\\_Issue-1/2017\\_1\\_06\\_carpenter\\_s.pdf](https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ_Spanish/Journals/Volume-29_Issue-1/2017_1_06_carpenter_s.pdf)
- Carrión, P., Ródenas, J., & Rieta, J. (Coord.). (2007). *Procesado de señales biomédicas*. Universidad de Castilla La Mancha.
- Cely, I. J. (2016). *Metrología Biomédica*. ICONTEC. [http://medios.icontec.org/documentos/salud/metrologia\\_biomedica.pdf](http://medios.icontec.org/documentos/salud/metrologia_biomedica.pdf)
- Cengage. (2021, 30 de abril). ¿Qué es la telemetría? Cengage Learning Blog. <http://latinoamerica.cengage.com/que-es-la-telemetria/>
- Clark, T. (2008). La doctrina de planeamiento del Ejército: la identificación del problema es el corazón del problema. *Military Review*. <https://www.armyupress.army>

- mil/Portals/7/military-review/Archives/Spanish/MilitaryReview\_20080630\_arto08SPA.pdf
- Clausewitz, C. (1976). *On War* (Trad. M. Howard & P. Paret). Princeton University Press.
- Conceptos Básicos de NI LabVIEW – National Instruments. (s. f.). <https://www.ni.com/academic/students/learnlabview/esa/tasks.htm>
- Constitución Política de Colombia [Const]. Art. 217. (Colombia). <http://www.constitucioncolombia.com/titulo-7/capitulo-7/articulo-217>
- Convertidor Analógico-Digital labview+Arduino. (s. f.). <https://www.youtube.com/watch?v=ukeTqGom7qk>
- Dodge, J. (2012). Telemetría usando redes de datos de telefonía celular. *Ingeniare*, (11), 67–78. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.11.646>
- Flores, J., & Onofre, A. (1995). *Sistema de adquisición de señales fisiológicas y transmisión por vía telefónica con procesamiento digital*. Universidad Autónoma de México. <https://core.ac.uk/display/225799984>
- Flores, J. (2012). *La doctrina conjunta en Colombia: análisis de la fuerza de tarea conjunta omega*. Instituto de Estudios Políticos y Relaciones Internacionales (IEPRI). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10549>
- Forero, L. (2012). *Modelo para la toma de decisiones militares. Una nueva opción para el ámbito gerencial*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2013). *Manual de Doctrina Básica Aérea y Espacial (MADBA)*. Comando Fuerza Aérea Colombiana. [https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/Planeacion/Manuales/fac-0-e\\_mabda\\_2013.pdf](https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/Planeacion/Manuales/fac-0-e_mabda_2013.pdf)
- Fuerza Aérea Colombiana. (2019). *Misión, visión y funciones*. Fuerza Aérea Colombiana. <https://www.fac.mil.co/es/conozcanos/mision-vision-y-funciones>
- Fuerzas Militares de Colombia & Ejército Nacional. (2014). *Manual Básico de Liderazgo*. EJC 3–86 público. Imprenta y publicaciones de las Fuerzas Militares. <https://bibliodoe.files.wordpress.com/2019/01/ejc-3-86-basico-de-liderazgo.pdf>
- Gallardo, I. (2015). *Diseño de una aplicación digital para la virtualización del primer paso del proceso militar para toma de decisiones en una unidad táctica del ejército de Colombia*. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/6957>
- Gámez, R. (2007). *Comunicación y cultura organizacional en empresas chinas y japonesas*. Juan Carlos Martínez Coll.
- Gary, G. (2002). *Guidelines for the psychological evaluation of aircrew personnel*. *Occupational Medicine: State of the Art Reviews*. Hanley & Belfus, Inc.
- Guerrero, J. (2011). *Ingeniería biomédica*. Universidad de Valencia.
- Godet, M. (2007). Prospectiva estratégica: problemas y métodos. *Cuadernos de LIP-SOR*, 104, 20. <https://n9.cl/fgxz>
- Goleman, D. (1997). *La inteligencia emocional*. Le Libros. <https://ciec.edu.co/wp-content/uploads/2017/08/La-Inteligencia-Emocional-Daniel-Goleman-1.pdf>

- Helmreich, R. (1994). Anatomy of a system accident: The crash of Avianca Flight 052. *The international journal of aviation psychology*, 4(3), 265–284. [https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0403\\_4](https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0403_4)
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2008). *NTP 355: Fisiología del estrés*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. [https://www.insst.es/documentos/94886/326827/ntp\\_355.pdf/doc209e9-026e-4d85-8faf-5a9fcea97276](https://www.insst.es/documentos/94886/326827/ntp_355.pdf/doc209e9-026e-4d85-8faf-5a9fcea97276)
- Johansson, A. (2004, septiembre). *Performance of a radio link between a base station and a medical implant utilising the MICS standard* [conference]. The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Vol. 1, pp. 2.113–2.116). IEEE.
- Jung, L., Byrnes-Preston, P., Hessler, R., Lehmann, T., & Suaning G. (2007). *A dual band wireless power and fsk data telemetry for biomedical implants* [conference]. 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 6.596–6.599). IEEE.
- Juri, I. (2005). *Sistema de monitoreo de parámetros fisiológicos en forma remota*. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba.
- Kline, J. (2012). *Handbook of biomedical engineering*. Elsevier
- Kohan, N., & Macbeth, G. (2008). Los sesgos cognitivos en la toma de decisiones. *International Journal of Psychological Research*, 2(3), 68–73. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/6131>
- Lerma, H. D. (2003). *Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto*. Ecoe Ediciones.
- López, L., López, A., & Sanabria, Y. (2015). Aplicación de la biotelemetría para tres signos vitales. *Ciencia y Poder Aéreo*, 10(1), 179–186. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.428>
- Lozano, G., & Muñoz, A. (2012). Algunos modelos de tomas de decisiones. *Novum*, (2), 102–112. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/novum/article/view/45726>
- Martínez, J. F. (2011). *Bioseñales*. Universidad de Valencia.
- Maurino, D. (1994). Crosscultural perspectives in human factors training: Lessons from the ICAO human factors program. *The international journal of aviation psychology*, 4(2), 173–181. [https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0402\\_5](https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0402_5)
- Meehl, P. (2015). *Clinical versus Statistical Prediction: A Theoretical Analysis and a Review of the Evidence*. Echo Point Books and Media
- Mojica, F. (2005). *La construcción de futuro, Convenio Andrés Bello*. Universidad Externo de Colombia.
- Montoya, A., & Roldan, A. (2007). *Análisis, clasificación y evaluación de accidentes aéreos de la aviación civil en Colombia*. Universidad de San Buenaventura.
- Morillo, D. (2008). *Procesado y transmisión de señales biomédicas para el diagnóstico de trastornos y enfermedades del sueño*. Universidad de Cádiz.
- National Instruments. (2014). *Getting started guide ni 9205*. National Instruments. <http://www.ni.com/pdf/manuals/378020a.pdf>

- National Instruments. (2019). *Qué es Labview*. National Instruments. <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>
- Nieto, N., & Vega, M. (2017). *Diseño de un prototipo de medición de señales fisiológicas utilizadas en Biofeedback*. Universidad Nacional de Córdoba.
- Orford, R., & Silverman, W. (2008). *Pilot health and aeromedical certification. Fundamentals of Aerospace Medicine*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Pilar, J. (2011). *Herramientas para la gestión y la toma de decisiones* (2 ed.). Hanne, 19.
- Popper, R. (2008). *Foresight Concepts and Practice (the process, common methods and practices)*. Instituto de Prospectiva, Innovación y Gestión del Conocimiento; Universidad del Valle.
- Reguant, M., & Torrado, M. (2016). El método Delphi. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 9(2), 87-102. <http://hdl.handle.net/2445/110707>
- Rice University. (2019). *LabVIEW Graphical Programming Course*. OpenStax CNX. <https://cnx.org/contents/VJscm13M@4.6:YvhhFC46@2/LabVIEW>
- Rosado, J. (2011). *Realización de drivers para LabVIEW*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Sánchez, L. (2010). El estudio del factor humano en accidentes de aviación. *Pensamiento Psicológico*, 7(14), 141-153. <https://revistas.javerianacali.edu.co/index.php/pensamientopsicologico/article/view/138>
- Schön, D. (1995). Knowing-in-action: The new scholarship requires a new epistemology. *Change: The Magazine of Higher Learning*, 27(6), 27-34. <https://doi.org/10.1080/00091383.1995.10544673>
- Simon, H. (1957). *Models of Man: Social and Rational- Mathematical Essays on Rational Human Behavior in a Social Setting*. John Wiley & Sons.
- Simuladores en Medicina. Realidad virtual: Introducción y bienvenida*. (2016, 2 de marzo). <http://simuladoresenmedicina1122.blogspot.com/2016/03/simuladores-y-medicina.html>
- Slazinik, M., & Hazen, M. (2018). Comando y control globales para el futuro concepto de operación. *Air & Space Power Journal*. [https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ\\_Spanish/Journals/Volume-30\\_Issue-1/2018\\_1\\_01\\_slazinik\\_s.pdf](https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ_Spanish/Journals/Volume-30_Issue-1/2018_1_01_slazinik_s.pdf)
- Strater, O. (2005). *Cognition and Safety*. Camilibrar.
- Toffler, A., & Toffler, H. (1993). *War and anti-war: Survival at the dawn of the 21st century*. Warner Books.
- Tzu, S. (2003). *El arte de la guerra*. Panamericana.
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2010). *Biometría y normas*. Actualidades de la UIT. <http://www.itu.int/net/itunews/issues/2010/01/05-es.aspx>
- US Converters LLC. (s. f.). *RS232 Pinout*. [http://www.usconverters.com/index.php?main\\_page=page&id=61&chapter=0](http://www.usconverters.com/index.php?main_page=page&id=61&chapter=0)
- Vásquez, J., Ortiz, F., Franco, C., & Aranzazú, C. (2010). *Matriz de priorización para la toma de decisiones*. Universidad del Valle.

- Veloza, J., & Rentería, D. (2007). *Diseño e implementación de un instrumento de monitoreo de señales fisiológicas y alarma para pilotos de aeronaves no presurizadas*. Universidad San Buenaventura.
- Wiegmann, D., & Shapell, S. (2003). *A human Error Approach to Aviation Accident Analysis: The Human Factors Analysis and Classification System*. Ashgate.
- Williams, B. (2011). Heurísticas y sesgos en la toma de decisiones. *Military Review*, 52-65