

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN, NAVEGACIÓN, VIGILANCIA Y METEOROLOGÍA (CNS-MET)  
EN LA GESTIÓN MUNDIAL DEL TRÁFICO AÉREO

RAMIRO ERNESTO VÁSQUEZ DI ZEO  
JAIME ALBERTO HERRERA GRANADOS



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA, SANTANDER, COLOMBIA

2022

SISTEMAS DE COMUNICACIÓN, NAVEGACIÓN, VIGILANCIA Y METEOROLOGÍA (CNS-MET)  
EN LA GESTIÓN MUNDIAL DEL TRÁFICO AÉREO

RAMIRO ERNESTO VÁSQUEZ DI ZEO

JAIME ALBERTO HERRERA GRANADOS

PROYECTO DE GRADO PARA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTOR

JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

DOCENTE INTERNO

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INGENIERÍA ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

BUCARAMANGA, SANTANDER, COLOMBIA

2022

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Firma del director del  
proyecto

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## AGRADECIMIENTOS

*A Stella y Ramiro, mis padres, a quienes debo todo.*

*Ramiro Vásquez Di Zeo*

*Agradecimiento especial a Carlos Gerardo Hernández Capacho por su apoyo y motivación a lo largo de este proyecto.*

*Jaime Herrera y Ramiro Vásquez*

## CONTENIDO

	Página
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
1. <b>EL DESCUBRIMIENTO DE LA NAVEGACIÓN EN LAS ALTURAS, UN BARRIDO HISTÓRICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA SEGURIDAD EN VUELO.</b>	<b>16</b>
2. <b>SISTEMAS DE NAVEGACIÓN</b>	<b>27</b>
2.1 <b>Introducción a los sistemas de navegación</b>	<b>27</b>
2.1.1 Sistema de navegación inalámbrica	<b>27</b>
2.1.2 Sistema de navegación inercial	<b>28</b>
2.1.3 Sistema de navegación por satélite	<b>28</b>
2.1.4 Sistema de aterrizaje por instrumentos	<b>28</b>
2.2 <b>Espectro radio eléctrico</b>	<b>29</b>
2.2.1 Ionosfera	<b>29</b>
2.3 <b>Método de transmisión de ondas de radio</b>	<b>30</b>
2.3.1 Ondas terrestres	<b>30</b>
2.3.2 Ondas espaciales	<b>30</b>
2.3.3 Usos de las frecuencias de radio en la aviación	<b>30</b>
2.4 <b>Modulación de las ondas de radio</b>	<b>31</b>
2.4.1 Modulación de amplitud AM	<b>32</b>
2.4.2 Modulación de frecuencia FM	<b>34</b>
3 <b>SISTEMAS DE COMUNICACIÓN, NAVEGACIÓN, VIGILANCIA Y METEOROLÓGICOS (CNS-MET) EN LA AERONÁUTICA, LA ACTUALIDAD DE LA SEGURIDAD EN LA GESTIÓN DEL TRÁFICO AÉREO.</b>	<b>36</b>

3.1	Antenas equipadas en las aeronaves actuales	36
3.2	<b>Balizas No Direccionales (NDB) y Buscador Automático de Direcciones (ADF)</b>	<b>38</b>
3.2.1	Principio del ADF	39
3.3	<b>Radiofaro Omnidireccional de muy alta frecuencia (VOR) y Equipo Medidor de Distancia (DME)</b>	<b>41</b>
3.3.1	Detección de la señal VOR	44
3.4	<b>Sistema de aterrizaje por instrumentos ILS</b>	<b>47</b>
3.4.1	Localizador	48
3.4.2	Pendiente de deslizamiento Glideslope	49
3.4.3	Balizas marcadoras	50
3.5	<b>Radioaltímetro</b>	<b>52</b>
3.6	<b>Radar meteorológico</b>	<b>54</b>
3.7	<b>Sistema de Alerta de Tráfico y Prevención de Colisiones (TCAS)</b>	<b>57</b>
3.8	<b>Sistema de Control de Tráfico Aéreo (ATC)</b>	<b>61</b>
3.9	<b>Sistema de Posicionamiento Global (GPS)</b>	<b>65</b>
3.9.1	Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS)	67
3.9.2	Segmentación del GPS	67
3.9.2.1	Segmento espacial	68
3.9.2.2	Segmento de control	68
3.9.2.3	Segmento de usuario	69
3.9.3	Principio de posicionamiento del sistema de navegación por satélite GPS	70
3.9.4	Sistema de Aumento de Área Amplia (WAAS)	71
3.10	<b>Sistema de Gestión de Vuelo (FMS)</b>	<b>73</b>
3.10.1	Función de navegación horizontal (LNAV)	74
3.10.2	Función de navegación vertical (VNAV)	74

4.	<b>SISTEMAS DE NAVEGACIÓN EN EL ESPACIO AÉREO COLOMBIANO</b>	<b>77</b>
4.1	Reglamentos aeronáuticos de Colombia	<b>77</b>
4.1.1	Requisitos para el ILS	<b>77</b>
4.1.2	Requisitos del GNSS - Sistema Mundial de Navegación por Satélite	<b>79</b>
4.1.3	Requisitos para el VOR o radiofaro omnidireccional VHF	<b>80</b>
4.1.4	Requisitos para el NDB	<b>81</b>
4.1.5	Requisitos del DME o equipo radio telemétrico UHF	<b>82</b>
4.1.6	Requisitos para las radiobalizas VHF en ruta	<b>83</b>
4.2	Disponibilidad y antigüedad de equipos de navegación	<b>87</b>
4.3	Sistemas de Vigilancia	<b>88</b>
5.	<b>SISTEMAS DE NAVEGACIÓN PARA EL AEROPUERTO DE PALONEGRO EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA, SANTANDER, COLOMBIA</b>	<b>92</b>
5.1	Visita técnica al Radiofaro Omnidireccional VHF ubicado en La mesa de Los Santos	<b>92</b>
5.2	Visita técnica a las zonas restringidas: Pista, Sistema ILS, Torre de control y CGAB del Aeropuerto de Palonegro, en la ciudad de Bucaramanga	<b>99</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>111</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>112</b>
	<b>LISTA DE REFERENCIAS</b>	<b>114</b>

## LISTA DE TABLAS

		<b>Página</b>
<b>Tabla 1.</b>	Antenas de un avión	<b>37</b>
<b>Tabla 2.</b>	Altitud y alcance VOR	<b>46</b>
<b>Tabla 3.</b>	Precisión instrumentos de aproximación y aterrizaje (ILS)	<b>52</b>
<b>Tabla 4.</b>	Configuraciones del SSR	<b>63</b>
<b>Tabla 5.</b>	Sistemas de radioayudas según el plan de navegación aérea colombiano	<b>77</b>
<b>Tabla 6.</b>	Especificaciones de operación del ILS en el espacio aéreo colombiano	<b>78</b>
<b>Tabla 7.</b>	Especificaciones de operación del GPS en el espacio aéreo Colombiano	<b>80</b>
<b>Tabla 8.</b>	Especificaciones de operación del VOR en el espacio aéreo colombiano	<b>81</b>
<b>Tabla 9.</b>	Especificaciones de operación del NDB en el espacio aéreo colombiano	<b>81</b>
<b>Tabla 10.</b>	Especificaciones de operación del DME en el espacio aéreo colombiano	<b>83</b>
<b>Tabla 11.</b>	Especificaciones de operación para las radiobalizas VHF en ruta en el espacio aéreo colombiano	<b>84</b>
<b>Tabla 12.</b>	Sistemas meteorológicos	<b>99</b>



## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Página</b>
<b>Ilustración 1.</b> El vuelo de los hermanos Wright: el primer vuelo de la historia	<b>16</b>
<b>Ilustración 2.</b> Primeros mapas cartográficos de la historia y uso del Sextante	<b>17</b>
<b>Ilustración 3.</b> Faro de la línea aeronáutica de Le Perthus	<b>18</b>
<b>Ilustración 4.</b> Primer vuelo transatlántico	<b>18</b>
<b>Ilustración 5.</b> Arreglo de antenas Adcock, LFR	<b>19</b>
<b>Ilustración 6.</b> Esquema de funcionamiento del sistema LFR	<b>20</b>
<b>Ilustración 7.</b> Estación en tierra de un VOR tipo D	<b>21</b>
<b>Ilustración 8.</b> Receptor LFF a bordo de la aeronave	<b>22</b>
<b>Ilustración 9.</b> Haz de Lorenz, Sistema de aterrizaje a ciegas	<b>23</b>
<b>Ilustración 10.</b> Diagrama polar y patrón de radiación complejo del sistema Consol	<b>24</b>
<b>Ilustración 11.</b> Mapa trazado por el sistema Sonne o Consol	<b>25</b>
<b>Ilustración 12.</b> Espectro radioeléctrico	<b>29</b>
<b>Ilustración 13.</b> Uso de las frecuencias de radio en la navegación	<b>31</b>
<b>Ilustración 14.</b> Portadora de 121.5 MHz	<b>32</b>
<b>Ilustración 15.</b> Señal de información de audio de DC variable	<b>32</b>
<b>Ilustración 16.</b> Señal modulada en amplitud que sale del transmisor	<b>32</b>
<b>Ilustración 17.</b> Señal modulada en amplitud que llega al receptor	<b>33</b>
<b>Ilustración 18.</b> Detección de la portadora modulada	<b>33</b>
<b>Ilustración 19.</b> Señal demodulada	<b>33</b>
<b>Ilustración 20.</b> Señal de audiofrecuencia en la bocina	<b>33</b>
<b>Ilustración 21.</b> Señal a transmitir	<b>34</b>
<b>Ilustración 22.</b> Señal de modulación	<b>34</b>
<b>Ilustración 23.</b> Señal en frecuencia modulada FM	<b>34</b>
<b>Ilustración 24.</b> Distribución general de las antenas en un avión	<b>36</b>
<b>Ilustración 25.</b> Sistema ADF	<b>38</b>
<b>Ilustración 26.</b> Radio baliza no direccional NDB	<b>39</b>
<b>Ilustración 27.</b> Patrón de radiación de las antenas del ADF	<b>40</b>
<b>Ilustración 28.</b> Equipo Medidor de Distancia DME	<b>42</b>
<b>Ilustración 29.</b> Transmisor VOR produciendo señales en 360 grados	<b>43</b>
<b>Ilustración 30.</b> Relación de fase de las dos señales de emisión del VOR	<b>44</b>

<b>Ilustración 31.</b> Detector de frecuencias del VOR	<b>45</b>
<b>Ilustración 32.</b> Indicador VOR	<b>46</b>
<b>Ilustración 33.</b> Patrón ondas de radio del localizador del ILS	<b>48</b>
<b>Ilustración 34.</b> Señal de transmisión del Glideslope del ILS	<b>49</b>
<b>Ilustración 35.</b> Indicación del Glideslope a bordo	<b>50</b>
<b>Ilustración 36.</b> Posición de las radiobalizas marcadoras para el sistema ILS	<b>51</b>
<b>Ilustración 37.</b> Principio del radioaltímetro	<b>52</b>
<b>Ilustración 38.</b> Mediciones del radioalímetro	<b>53</b>
<b>Ilustración 39.</b> Director de actitud de vuelo EADI	<b>54</b>
<b>Ilustración 40.</b> Características de frecuencia acorde a la humedad	<b>55</b>
<b>Ilustración 41.</b> Radar meteorológico y display multifuncional de navegación	<b>55</b>
<b>Ilustración 42.</b> Receptor y antena de un sistema detector de rayos	<b>56</b>
<b>Ilustración 43.</b> Stormscope, pantalla del detector de rayos	<b>56</b>
<b>Ilustración 44.</b> Informe meteorológico enviado a la aeronave	<b>57</b>
<b>Ilustración 45.</b> Estructura del TCAS	<b>58</b>
<b>Ilustración 46.</b> Monitor a bordo de la aeronave del TCAS	<b>59</b>
<b>Ilustración 47.</b> Alarma de acceso (TA) y alarma de intrusión (RA) del TCAS	<b>60</b>
<b>Ilustración 48.</b> Maniobra de eje vertical en el TCAS	<b>61</b>
<b>Ilustración 49.</b> Radar primario de vigilancia (PSR)	<b>62</b>
<b>Ilustración 50.</b> Sistema de Control del Tráfico Aéreo	<b>63</b>
<b>Ilustración 51.</b> Antena ATC	<b>64</b>
<b>Ilustración 52.</b> Información del tráfico aéreo en una pantalla indicadora de posición	<b>64</b>
<b>Ilustración 53.</b> Segmentación del espacio del GPS constituido por 24 satélites NAVSTAR	<b>66</b>
<b>Ilustración 54.</b> Posicionamiento de una aeronave a través del GPS	<b>67</b>
<b>Ilustración 55.</b> Segmento de control del GPS	<b>69</b>
<b>Ilustración 56.</b> Localización GPS	<b>71</b>
<b>Ilustración 57.</b> Localización de la aeronave utilizando 4 satélites	<b>71</b>
<b>Ilustración 58.</b> Cobertura del WAAS	<b>72</b>
<b>Ilustración 59.</b> Pantalla de la unidad de control del FMS	<b>73</b>
<b>Ilustración 60.</b> Típico diagrama de bloque de la interfaz del gestor de vuelo	<b>76</b>
<b>Ilustración 61.</b> Mapa Sistemas de Navegación VOR/DME	<b>85</b>
<b>Ilustración 62.</b> Mapa Sistemas ILS	<b>86</b>
<b>Ilustración 63.</b> Gráfica. Disponibilidad Sistemas de Navegación ILS y VOR/DME (2020) por regiones	<b>87</b>
<b>Ilustración 64.</b> Gráfica. Antigüedad de sistema de navegación	<b>88</b>

<b>Ilustración 65.</b> Mapa Sistemas de Vigilancia SSR (Radar Secundario de Vigilancia)	<b>89</b>
<b>Ilustración 66.</b> Mapa sistemas de vigilancia MLAT (Multilateración)	<b>90</b>
<b>Ilustración 67.</b> Mapa Sistemas de vigilancia ADS (Vigilancia dependiente automática)	<b>91</b>
<b>Ilustración 68.</b> D-VOR mesa de Los Santos, Aeropuerto de Palonegro	<b>92</b>
<b>Ilustración 69.</b> D-VOR mesa de Los Santos, Aeropuerto de Palonegro	<b>93</b>
<b>Ilustración 70.</b> Centro de operación y mantenimiento D-VOR mesa de Los Santos, Aeropuerto de Palonegro	<b>94</b>
<b>Ilustración 71.</b> Conjunto de antenas para efecto Doppler, D-VOR mesa de Los Santos, aeropuerto Palonegro	<b>95</b>
<b>Ilustración 72.</b> Sistema de control Equipo Medidor de Distancia (DME) y VOR	<b>96</b>
<b>Ilustración 73.</b> Sistema de control D-VOR mesa de Los Santos, aeropuerto de Palonegro	<b>97</b>
<b>Ilustración 74.</b> Sistema de control DME mesa de Los Santos, aeropuerto de Palonegro	<b>98</b>
<b>Ilustración 75.</b> Estación meteorológica a inicio de pista	<b>100</b>
<b>Ilustración 76.</b> Estación meteorológica a mitad de pista	<b>101</b>
<b>Ilustración 77.</b> Estación meteorológica a final de pista	<b>102</b>
<b>Ilustración 78.</b> Detector de nubosidad por medio de luz infrarroja al borde de la pista de aterrizaje	<b>103</b>
<b>Ilustración 79.</b> Puesto de control del ILS	<b>104</b>
<b>Ilustración 80.</b> Panel de supervisión del Glideslope	<b>105</b>
<b>Ilustración 81.</b> Módulo de control del Glideslope	<b>105</b>
<b>Ilustración 82.</b> End-Fire Antenna System para el glideslope	<b>106</b>
<b>Ilustración 83.</b> Luces indicadoras P.A.P.I. indicador de trayectoria de aproximación de precisión	<b>107</b>
<b>Ilustración 84.</b> Antena localizador ILS Palonegro	<b>107</b>
<b>Ilustración 85.</b> Arreglo antenas localizador ILS Palonegro	<b>108</b>
<b>Ilustración 86.</b> Puesto de control antena localizador ILS del aeropuerto Palonegro	<b>109</b>
<b>Ilustración 87.</b> Sistema ADS-B aeropuerto de Palonegro, Bucaramanga	<b>110</b>

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** SISTEMAS DE COMUNICACIÓN, NAVEGACIÓN, VIGILANCIA Y METEOROLOGÍA (CNS-MET) EN LA GESTIÓN MUNDIAL DEL TRÁFICO AÉREO

**AUTOR(ES):** Ramiro Ernesto Vásquez Di Zeo  
Jaime Alberto Herrera Granados

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** Juan Carlos Mantilla Saavedra

### RESUMEN

Actualmente el transporte aéreo es el modo de transporte más seguro en el mundo, cuando un avión llega sano y salvo a su destino se suele otorgar la responsabilidad al piloto de la aeronave, sin embargo, aunque su papel es de suma importancia en el desarrollo del vuelo, existen numerosas áreas que intervienen en la seguridad del transporte aéreo. Los sistemas de comunicación, navegación, vigilancia y meteorología (CNS-MET) hacen parte de las distintas áreas de apoyo aeronáutico como la vigilancia radar y los sensores meteorológicos; destacándose los instrumentos de radioayuda ubicados en tierra y a bordo de la aeronave como soporte a la seguridad aérea. La presente propuesta de trabajo de grado pretende bajo consigna investigativa realizar una revisión y documentación detallada de los sistemas de comunicación, navegación, vigilancia y meteorología (CNS-MET) utilizados en la navegación aérea a nivel mundial, expone la importancia, significado, clasificación, utilidad y necesidad en el mundo de la aeronáutica, y su aplicación en Colombia con el caso de estudio del aeropuerto de Palonegro en la ciudad de Bucaramanga.

### PALABRAS CLAVE:

Navegación aérea, Sistemas de comunicación, Radio navegación, Meteorología, CNS/ATM

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** COMMUNICATION, NAVIGATION, SURVEILLANCE AND METEOROLOGYSYSTEMS (CNS-MET) IN GLOBAL AIR TRAFFIC MANAGEMENT

**AUTHOR(S):** Ramiro Ernesto Vásquez Di Zeo  
Jaime Alberto Herrera Granados

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR:** Juan Carlos Mantilla Saavedra

### ABSTRACT

Currently, air transportation is the safest mode of transportation in the world, when an aircraft arrives safely to the destination, the credit is usually given to the pilot of the aircraft, even though his role is very important, in the development of the flight, there are many areas involved in the safety of air transportation. The communication, navigation, surveillance and meteorology systems (CNS-MET) are part of the different areas of aeronautical support such as radar surveillance and meteorological sensors; highlighting the radio aid instruments located on the ground and on board the aircraft as support for air safety. This work degree proposal pretends, under investigative objectives, to carry out a review and detailed documentation of the communication, navigation, surveillance and meteorology systems (CNS-MET) used in air navigation worldwide. Exposes the importance, meaning, classification, usefulness and necessity in the world of aeronautics, and its application in Colombia with the case study of the Palonegro Airport in the city of Bucaramanga.

### KEYWORDS:

Air Navigation, Communication Systems, Radio Aids to Navigation, Meteorology,CNS/ATM

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## INTRODUCCIÓN

Las radioayudas son un conjunto de sistemas configurados en tierra y a bordo de las aeronaves que tienen como fin asegurar el éxito del vuelo, desde la creación e implementación de la aeronáutica a principios del siglo XX, su incursión en el servicio postal y su posterior expansión en la primera Guerra mundial surgió la necesidad de emplear sistemas para monitorear el seguimiento y control de las aeronaves, con el nacimiento de las primeras compañías aéreas se hizo necesario la implementación de sistemas que apoyaran al piloto en la toma de decisiones, se empezó a recolectar información valiosa a cerca de las condiciones de la pista, la dirección del viento y la existencia de otro vehículo en la zona, la primera respuesta a esta necesidad fue la creación de aerobalizas luminosas las cuales guiaban el recorrido del aeromotor, con el avance de la tecnología se crearon sistemas basados en ondas electromagnéticas, los cuales no solo permitían guiar al piloto en ruta sino que también proporcionaban ayuda para la aproximación y aterrizaje en pista. Estos sistemas fueron desarrollándose desde pequeñas redes de radiofaros hasta los más complejos sistemas de telecomunicaciones utilizados actualmente.

A mediados del siglo XX la información que se tenía acerca de las rutas de vuelo para los aviadores era insignificante, faros luminosos ubicados en barcos a través del océano y herramientas de medición astronómica ayudaban a los pilotos a ubicarse en el recorrido, no obstante surge la necesidad debido a las grandes distancias recorridas y la morfología del terreno de crear ayudas cimentadas en protocolos de comunicación para la ubicación y seguridad de la aeronave, estas ayudas basadas en radiofaros constituyen lo que se denomina como radioayudas, que actualmente forman parte de los sistemas CNS (comunicación, navegación y vigilancia) incluyendo todos los equipos y sistemas de comunicaciones aeronáuticas, sistemas de radio en tierra, redes, ayudas visuales de iluminación, control de vuelo, automatización y sistemas electromecánicos.

Este estudio está orientado a comprender de que manera operan los instrumentos que posibilitan la navegación aérea durante las diferentes etapas del vuelo, así como los procesos necesarios para garantizar su seguridad.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el estado del arte de los sistemas de comunicación, navegación, vigilancia y meteorología en la gestión mundial del tráfico aéreo y su influencia en la navegación aérea teniendo como caso de estudio el aeropuerto Palonegro de Bucaramanga.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Documentar el estado del arte de los sistemas de comunicaciones, radioayudas, radar y sensores meteorológicos en el ámbito de la aeronáutica.
- Clasificar los sistemas comunicación, navegación, vigilancia y meteorología en la gestión del tráfico del espacio aéreo colombiano.
- Realizar un análisis de la influencia de los sistemas de comunicación, navegación, vigilancia y meteorología en la navegación aérea, teniendo como caso de estudio el aeropuerto Palonegro de Bucaramanga.
- Proponer como resultado un plan de trabajo futuro alrededor de esta temática en la universidad: simulaciones, desarrollo de prototipos, etc.

## 1. EL DESCUBRIMIENTO DE LA NAVEGACIÓN EN LAS ALTURAS, UN BARRIDO HISTÓRICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA SEGURIDAD EN VUELO

En la década de 1900 y de la mano de los hermanos Wright quienes inspirados en el mundo de la aviación empezaron a diseñar una aeronave que solucionara los problemas de potencia, control y aerodinamismo presentados hasta la época, el horizonte de la aviación empezó a vislumbrar sus primeros avances cuando en 1902 se logró planear exitosamente el primer aeromotor más pesado que el aire, el viaje duró 12 segundos recorriendo 40 metros, este hecho convirtió a los hermanos Wright en los primeros que por medio de rigurosas pruebas lograron realizar de manera exitosa el primer vuelo de la historia en un avión controlado [1].

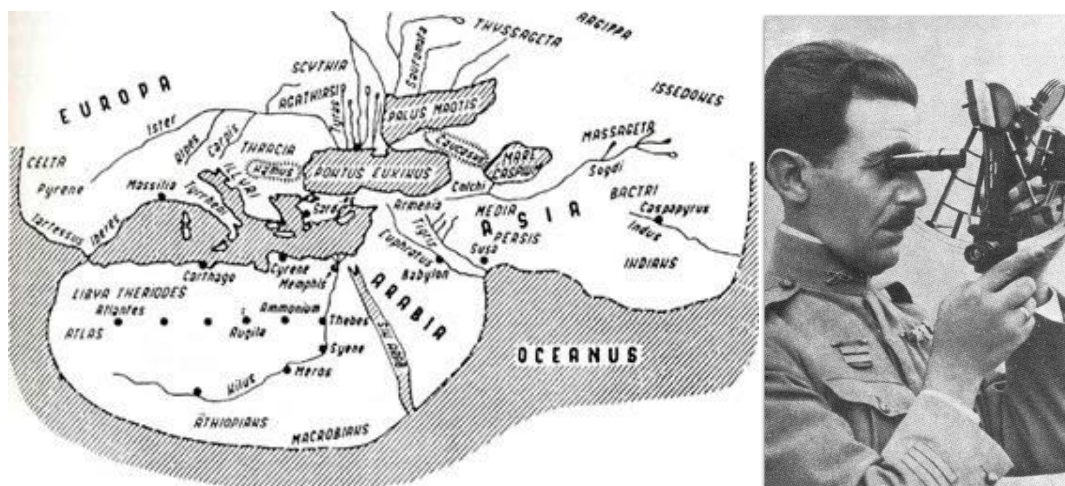


*Ilustración 1. El vuelo de los hermanos Wright: el primer vuelo de la historia <sup>1</sup>*

Durante los prolegómenos de la aviación se determinaba fácilmente la ubicación y el comportamiento de las máquinas en vuelo, estos parámetros eran definidos por la composición del terreno el cual se avistaba desde el aire, y tomó el nombre de navegación observada. Con la llegada de la Primera Guerra Mundial y el uso de aeronaves para el lanzamiento de propagandas y bombas en ciudades enemigas se logró el mayor avance conceptual de la guerra aérea que luego se extendería al ámbito civil, en 1911 en la guerra Ítalo-Turca se realizó el primer vuelo de reconocimiento en el que se elaboraron mapas que contenían las características del terreno, datos que eran depositados en bitácoras para ser utilizados posteriormente por otros pilotos [2].



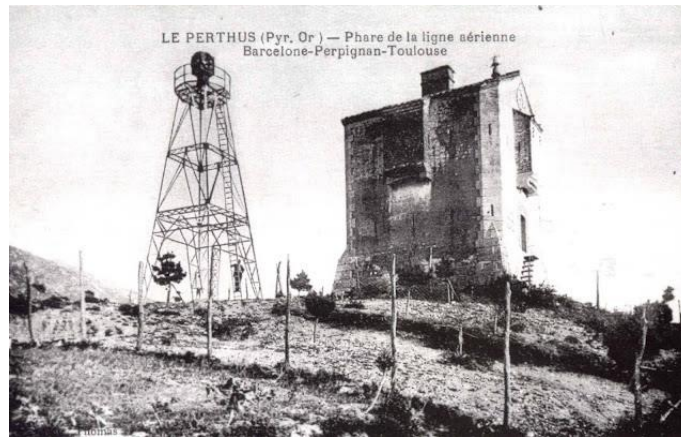
Con la ambición de realizar vuelos más largos, se inició la creación de ciertas rutas que lograran integrar puntos registrados por los que el avión debía desplazarse sirviendo como soporte para el piloto, con la ayuda de instrumentos a bordo de las aeronaves como relojes, brújulas, altímetros y anemómetro, se estimaba la posición aproximada del avión calculada por la ecuación  $\text{Distancia} = \text{Velocidad} \times \text{Tiempo}$  documentando el recorrido, este tipo de navegación tomó el nombre de navegación a la estima, sin embargo no era tan confiable debido a la variación de los factores meteorológicos y la calibración de los instrumentos de medida, además no era una opción viable en condiciones de baja visibilidad, mar abierto o vuelos nocturnos, razón por la cual se introdujo el papel del navegante en la cabina del avión, este asistía al piloto en vuelo y realizaba cálculos con instrumentos como sextantes y astrolabios para determinar la posición de la aeronave, se le denominó navegación astronómica y nuevamente debido a la complejidad en los cálculos y la precisión de pilotaje se incurrió en errores de posicionamiento, muchos de ellos incorregibles durante la marcha, se hizo necesario la edificación de un método que asistiera a las aeronaves en vuelo basadas en ayudas instaladas en tierra, con esta premisa se crearon las primeras rutas apoyadas en faros luminosos ubicados en tierra que posteriormente y debido a la influencia de las transmisiones de radiofrecuencia avistadas a principios de siglo XX fueron sustituidas por radiofaros para lograr este cometido.



*Ilustración 2. Primeros mapas cartográficos de la historia y uso del sextante <sup>2</sup>*

La aparición de los sistemas de ayudas a la navegación ubicados en tierra

facilitó las maniobras de despegue y aterrizaje de las aeronaves, solucionó el tránsito de aviones en condiciones de poca o nula visibilidad, ocasionando el incremento del número de aeronaves planeando en un mismo espacio por lo tanto fue necesario controlar el tráfico aéreo desde tierra y crear normativas que regularan el uso del espacio y los procedimientos que las aeronaves debían seguir.



*Ilustración 3. Faro de la línea aeronáutica de Le Perthus <sup>3</sup>*

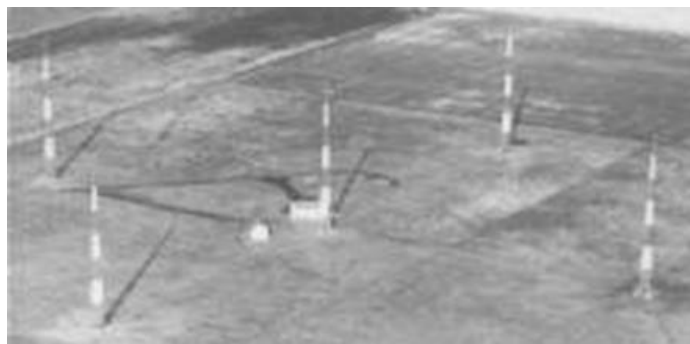
Con la creación del servicio postal aeronáutico de los Estados Unidos surgió el reto de transportar de manera continua la correspondencia bajo condiciones meteorológicas adversas, fue así como en 1919 se realizó el primer vuelo que cruzó el océano atlántico, para esto se ideó un sistema basado en torres luminosas posicionadas en barcos a lo largo del océano, las cuales obedecían una ruta específica y emitían destellos que servían de orientación para el piloto en el aire, el experimento fue tan exitoso que se construyó la primera red de aerofaros implementados para la ayuda de las aeronaves en el servicio postal.



*Ilustración 4. Primer vuelo transatlántico <sup>4</sup>*

Hasta el momento, los vuelos nocturnos solo podían realizarse bajo el sistema de navegación astronómica, con la implementación de rutas virtuales formadas por los haces de luz emitidos por los faros, la precisión en el tratamiento de la información correspondiente a la ubicación de la nave mejoró en gran medida, en 1924 se inició de forma definitiva el tráfico de vuelos nocturnos, produciendo un gran avance en la navegación aérea, no obstante, este sistema, aunque era efectivo presentaba varios problemas: solo era útil durante la noche o bajo buenas condiciones atmosféricas ya que de día era imposible distinguir las señales luminosas emitidas por los faros, las maniobras de despegue y aterrizaje de la aeronave aun eran demasiado peligrosas por la poca visibilidad del terreno y la altitud de los vuelos era relativamente baja consecuencia del alcance de los faros.

A finales de la década de 1920 considerando las limitaciones presentadas por el sistema de aerofaros en condiciones de poca visibilidad, científicos e ingenieros propusieron una solución para la navegación asistida basada en una red de señales de radiofrecuencia direccionales [3] la cual ayudaría a los pilotos bajo cualquier condición atmosférica, en 1929 el entonces teniente y luego coronel James Harold Doolittle realizó el primer vuelo sin visibilidad exterior [4], apoyándose exclusivamente en instrumentos recientemente creados como el indicador de actitud de vuelo y el girocompás para mantener la actitud y rumbo de la aeronave, acompañado de un sistema de radio direccional de baja frecuencia especialmente diseñado para volar desde y hacia el aeropuerto, este sistema fue intencionalmente construido para vuelos de demostración, sin embargo para que el vuelo asistido en radioayudas fuera practico la tecnología tenía que ser confiable, producida en masa y ampliamente desplegada tanto en tierra como en la flota de aviones[3], como consecuencia del éxito del experimento se empezaron a implementar los primeros sistemas LFR (Low Frequency Radio Range) para asistir a los aviones en vuelo.



*Ilustración 5. Arreglo de antenas Adcock, LFR <sup>5</sup>*

Para la emisión de señales en tierra que constituían un curso navegable se utilizó inicialmente antenas de bucle, esta tecnología fue implementada por el departamento de comercio de los Estados Unidos el 30 de junio de 1928 [5] no obstante debido a las falencias en la emisión de señales nocturnas sería sustituido en 1932 por un arreglo de antenas Adcock de precisión superior [6], esta red de antenas era ubicada estratégicamente a lo largo de todo el país, a menudo cerca de los aeropuertos más importantes, cada estación se componía de cuatro antenas de 41 metros erigidas en las esquinas de un área cuadrada de 130 metros de lado[5], las estaciones emitían señales electromagnéticas direccionales en código Morse a 1500 W en cuatro cuadrantes, un par de cuadrantes modulaba la señal para la letra A (-·-) mientras que el cuadrante opuesto modulaba la señal para la letra N (-·), como referencia del norte verdadero, en el momento en el que se intersecaban los cuadrantes las dos señales se fusionaban formando un tono de audio de 1020 Hz que definía la vía aérea, en ocasiones se transmitía una señal adicional que contenía información acerca de las condiciones climáticas locales, regularmente los sistema LFR eran acompañados de aerofaros utilizados como respaldo visual, especialmente en vuelos nocturnos [7].

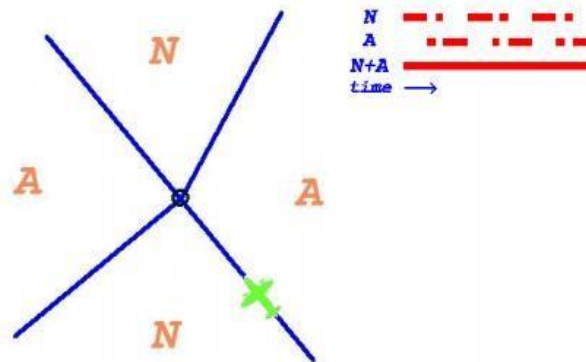


Ilustración 6. Esquema de funcionamiento del sistema LFR <sup>6</sup>

Para la recepción de señales en vuelo se propuso dos soluciones, una diseñada por el cuerpo de señales del ejército de los Estados Unidos (USASC) basada en un flujo de señales de audio que los aviadores militares recibían a través de un auricular, por otro lado los pilotos civiles, en su mayoría pilotos de correo aéreo manifestaron que las señales de audio serían molestas y difíciles de usar sobre todo en vuelos largos, por lo que se prefirió una solución visual, con un indicador en el panel de instrumentos [3], aunque esta última

propuesta era más confiable, fácil de usar y casi inmune a señales erróneas el gobierno de los Estados Unidos prefirió estandarizar la recepción de señales auditivas en las aeronaves para las próximas décadas [6].

Los sistemas LFR influyeron en gran medida a la organización de las entidades responsables del uso del espacio aéreo civil y militar, no obstante, a pesar de haber sido el primer conjunto de radioayudas ampliamente aceptado, contaba solo con cuatro direcciones de curso por estación, era sensible a las interferencias y requería que los pilotos escucharan durante todo el recorrido señales molestas de ruido incrustadas en el fondo, fue sustituido en su totalidad alrededor de 1950 con la llegada de nuevas tecnologías, en esta década se desarrollaría e implementaría en los Estados Unidos el sistema de navegación VOR (Omnidireccional Radio Range) de banda VHF (Very High Frequency), con 360 direcciones de curso disponible, un indicador visual en el panel que sustituía a las señales auditivas, prácticamente inmune a las interferencias y mucho más fácil de usar [8].

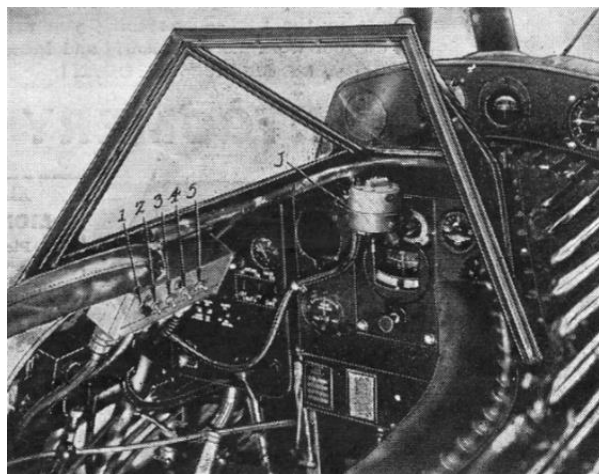
El VOR designado para la navegación en ruta determina el ángulo entre la dirección que une a la aeronave con la estación en tierra y la dirección del norte magnético, pero no fue hasta la década siguiente que se convertiría en el principal sistema de radionavegación aérea y actualmente el sistema estándar en el mundo [9].



*Ilustración 7. Estación en tierra de un VOR tipo D<sup>7</sup>*

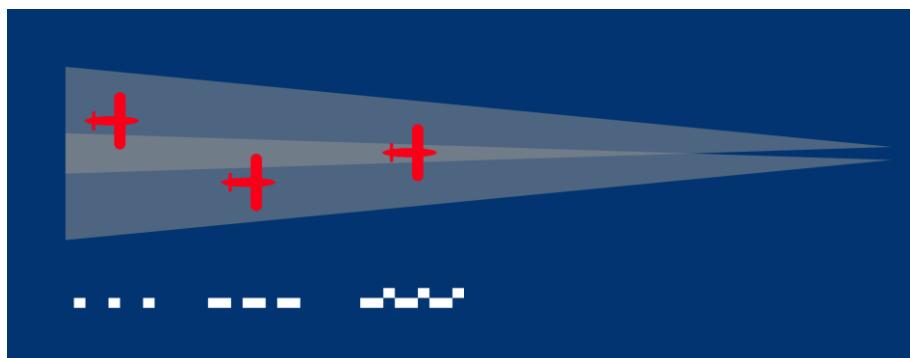
A finales de la década de 1990 había más de 3000 estaciones VOR operando alrededor del mundo, incluidas 1033 en los Estados Unidos que luego se reducirían a 967 en 2013 [14], a partir de 2005 muchos aeropuertos desmantelaron sus sistemas VOR reemplazándolos por la adopción de nuevas tecnologías como el GPS, actualmente consecuencia de los elevados costos, muchos aviones de pequeña capacidad se ven limitados a equiparse con esta tecnología [14].

Uno de los sistemas más importantes de radioayudas para la aproximación y el aterrizaje aéreo empezó a construirse alrededor de 1930 bajo el liderazgo de Ernst Kramar, pionero de la navegación por radio e ingeniero de la empresa C. Lorenz AG en Berlín. El sistema pasó por diferentes fases de diseño a lo largo de los años según la tecnología lo permitiera, en principio Kramar basado en los sistemas LFR desarrolló el “Haz de Lorenz” un sistema de corto alcance que combinaba un localizador con un sistema de senda de planeo utilizado para la asistencia en la aproximación al aterrizaje, también llamado “LFF” o “Ultra-short-wave landing radio beacon”, basado en un arreglo de antenas, un transmisor y el apoyo de radiobalizas el piloto escuchaba una serie de señales dependiendo en la posición que se encontrara referente al centro de la pista, el piloto escuchaba una sucesión de puntos si se situaba a la izquierda, una serie de líneas si se situaba a la derecha, pero si se situaba en el centro podía escuchar una señal de audio continua lo que indicaba que su posición con respecto a la pista de aterrizaje era centrada.



*Ilustración 8. Receptor LFF a bordo de la aeronave<sup>8</sup>*

El piloto debía estar todo el tiempo atento a la recepción de las señales, para mitigar este esfuerzo, posteriormente se incluirían indicadores en los paneles de control de la aeronave que ilustraban la dirección hacia el eje de la senda de aterrizaje como se observa en la ilustración 9, y se añadirían lámparas de neón sobre la pista de aterrizaje indicando el paso por las radiobalizas.



*Ilustración 9. Haz de Lorenz, Sistema de aterrizaje a ciegas<sup>9</sup>*

Tras el éxito del Haz de Lorenz Ernst Kramar desarrolló para la empresa Lufthansa un sistema de mayor alcance llamado “Elektra” destinado a la creación de aerovías entre aeropuertos, en vuelo, el piloto recibía señales de radiofrecuencia en código Morse referentes a su posición sobre la aerovía, sin embargo la detección de las aeronaves solo se podía hacer si esta se encontraba sobre el Haz de Lorenz que unía el punto de partida y el punto de llegada del avión, si el piloto se encontraba por fuera del haz no recibía información lo que hacía vulnerable al sistema, de este modo solo se proporcionaba información de la nave sobre una ruta específica, sin embargo no se determinaba con exactitud su posicionamiento, factores como la intensidad de las señales en vuelos nocturnos la cual era notoriamente baja, terminaron por condenar los sistemas Elektra instalados en Alemania.

Durante la Segunda Guerra Mundial se utilizaron muchos sistemas de navegación hiperbólicos, un tipo de navegación en el que se localizan los puntos de intersecciones de hipérbolas mediante el tratamiento de señales con el fin de ubicar la aeronave [15], el “Sonne” o “Consol” fue una modificación a los sistemas Elektra llevada a cabo por el ingeniero Kramar que basaba su funcionamiento bajo esta premisa, el sistema pretendía



solucionar el problema del posicionamiento de la aeronave en cualquier momento del vuelo rotando electrónicamente la señal recibida por el piloto para crear una serie de haces que atravesaran el cielo.

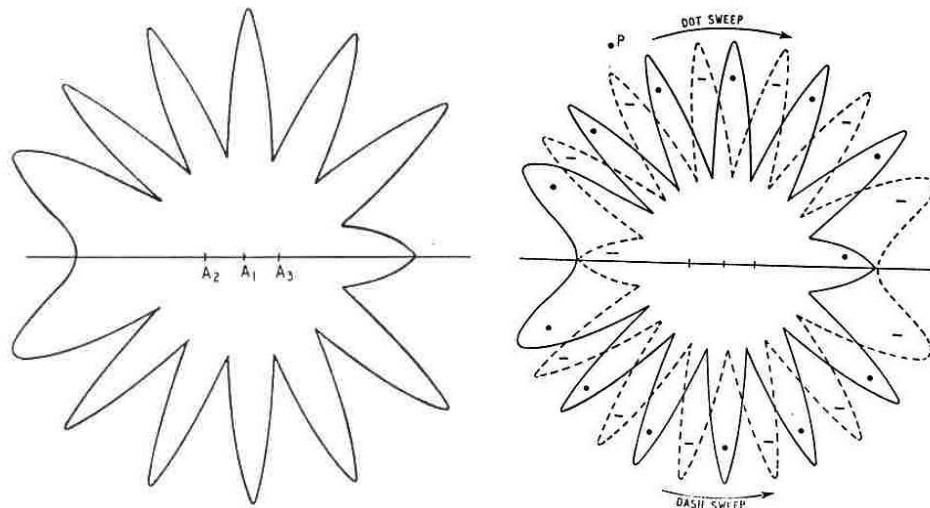


Ilustración 10. Diagrama polar y patrón de radiación complejo del sistema Consol <sup>10</sup>

Sonne basaba su funcionamiento en un trio de antenas y un transmisor, la estación enviaba una señal a la antena central que era separaba en dos partes, siguiendo el patrón del Haz de Lorenz una de las antenas laterales emitía una señal de puntos en código Morse, la antena restante emitía las señales de líneas también en código Morse, en todo instante la antena central y una de las antenas laterales estaban en funcionamiento creando un patrón cardioide, cada minuto y solo una vez, se emitía una señal perteneciente a la identificación de la estación transmisora, a bordo de la aeronave se precisaba de un receptor de onda larga y usando una sincronización simple de la señal, el navegador podía determinar el ángulo de la estación sin la necesidad de un indicador.

Un observador situado en el punto P en la gráfica de la derecha en la ilustración 10 conocerá por medio de otros medios de navegación el patrón con respecto a la baliza, Luego de escuchar el tono de indicación de las balizas, escuchará una serie de guiones que, a medida que gira el diagrama



polar, después de un tiempo, se fusionarán en un tono continuo después del cual se escucharán puntos. Al contar el número de guiones antes de la señal se puede calcular la ubicación precisa del observador con respecto a la baliza. En la práctica, los gráficos se emiten con una superposición de grandes círculos que divergen de la baliza numerados con el número de caracteres (ya sean puntos o guiones) que se escucharán antes de la señal.



Ilustración 11. Mapa trazado por el sistema Sonne o Consol <sup>11</sup>

Sonne fue uno de los primeros sistemas que permitía ser usado por un número ilimitado de usuarios promoviendo un gran aporte para la navegación global, además determinaba con alto grado de precisión la posición de una aeronave en cualquier instante, lo que significó para Alemania una gran ventaja durante la Segunda Guerra Mundial, en 1940 instalaría sus dos primeras estaciones en España y luego con las conquistas del ejército alemán los sistemas Sonne se propagarían por gran parte de Europa, tanto así que el sistema se utilizaría por las fuerzas del Reino Unido post guerra para la navegación a largo alcance bajo el nombre de Consol [16], durante 1950 y 1960 se construyeron nuevas estaciones en todo el mundo que operarían hasta finales de la década de 1980.

El conjunto de sistemas desarrollados por el equipo del ingeniero Ernst Kramar contribuyó a la constitución del sistema de aterrizaje por

instrumentos (ILS) utilizado actualmente.

Actualmente los ILS son los sistemas que figuran como normativa para la aproximación y aterrizaje de una aeronave, sin embargo con la llegada del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se estudian diversas alternativas para incorporar mejoras a los sistemas, en 2011 el Servicio Europeo de Navegación Geoestacionaria (EGNOS) fue certificado para uso en aplicaciones de seguridad de la vida [18], de igual forma los Sistemas de Aumentación Basado en Tierra (GBAS) adelantan la certificación de sus primeras instalaciones terrestres en países como Estados Unidos, España y Alemania para la ayuda de la aproximación y aterrizaje de aeronaves.

## **2. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN**

### **2.1 Introducción a los sistemas de navegación**

la navegación es una técnica que proporciona información referente a un vehículo móvil en el accionar de su desplazamiento desde un punto a otro, abarcando aspectos como su curso, posición actual, orientación y distancia recorrida.

Los 4 sistemas de navegación utilizados en la aeronáutica actualmente son:

#### **2.1.1 Sistema de navegación inalámbrica**

La radionavegación es un método para obtener información como la ubicación, la defensa y la distancia necesarias para la operación de una aeronave utilizando ondas de radio transmitidas desde instalaciones de apoyo a la navegación por radio en tierra.

Los dispositivos utilizados para este propósito son:

- Radiobalizas no direccionales (NDB)
- Equipo de medición de distancia (DME)
- Buscador automático de dirección (ADF)
- Radiofaro omnidireccional VHF (VOR)
- Sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS)

El sistema de navegación NDB / ADF en conjunto, es el sistema más antiguo de ayuda a la navegación y aún suele utilizarse, la estación NDB es una especie de radiofaro con una antena no direccional y el ADF o buscador de dirección automático desempeña el papel de receptor, determinando la dirección del NDB.

El sistema VOR que posee la aeronave se utiliza para recibir ondas de radio VHF de una estación VOR en tierra con el propósito de conocer la dirección magnética de la misma, por su parte el sistema DME en la aeronave realiza una señal de pregunta a la estación DME en tierra, calculando la distancia correspondiente por medio del tiempo de retardo de propagación de la señal. Por lo general, la estación VOR y la estación DME se instalan juntas y se llaman VOR / DME para que la dirección y la distancia se puedan conocer en conjunto.

### **2.1.2 Sistema de navegación inercial**

Es utilizada cuando se vuela en espacios donde no hay instalaciones en tierra de apoyo a la navegación, también se llama navegación autónoma debido a que realiza autocálculos de la posición y dirección actuales utilizando el giroscopio a bordo. La navegación inercial permite volar con precisión a lo largo de una ruta de vuelo, incluso en lugares donde no hay instalaciones de apoyo terrestre, como el océano pacífico.

### **2.1.3 Sistema de navegación por satélite**

Es definido como un sistema de navegación de próxima generación constituyendo un método para medir la posición utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), las aeronaves requieren información de ubicación en 3D, a diferencia de los automóviles, por lo que utilizan 4 o más satélites GPS para reconocer su ubicación y altitud.

### **2.1.4 Sistema de aterrizaje por instrumentos**

Es un sistema que utiliza ondas de radio para guiar el aterrizaje desde la pista apoyando el proceso (ILS).

## 2.2 Espectro radio eléctrico

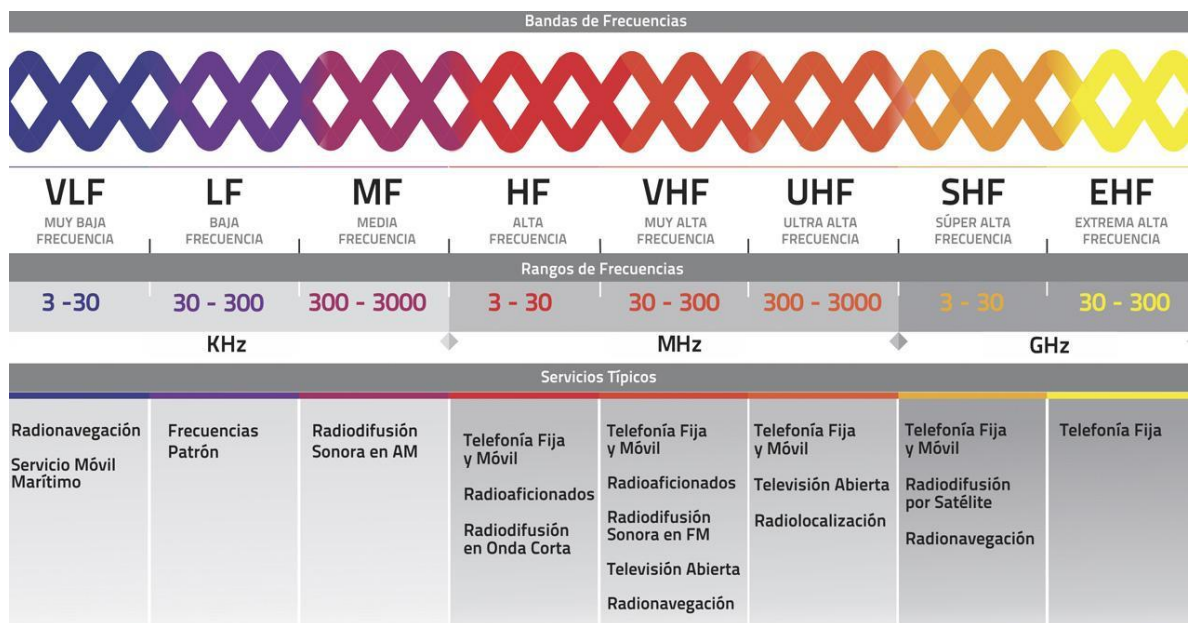


Ilustración 12. Espectro radioeléctrico <sup>12</sup>

### 2.2.1 Ionosfera

A más de 50 km sobre el suelo, hay un área densa de iones y autógenos ionizados por los rayos ultravioleta del sol, llamada ionosfera, la cual se compone por 3 capas:

- Capa D: A una altura de unos 70 km sobre el suelo, las ondas cortas (HF) y medias (MF) son absorbidas y debilitadas, y la onda larga (LF) es reflejada. Esta capa desaparece por la noche.
- Capa E: A una altura de unos 100 km sobre el suelo, refleja las ondas ultralargas (VLF), las ondas largas (LF) y las ondas medias (MF).
- Capa F: Se divide en Piso F1, que está a unos 200 km sobre el suelo, y Piso F2, que tiene unos 350 km de altura, el Piso F1 se destruye por la noche. La capa F refleja las ondas cortas (HF).

Las bandas de onda ultracorta (VHF) y superiores no penetran en la ionosfera ni reflejan.

## **2.3 Método de transmisión de ondas de radio**

### **2.3.1 Ondas terrestres**

- Ondas superficiales: propagación a lo largo de la superficie de la tierra (rango cercano: VLF, LF, MF, HF)
- Onda directa: directamente de la antena transmisora a la antena receptora (rango cercano: VHF, UHF, SHF)
- Onda reflectante superficial: se refleja desde la superficie y llega a la antena receptora (rango cercano: VHF, UHF)

### **2.3.2 Ondas espaciales**

Las ondas de radio disparadas al aire son reflejadas, refractadas y propagadas por la ionosfera o troposfera.

Incluye ondas de troposfera (rango: VLF, LF, MF, HF, ondas de troposfera de campo lejano: VHF, UHF, SHF)

### **2.3.3 Usos de las frecuencias de radio en la aviación**

En la ilustración 13 se muestra las frecuencias de radio utilizadas para los diferentes sistemas de navegación, comunicación, vigilancia y meteorología en la aviación actual.

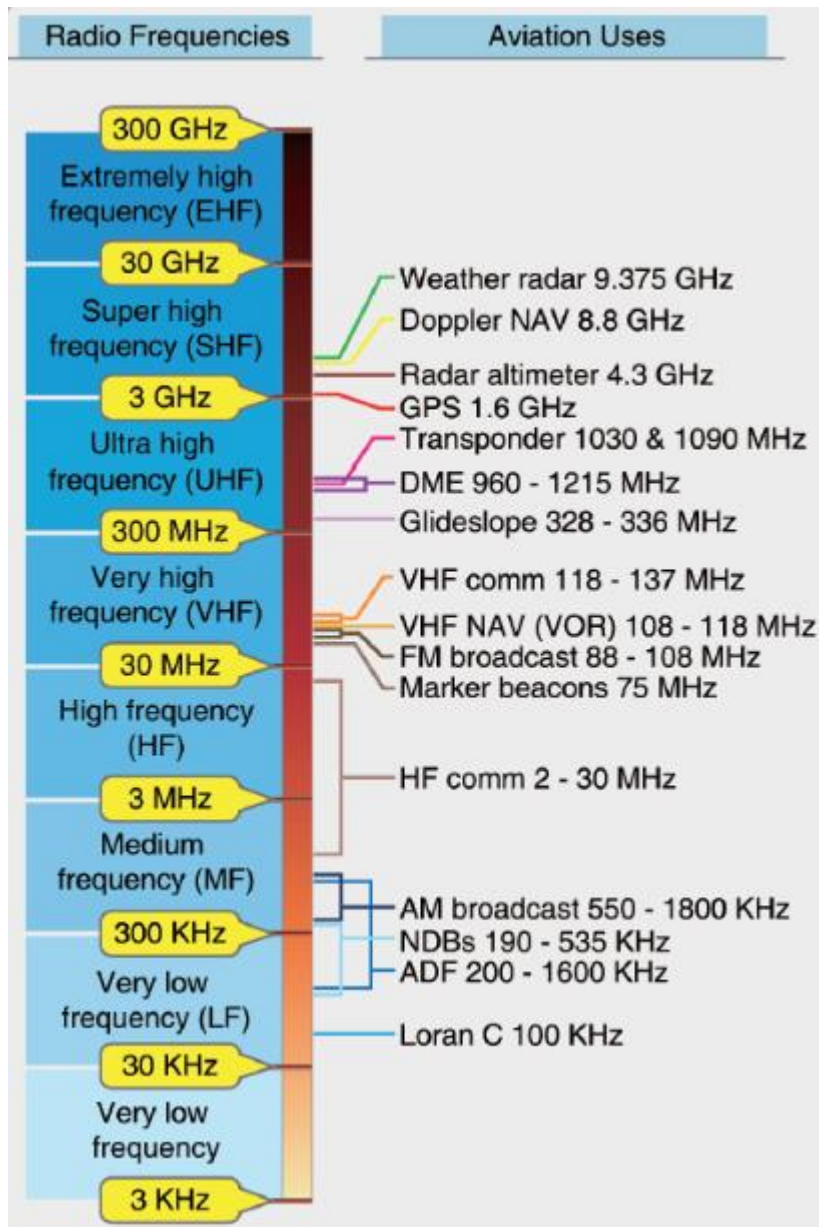


Ilustración 13. Uso de las frecuencias de radio en la navegación <sup>13</sup>

## 2.4 Modulación de las ondas de radio

La modulación se refiere al proceso de cargar una voz o señal en una señal portadora. Hay dos métodos principales utilizados para la modulación: modulación de amplitud (AM) y modulación de frecuencia (FM).

### 2.4.1 Modulación de amplitud AM

Es el método de modulación más antiguo y se utiliza a menudo en radios, especialmente porque el proceso de demodulación es muy simple, sin embargo, está sujeto a gran influencia de ruido eléctrico externo, por ejemplo, cuando cae un rayo, o cuando enciende lámparas fluorescentes se escucha un fuerte crujido de la radio.

Proceso de modulación:

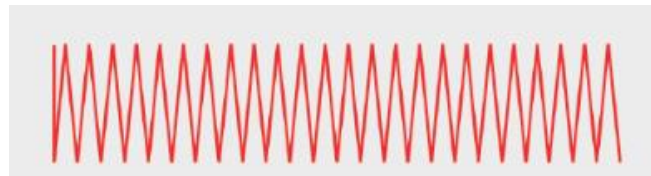


Ilustración 14. Portadora de 121.5 MHz <sup>14</sup>

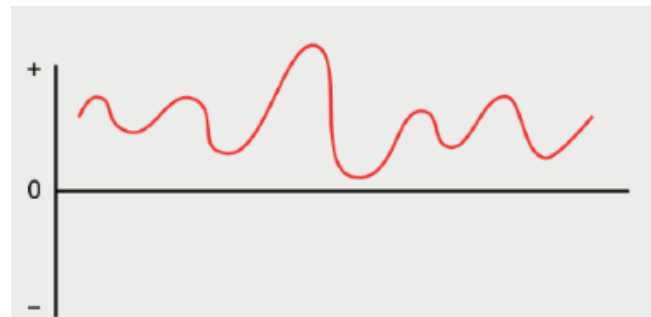


Ilustración 15. Señal de información de audio de DC variable <sup>15</sup>

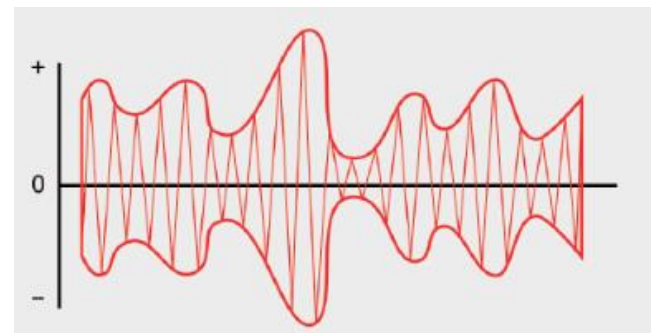
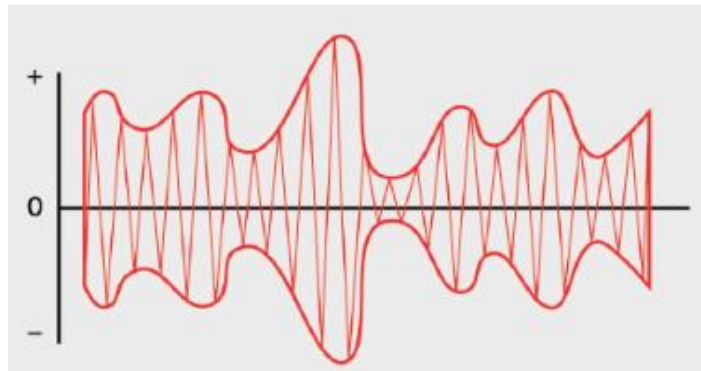


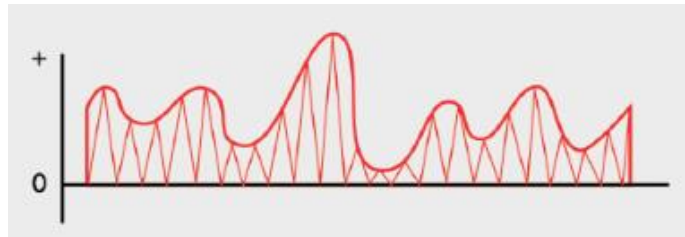
Ilustración 16. Señal modulada en amplitud que sale del transmisor <sup>16</sup>



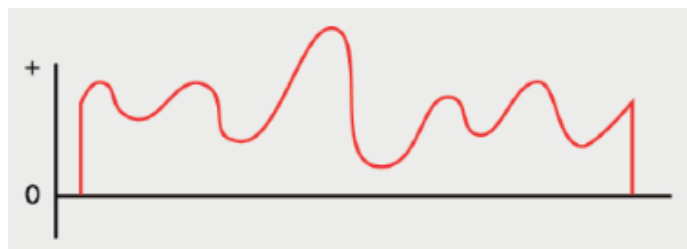
Proceso de Demodulación:



*Ilustración 17. Señal modulada en amplitud que llega al receptor <sup>17</sup>*



*Ilustración 18. Detección de la portadora modulada <sup>18</sup>*



*Ilustración 19. Señal demodulada <sup>19</sup>*



*Ilustración 20. Señal de audiofrecuencia en la boca <sup>20</sup>*

## 2.4.2 Modulación de frecuencia FM

Se basa en el cambio de la frecuencia de la portadora según la señal, elimina las desventajas de la modulación de amplitud ya que el ruido generado en el entorno no afecta a la frecuencia, por lo tanto, es posible disfrutar de una calidad de sonido limpia. Sin embargo, el proceso de demodulación es complicado y de alto costo.

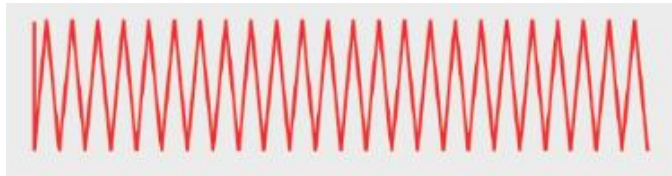


Ilustración 21. Señal a transmitir <sup>21</sup>

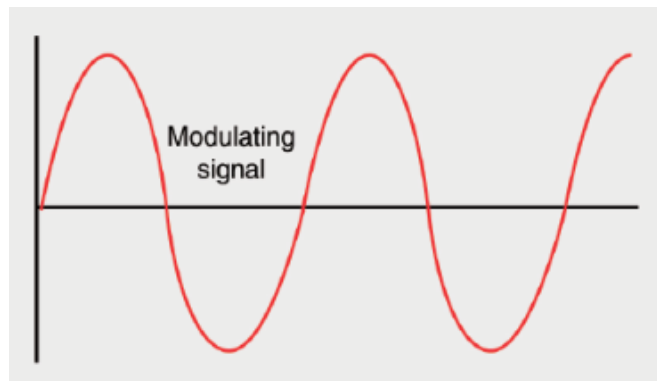


Ilustración 22. Señal de modulación <sup>22</sup>

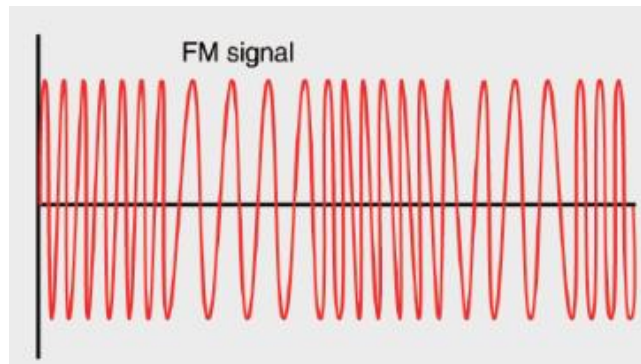


Ilustración 23. Señal en frecuencia modulada FM <sup>23</sup>

Dado que la potencia de la portadora modulada es pequeña, es necesario hacerla del tamaño de potencia requerido y enviarla a la antena, de modo que se amplifica con un amplificador de potencia.

### 3. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN, NAVEGACIÓN, VIGILANCIA Y METEOROLÓGICOS (CNS-MET) EN LA AERONÁUTICA, LA ACTUALIDAD DE LA SEGURIDAD EN LA GESTIÓN DEL TRÁFICO AÉREO

Los sistemas para la seguridad del tráfico aéreo han ido aumentando con el pasar del tiempo, muchos de estos obsoletos ya se han reemplazados por sistemas novedosos que cumplen con la alta demanda del servicio aéreo y la rigurosa inspección global de la Organización de Aviación Civil Internacional OACI, se expondrán entonces, en un compendio, los distintos sistemas de comunicación, navegación, vigilancia y meteorológicos utilizados actualmente en la aeronáutica a nivel global, enfatizando en la función, operación, utilidad y los aportes a la seguridad del vuelo.

#### 3.1 Antenas equipadas en las aeronaves actuales

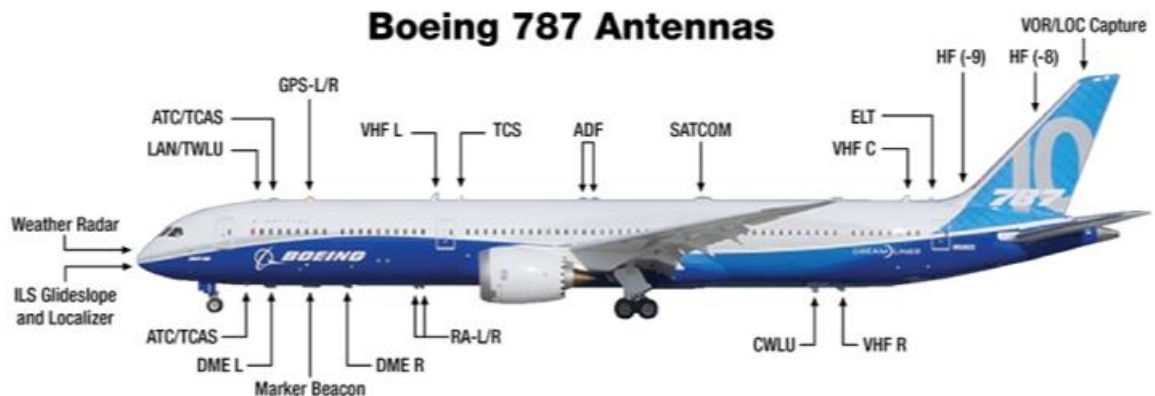


Ilustración 24. Distribución general de las antenas en un avión <sup>24</sup>

Tabla 1. Antenas de un avión

<b>Antena</b>	<b>Descripción</b>	<b>Banda de frecuencia</b>
VOR	Radiofaro omnidireccional de muy alta frecuencia (VHF)	108 MHz a 117,95 MHz
HF	Frecuencia alta u onda corta de radio	3 MHz a 30 MHz
ELT	Transmisor localizador de emergencia (búsqueda y salvamento)	121,5 MHz, 243 MHz y 406 MHz
CWLU	Unidad LAN inalámbrica de la tripulación	
ADF	Buscador automático de dirección.	Rango de frecuencia media 190 KHz a 1750 KHz – Recibe señales de radio de la banda comercial AM y de balizas no direccionales (NDB)
TCS	Sistema de acceso a la red celular.	Proporciona conectividad a la red móvil 3G/4G con HSPA+ (Acceso a paquetes de alta velocidad)
GPS	Sistema de posicionamiento global	1,1 GHz a 1,6 GHz. Utiliza principalmente la banda L1 con frecuencias aproximadamente entre 1,56 y 1, 58 GHz.
RA	Radioaltímetro	4,2 GHz a 4,4 GHz utiliza principalmente la banda C en el rango de 3,7 GHz a 4,2 GHz
DME	Equipo medidor de distancia	960 MHz a 1215 Mhz
ATC/TCAS	Control del tráfico aéreo/Sistema de alerta de tráfico y evasión de colisión	1090 MHz
LAN/TWLU	Red de área local inalámbrica.	

### 3.2 Balizas No Direccionales (NDB) y Buscador Automático de Direcciones (ADF)

El detector automático de dirección (ADF) a bordo de la aeronave recibe ondas de radio transmitidas desde una radiobaliza no direccional (NDB).

Dado que las ondas de radio tienen la propiedad de ir rectas, son recibidas por una antena de bucle, el receptor se sintoniza con la frecuencia de transmisión de una NDB cuando la salida de recepción es nula, en este punto se determina la orientación y dirección de la estación terrestre, esto ocurre ya que una onda de radio que incida en el parte lateral de una antena de bucle produce una señal con intensidad despreciable.

Las frecuencias ADF varían de 190 a 1750 kHz (estaciones de radio AM comerciales: 540 a 1620 kHz, las balizas no direccionales (NDB): trabajan en frecuencias de 190 a 535 kHz). [46]

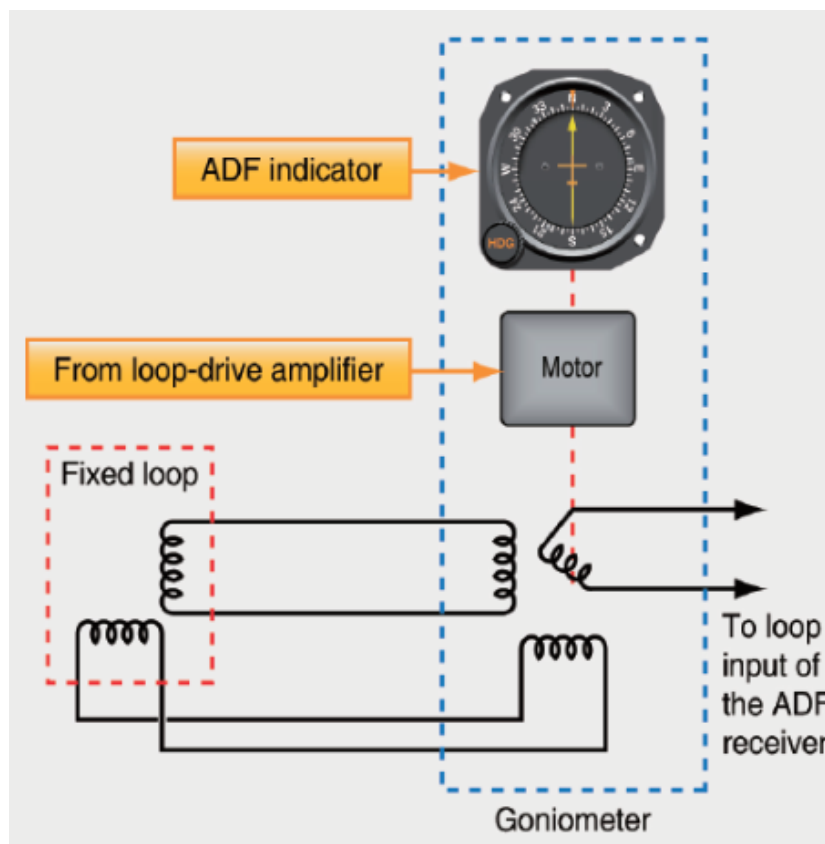


Ilustración 25. Sistema ADF<sup>25</sup>

Como se visualiza en la ilustración 25, el sistema ADF consta de 1 antena de sentido (recepción de energía de campo eléctrico) y 2 antenas de bucle configuradas a una diferencia de 90 grados (recepción de energía de campo magnético).



*Ilustración 26. Radio baliza no direccional NDB <sup>26</sup>*

### **3.2.1 Principio del ADF**

La estación NDB terrestre transmite ondas de radio omnidireccionales de 360° desde una antena instalada en el suelo mediante el uso de frecuencias en la banda de 190-1750 kHz para proporcionar una señal en amplitud modulada AM a 1020 Hz o 400 Hz al Buscador de Dirección (ADF) del avión, además de proporcionar las letras de identificación de la estación de radio en tierra, las cuales se transmiten en un intervalo uniforme de al menos tres veces en 30 segundos en código MORSE. [46]

Cuando las ondas de radio transmitidas se sintonizan con la antena de bucle de la aeronave, se forma un patrón de propagación de antena en forma de 8

en el que la intensidad de campo recibida es máxima. Si la antena de bucle está alineada sobre los lados oeste y este, como se muestra en la ilustración 27, no es posible determinar desde cuál de las dos direcciones se transmite la señal, en este caso se utiliza una antena adicional cuyo campo de recepción es omnidireccional llamada antena sensitiva la cual elimina la ambigüedad, cuando el patrón de la antena de bucle arroje confusión se crea un patrón adicional de forma cardioide brindado por la antena sensitiva, distinguiendo así entre la máxima y la mínima dirección de sensibilidad, en este caso, el indicador ADF en la cabina indicará la orientación relativa (medida en el sentido de las agujas del reloj en la dirección radial) con la estación NDB, es decir, el área de transmisión de radio la cual es la dirección de esta sensibilidad mínima.

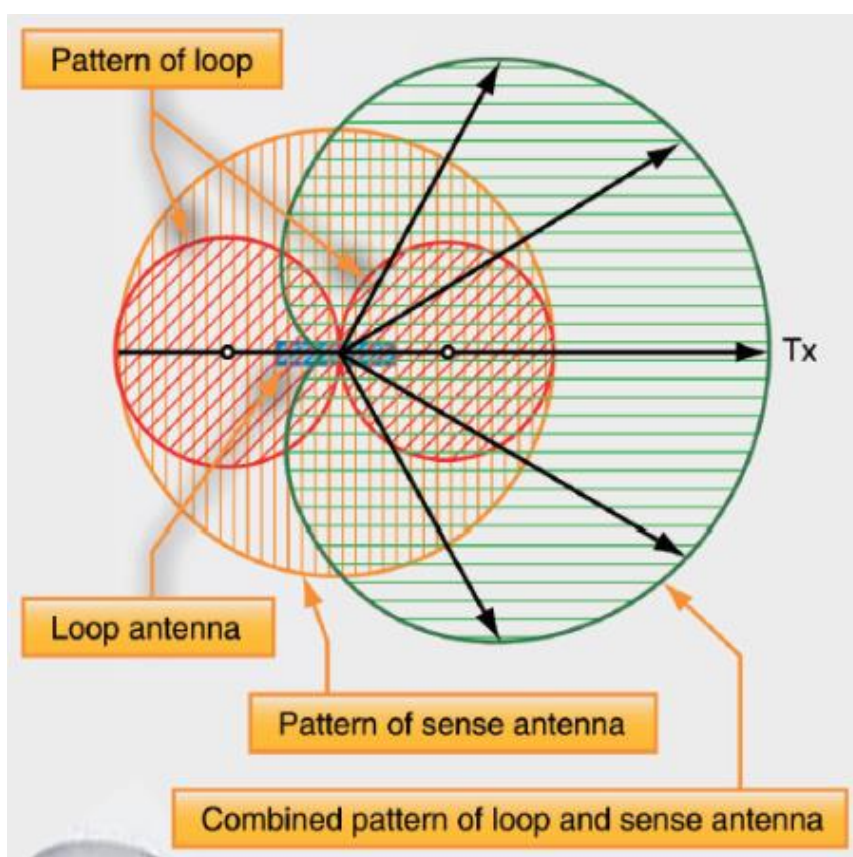


Ilustración 27. Patrón de radiación de las antenas del ADF<sup>27</sup>

Las aeronaves equipadas con un buscador de dirección automático (ADF) reciben señales sin información direccional incluida en ella, solo pueden



conocer la ruta relativa de una radiobaliza no direccional (NDB) en función de su posición, de esta manera las balizas no direccionales proporcionan rutas aéreas predefinidas para llevar a cabalidad un plan de vuelo, las vías edificadas por las NDBs suelen emplearse en zonas poco pobladas, poseen gran alcance y son menos costosas de construir que los sistemas VOR.

Sin embargo, existe el problema de que las aeronaves que viajan en diferentes direcciones indiquen el mismo ángulo, en otras palabras, viajen sin brújula, el ADF por sí solo no puede suministrar información acerca de la defensa del NDB contra el NDB.

Para resolver este problema, se creó un dispositivo de radiomarcación, que determina un ángulo teniendo como referencia el Norte Magnético y transmite información azimutal a una antena omnidireccional de onda ultracorta (VHF) conformando lo que se define como sistema VOR, en otras palabras, la diferencia entre un ADF y un VOR es que el ADF solo puede obtener una ruta relativa con la estación NDB en relación con la dirección radial, mientras que el VOR puede conocer el ángulo del rumbo magnético de la estación terrestre VOR desde la posición de la aeronave, independientemente de la dirección radial.

En particular, el VOR es más preciso que el NDB, por lo que los aviones que vuelan por medio de instrumentos están obligados a equiparse con un receptor VOR.

### **3.3 Radiofaro Omnidireccional de muy alta frecuencia (VOR) y Equipo Medidor de distancia (DME)**

El VOR opera bajo frecuencias VHF de 108.00 a 117.95 MHz, generalmente acompañado de un sistema de radio incluido en el aeroplano denominado DME (Distance Measurement Equipment) el cual da una medición entre una estación terrestre y el objetivo en el aire por medio del cálculo del tiempo de propagación de las señales de radio [10], el DME nació como modificación a los equipos utilizados en la Segunda Guerra Mundial pero no fue hasta la década de 1960 que su uso sería indispensable en conjunto con el VOR,

consta de dos partes: un transpondedor en tierra que posee un receptor/transmisor y un radar a bordo, opera en banda de frecuencia ultra alta (UHF) con polarización vertical [10].



*Ilustración 28. Equipo Medidor de Distancia DME <sup>28</sup>*

El sistema VOR es una instalación de radionavegación encargada de dirigir la dirección de vuelo a la aeronave por medio de una estación terrestre, el conjunto de varias estaciones VOR interconectadas entre sí componen una aerovía, estos puntos permiten guiar la aeronave por ejemplo hacia un aeropuerto.

La estación VOR en tierra emite tres señales de radio:

- Una señal en código Morse audible la cual incluye la identificación de la estación.
- Una señal altamente direccional llamada señal de referencia que es emitida bajo la técnica FM en una subportadora de 9960 Hz y es programada para estar siempre en fase, siendo la misma en todas las direcciones.

- Una señal variable emitida sucesivamente en los 360 rumbos magnéticos que encierran la estación, conocida como señal VOR, es emitida bajo la técnica de AM con un patrón de radiación de antena cardioide y tiene una fase diferente dependiendo del observador, esto hace que la fase identifique de modo unívoco la radial. La señal variable es una señal de 30 Hz en Amplitud Modulada (AM).

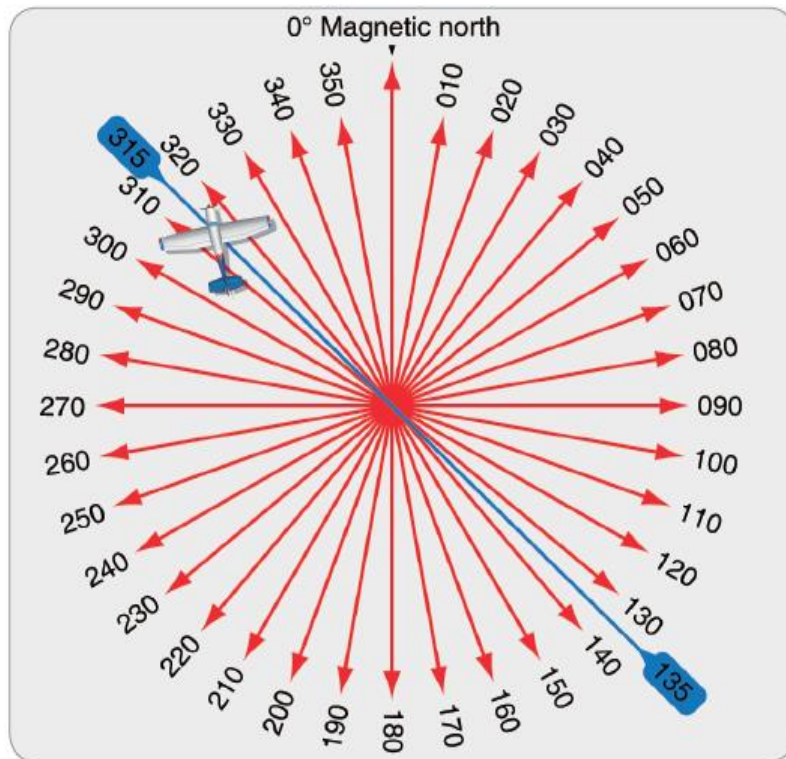


Ilustración 29. Transmisor VOR produciendo señales en 360 grados <sup>29</sup>

El equipo a bordo de la nave detecta la señal compuesta y la demodula, compara la señal de referencia con la señal variable hallando la diferencia de fase entre ellas lo que define el rumbo desde la estación VOR al receptor en relación con el norte magnético, también conocido como ángulo Azimut.

El receptor VOR de la aeronave realiza el cálculo del desplazamiento de la señal variable con respecto a la señal de referencia. Así, establece la posición de la aeronave referente a la radial correspondiente.

Cada una de las estaciones VOR tienen asignada una frecuencia en la banda

VHF, al navegar utilizando el VOR como sistema de posicionamiento es necesario sintonizar en el equipo a bordo la frecuencia correspondiente a la estación.

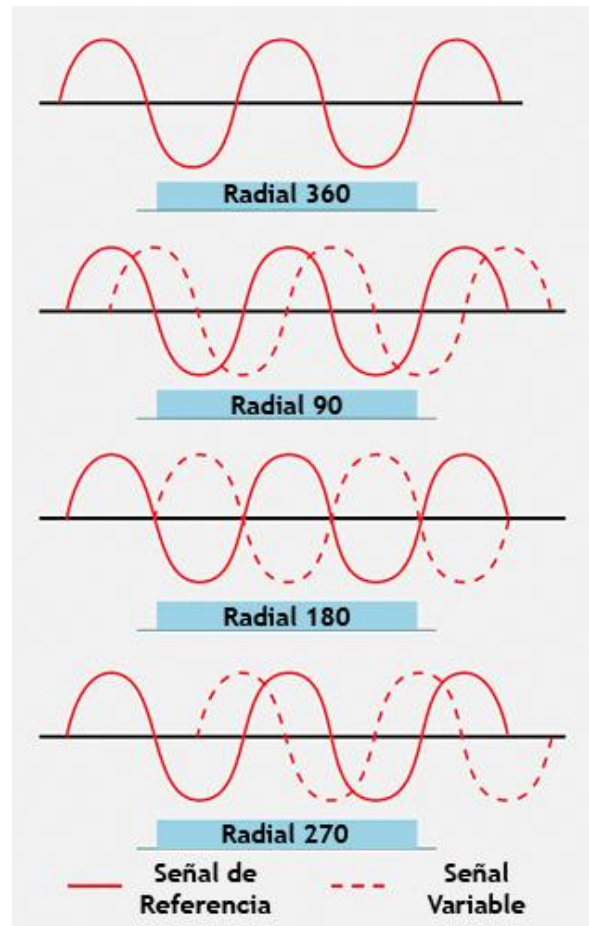


Ilustración 30. Relación de fase de las dos señales de emisión del VOR <sup>30</sup>

### 3.3.1 Detección de la señal VOR

Cuando la señal VOR pasa a través del Detector de Envoltura, se detectan:

- Una subportadora de 9960 Hz.
- Una señal variable de 30 Hz.
- Una señal de identificación de 1020 Hz.

La envoltura detectada separa el código de voz y morse, y separa la señal

variable de 30Hz por medio de un filtro de paso bajo y la subportadora de 9960 Hz por medio de un filtro de paso alto.

La subportadora de 9960Hz se convierte en una señal de referencia de 30Hz en el discriminador de frecuencia y la diferencia de fase se detecta en el comparador de fase.

Teniendo el cálculo de la diferencia de fase, el piloto lo compara con el curso elegido y le da la orden al Indicador de desviación de curso (CDI) para virar a la derecha o la izquierda.

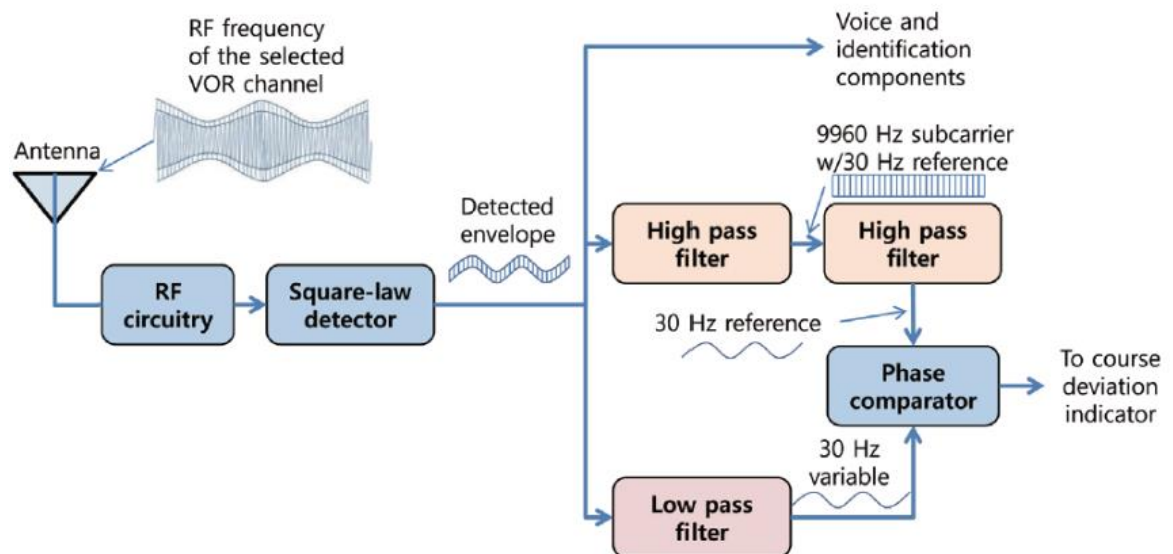


Ilustración 31. Detector de frecuencias del VOR <sup>31</sup>

La información proporcionada por los sistemas VOR es visualizada en alguno de los indicadores a bordo de la nave como el OBI (Omni-Bearing indicator) que consta de un mando OBS (Omni-Bearing Selector) para seleccionar un rumbo deseado y un indicador CDI (Course Deviation Indicator) que se estabiliza cuando se vuela en dicho rumbo que en conjunto con un indicador de ambigüedad (TO-FROM) ilustra si el avión está en curso o se desvía de la estación [11], otros indicadores como el RMI (Radio Magnetic Indicator), HSI (Horizontal Situation Indicator) o el RNAV (Area Navigation) también pueden cumplir con esta función [12].

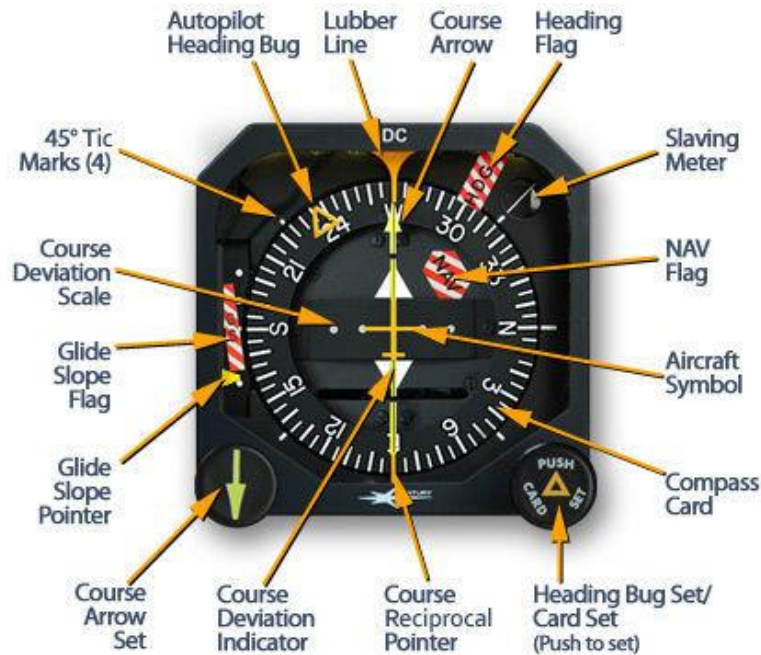


Ilustración 32. Indicador VOR <sup>32</sup>

El alcance de los sistemas VOR depende de la altura de planeo de la nave y la potencia efectiva emitida por la antena, como se ilustra en la tabla 2.

Tabla 2. Altitud y alcance VOR

Clase	Altitud	Alcance (NM)
Terminal (T)	12000 ft o menos	25
Cota Baja (L)	Menos de 18000 ft	40
Cota Alta (H)	14500 ft - 18000 ft	100
	18000 ft - 45000 ft	130
	Más de 45000 ft	200

La precisión de las señales VOR en comparación con los sistemas que le precedieron es formidablemente mayor, la orientación desde la estación emisora hasta la nave es invariante con el tiempo o malas condiciones atmosféricas, la difracción de la señal consecuencia de las características del terreno es menor bajo el protocolo VHF y la codificación de fase es casi

inmune a interferencia en tormentas eléctricas.

Se utiliza un VOR tipo convencional (CVOR) para establecer la orientación de una vía aérea cuando está asociado a un DME, y proporcionar el punto en el que coinciden la estación y la aeronave con una exactitud angular de  $\pm 2^\circ$ , la estación CVOR emite radiación por medio de tres antenas: dos dipolos cruzados que forman un ángulo recto entre sí y una tercera de bucle omnidireccional, si se requiere de mayor exactitud para generar la información del rumbo de la nave se emplean sistemas DVOR (Doppler VOR) compuestos por un arreglo de 26 pares de emisores tipo dipolo que crean una circunferencia y una antena central, solo se activan la antena central y un par externo para cada instante, generando una precisión angular de  $\pm 0.5^\circ$ , El DVOR es más práctico en áreas abarrotadas o donde hay edificios altos, sin embargo, es una estructura robusta de alrededor 100 pies de diámetro, pruebas experimentales demuestran que el 99.94% del tiempo los sistemas VOR tienen menos de  $\pm 0.35^\circ$  de error [10], las especificaciones a cerca de la precisión del rumbo para los sistemas VOR fueron estipuladas en la convención sobre la aviación civil internacional de la ICAO [10], siendo principalmente cinco los parámetros estudiados: la precisión del rumbo, los índices de modulación tanto de la señal variable como de la señal de referencia, el nivel de señal y la presencia de baches causados por fallas en alguna de las antenas.

En la estación terrestre CVOR (VOR convencional) la fase de referencia es la modulación FM y la fase variable es modulada AM y en la estación DVOR (Doppler VOR) la fase de referencia es la modulación AM y la fase variable es la modulación FM.

### **3.4 Sistema de aterrizaje por instrumentos ILS**

Conformado por el localizador, la senda de planeo y una serie de radiobalizas, el ILS opera en conjunto por medio de estos subsistemas proporcionando información acerca de la distancia y posición de la aeronave



con la pista para realizar un aterrizaje de precisión aun en condiciones de visibilidad insuficientes.

### 3.4.1 Localizador

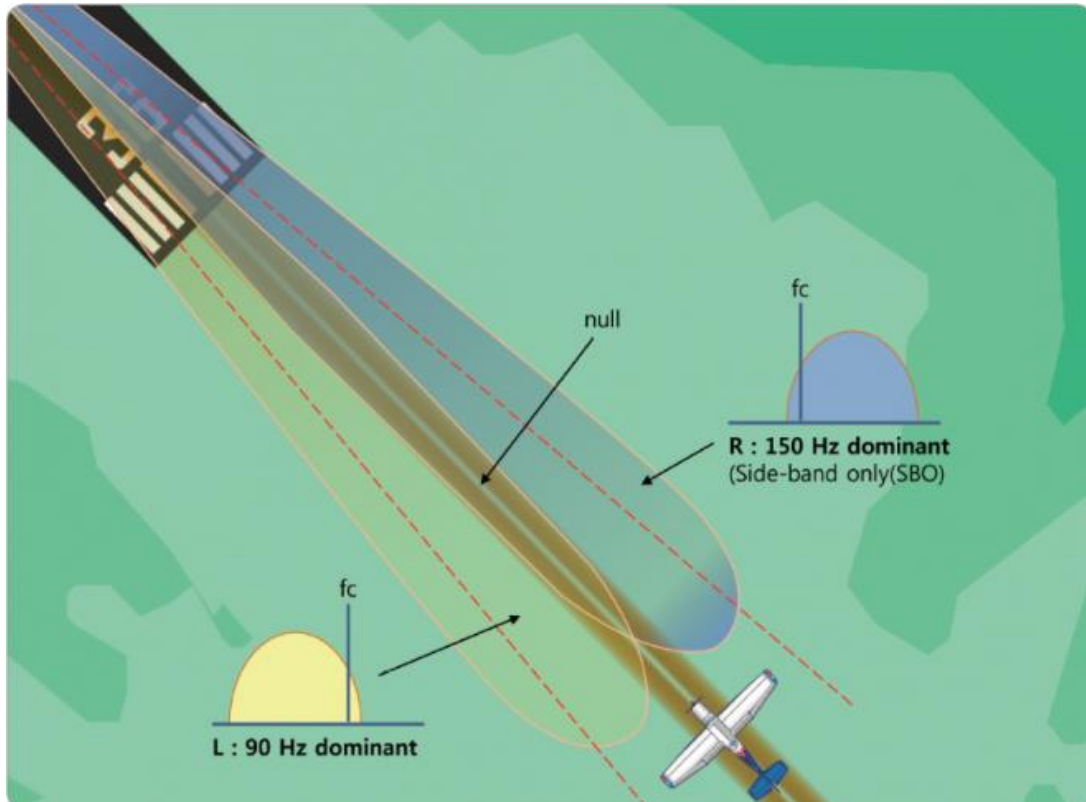


Ilustración 33. Patrón ondas de radio del localizador del ILS<sup>33</sup>

El localizador se encarga del guiado horizontal, su equipo en tierra emite tres señales que al superponerse proporcionan dos patrones de radiación direccional, uno donde predomina una señal de 90Hz denominado espacio amarillo y otro en el que predomina una señal de 150 Hz denominado espacio azul, si un avión se aproxima a la pista por el flanco derecho estará ubicado en el espacio azul, si se aproxima por el flanco izquierdo el piloto recibirá predominantemente la señal de 90 Hz y se encontrará en el espacio amarillo, al alinear el avión con el eje de la pista el piloto recibirá ambas señales con idéntica intensidad.



### 3.4.2 Pendiente de deslizamiento Glideslope

Compuesto por un transmisor de radio UHF y una antena, al igual que en el localizador, esta genera dos patrones de radiación interceptados en un punto, el receptor del localizador y de la senda de planeo a bordo del avión se encuentran controlados por los receptores del sistema VOR y se visualizan en el panel por medio del CDI (Course Deviation Indicator), en el momento que la aeronave se acerque a la pista de aterrizaje el piloto automático detectará la señal del localizador en primera instancia y posteriormente descenderá siguiendo la senda de planeo, si la nave se encuentra por encima de esta, el indicador horizontal en el CDI se mostrará por debajo del punto de referencia indicándole al piloto que debe descender, si por el contrario la nave se encuentra por debajo de la senda de planeo el indicador horizontal se ubicará por encima del punto de referencia indicándole al piloto que debe aumentar su altitud.

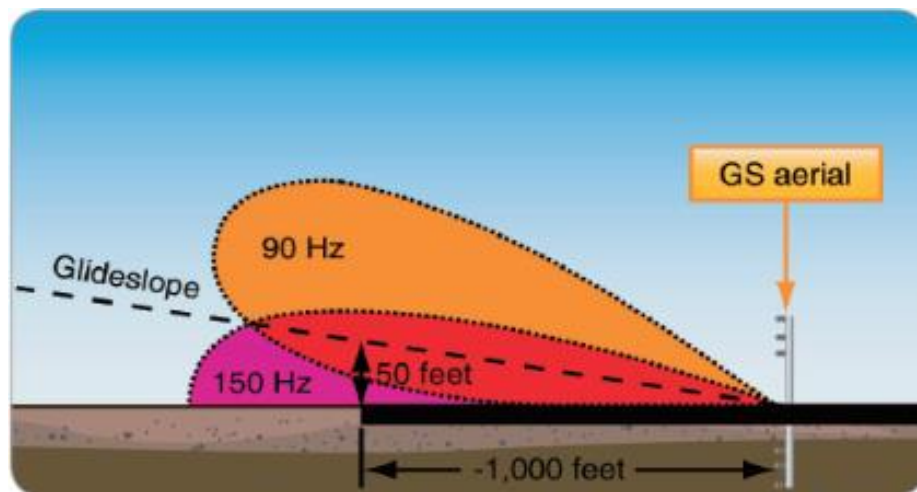


Ilustración 34. Señal de transmisión del Glideslope del ILS <sup>34</sup>

El Glideslope generalmente tiene un alcance de 10 NM.

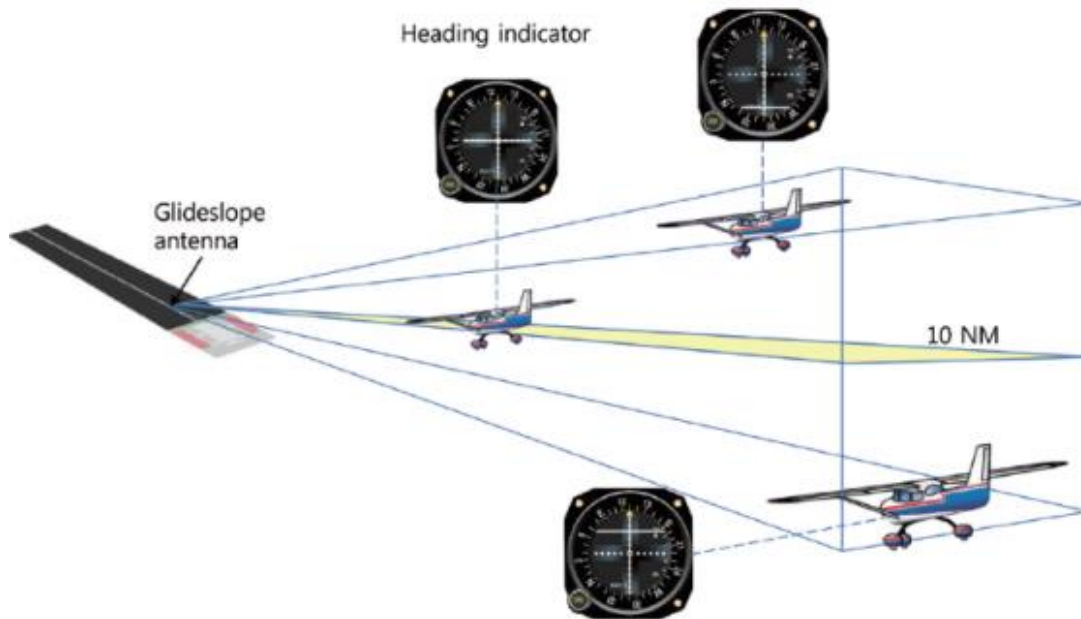


Ilustración 35. Indicación del Glideslope a bordo <sup>35</sup>

### 3.4.3 Balizas marcadoras

El sistema de aproximación por instrumentos (ILS) utiliza 3 radiobalizas que toman diferentes funciones dependiendo de la ubicación a lo largo de la pista de aterrizaje [12]:

- Radiobaliza exterior (OM): está ubicada entre 3.5 y 7 NM del límite de la pista, propaga a un tono de 400 Hz una señal en código morse, una luz parpadeante de color azul es activada cuando el sistema a bordo de la nave detecta el paso por la radiobaliza, lo que significa el inicio del aterrizaje, de igual forma una señal de audio es enviada al piloto el cual la recibe por auriculares o altavoz como confirmación.
- Radiobaliza intermedia (MM): situada entre 0.6 y 0.9 NM de límite de pista, radia una señal en código morse en tono de 1300 Hz e indica al piloto que la aproximación a la pista de aterrizaje es inminente, cuando la nave sobrevuela la radiobaliza, el equipo a bordo detecta la señal encendiendo en el indicador una luz de color ámbar.
- Radiobaliza interior (IM): ubicada entre 75 y 450 metros del umbral del

límite pista, emite una señal modulada en amplitud de frecuencia 3000 Hz y es la encargada de indicar al navegante que está a punto de cruzar el límite de entrada al terreno de aterrizaje, una señal luminosa de color blanco es activada en el indicador cuando se sobrevuela la radiobaliza, el piloto debe frustrar su aterrizaje si al recibir la señal de la radiobaliza interior no visualiza ninguna referencia de la pista.

Las radiobalizas y sus características se observan en la ilustración.

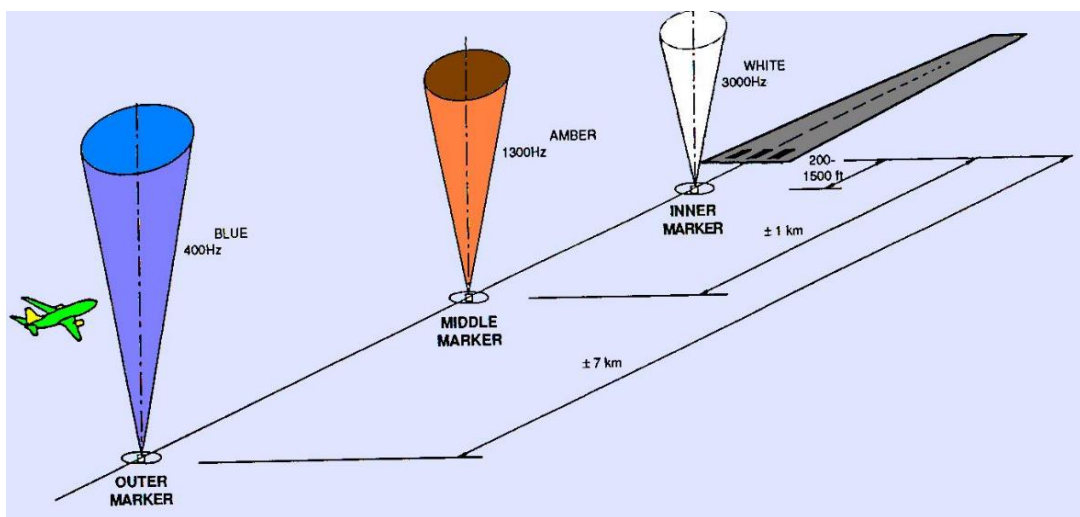


Ilustración 36. Posición de las radiobalizas marcadoras para el sistema ILS <sup>36</sup>

El sistema conformado por el localizador, la senda de planeo y las radiobalizas sirve de gran utilidad para las maniobras de aterrizaje de la nave, sin embargo, debido a que la visibilidad del terreno varía dependiendo de las condiciones meteorológicas, la OACI en conjunto con las autoridades de aviación categorizaron los sistemas ILS como se ilustra en la tabla 3 [17].

Tabla 3. Precisión instrumentos de aproximación y aterrizaje (ILS)

Categoría	Altura techo de nubes	Visibilidad
I	200 ft	Mayor a 1800 ft
II	100 ft	Mayor a 1300 ft
III A	Menor a 100 ft	Mayor a 700 ft
III B	Menor a 50 ft	150 ft – 700 ft
III C	Sin limite	Sin visibilidad

### 3.5 Radioaltímetro

Los radioaltímetros se utilizan para medir la distancia desde la aeronave hasta el suelo directamente debajo de ella y se utilizan preferiblemente a bajas altitudes (2500 ft o menos) o durante vuelos nocturnos [22]. El radioaltímetro proporciona la primera información de la altitud determinada para el aterrizaje y alerta al piloto con una advertencia visual o de voz cuando la aeronave alcanza el valor de un error de altitud ajustable. Si la pista no es visible cuando se alcanza la altitud determinada, el piloto generalmente abandona el aterrizaje, [23].



Ilustración 37. Principio del radioaltímetro <sup>37</sup>

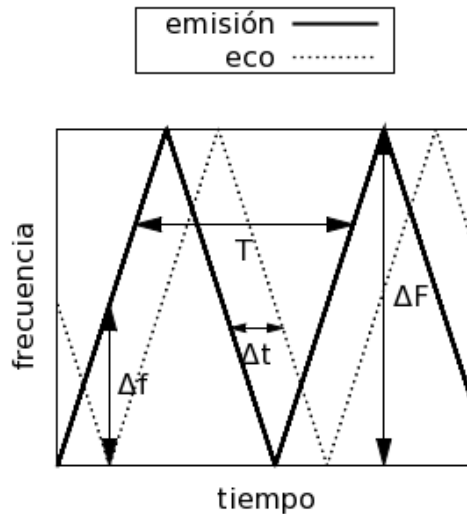


Ilustración 38. Mediciones del radioaltímetro <sup>38</sup>

El radioaltímetro oscila a una frecuencia de 4300MHz desde la aeronave hasta el suelo y la modula a 50MHz. Las ondas de radio disparadas desde la antena transmisora se reflejan en la superficie de la tierra y son recibidas por la antena receptora en la aeronave, como se visualiza en la ilustración 37, la diferencia entre la señal original y la frecuencia de la señal que rebota nos da la medición [24], diagramado en la ilustración 38.

Los altímetros de radio son más precisos que los altímetros barométricos para obtener información sobre la altitud del suelo a bajas altitudes [25]. En la cabina de la aeronave se muestra una señal de error como luz o cambio de color para obtener instrucciones cuando se alcanza una altitud determinada. En aeronaves más grandes, la información de altitud de los altímetros de radio se envía a un sistema de advertencia de proximidad al suelo (GPWS) que alerta audiblemente a la tripulación de aproximaciones potencialmente peligrosas al terreno debajo de la aeronave. Como se muestra en la ilustración 39, la altitud se muestra en un indicador electrónico de director de actitud (EADI), en el cual se visualizan los datos que se relacionan con la situación del vuelo de tal forma que el piloto pueda acceder a ellos fácilmente.

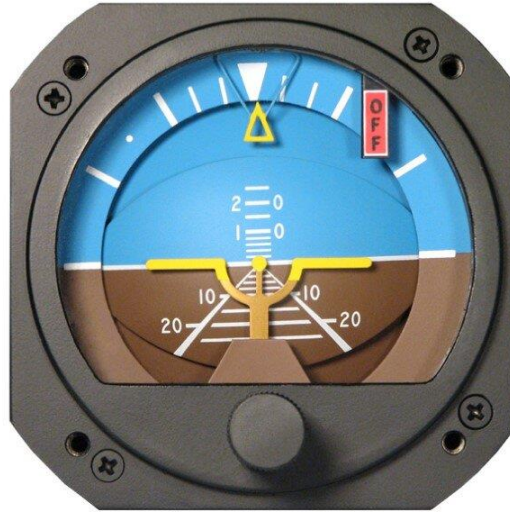


Ilustración 39. Director de actitud de vuelo EADI <sup>39</sup>

### 3.6 Radar meteorológico

Un radar meteorológico es un dispositivo que informa al piloto de las condiciones meteorológicas durante el vuelo [26], haciéndolo más seguro. Es probable que las aeronaves se encuentren con inclemencias meteorológicas durante el vuelo, especialmente zonas de tormenta, lluvia avanzada, nubes, cizalladuras de viento, etc.

Si la aeronave se encuentra con mal clima durante el vuelo se debe cambiar la ruta o la altitud de la aeronave, detectar estos cambios meteorológicos y su ubicación a simple vista es difícil incluso durante el día, por tal motivo la importancia y el uso de los radares meteorológicos para procurar un vuelo más seguro se ha incrementado en los últimos años.

Utilizando una banda de frecuencia, en este caso la banda X, comprendida entre 8.2 a 12.4 GHz (puesto que es fácil de reflejar contra nubes o lluvia) [27], se dispara un pulso en ondas de radio desde una antena el cual choca con un objeto (lluvia o nubes), la reflexión de las ondas de radio varía dependiendo de la densidad o humedad en la lluvia o las nubes, como se muestra a continuación:

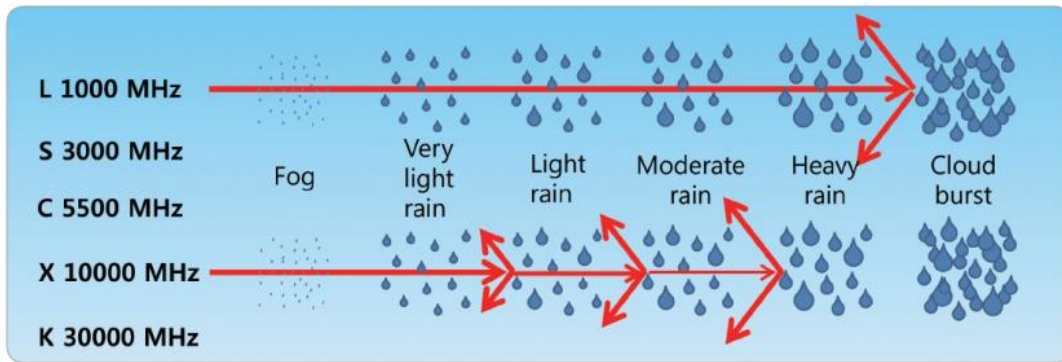


Ilustración 40. Características de frecuencia acorde a la humedad <sup>40</sup>

Las frecuencias utilizadas para el radar meteorológico se encuentran principalmente en las bandas X (9375 MHz) y banda C (5400 MHz) [28], cuando hay mucha lluvia, la banda C está menos atenuada, por lo que es mejor si hay un área de lluvia frente, por otro lado, en el caso de nubes con una pequeña cantidad de lluvia, la banda X es mejor porque la distancia efectiva es más larga, si la antena tiene un diámetro constante, el ancho del haz es inversamente proporcional a su frecuencia, por lo que en el caso de la banda X en lugar de la banda C, el ancho del haz es más estrecho, lo que aumenta la resolución del rodamiento, de modo que las nubes de lluvia o nubes de trueno se pueden conocer con precisión.

La onda reflejada se recibe, amplifica y se muestra en el indicador gráfico en diferentes colores según la intensidad de los reflectores, se indican en rojo, amarillo, ocre y negro, y la turbulencia se indica en púrpura rojizo, las aeronaves digitales más recientes muestran en una pantalla de radar meteorológico dichas alarmas, como se muestra en la ilustración 41.



Ilustración 41. Radar meteorológico y display multifuncional de navegación <sup>41</sup>



Otro método para percibir el clima potencialmente peligroso es la detección de rayos, el emisor de rayos emite su propia señal electromagnética, el azimut del rayo puede ser calculado por el receptor utilizando la misma antena de bucle utilizada en el detector automático de dirección (ADF) [29].

Dado que la extensión del rayo está estrechamente relacionada con su intensidad, un rayo violento se emite por coordenadas cuando está muy cerca de la aeronave [30].



Ilustración 42. Receptor y antena de un sistema detector de rayos <sup>42</sup>

Como se muestra en la ilustración 43, el Stormscope indica en la pantalla pequeños símbolos con la ubicación en coordenadas de cada rayo dentro de 200 millas [31], Los símbolos cambian de color para indicar el tiempo desde su detección, un número específicos de rayos en un área pequeña indicará tormenta y el piloto sabiendo esta información puede navegar a su alrededor.




Ilustración 43. Stormscope, pantalla del detector de rayos <sup>43</sup>



Los rayos también son un indicador de información de navegación multifuncional (ND: pantalla de navegación) determinando por ejemplo la ubicación del aeroplano. La información meteorológica se puede enviar a una aeronave en vuelo prácticamente en cualquier parte del mundo utilizando satélites, lo que proporciona información de radar en tiempo real, así como datos de texto al indicador de información de navegación (ND) de la aeronave como se observa en la ilustración 44, la cual muestra un resumen meteorológico en lenguaje de planeo recibido por la aeronave, junto con una lista de otra información disponible a través de satélite o enlace terrestre.

**Bern / Belp, CH (LSZB)**

**METAR** Conditions at: 08:20 AM local time (9th) VFR 

Daylight: Sunrise 06:03 AM. Sunset 08:50 PM LT  
Wind: 270 degrees (W) 9 knots (~10 MPH)  
Variable between 220 and 310 degrees

Visibility: 6 or more miles

Clouds: broken clouds at 5,500 feet  
Temperature: 59°F, dewpoint: 50°F, RH:72%  
Pressure: 30.15 inches Hg  
No significant changes

Updated at 02:43 PM Source:NWS

**Satellite weather services available**

- METARs/TAFs/PIREPs/SIGMETs/NOTAMs
- Hundreds of web-based graphical weather charts
- Area forecasts and route weather briefings
- Wind and temperature aloft data
- "Plain language" passenger weather briefs
- Route of flight images with weather overlays
- Significant weather charts and other prognostic charts
- Worldwide radar and satellite imagery

Ilustración 44. Informe meteorológico enviado a la aeronave <sup>44</sup>

### 3.7 Sistema de Alerta de Tráfico y Prevención de Colisiones (TCAS)

El sistema de alarma de colisión aérea (TCAS) escanea el espacio aéreo permitiéndole a la aeronave pilotar de manera segura al comunicarse con los

transpondedores equipados en otros aviones, el TCAS envía una señal de pregunta a una aeronave equipada con un transpondedor ATC y calcula la distancia, la orientación y la altitud utilizando la señal de respuesta del avión con el fin de evitar una colisión [32], si no se recibe información de altitud de la aeronave de la otra parte, no se puede determinar su ubicación.

En conjunto el sistema consta de una computadora TCAS, un transpondedor SSR (Radar secundario de vigilancia) Modo S, un panel de control, un indicador y una antena [32], como se muestra en la ilustración 45.

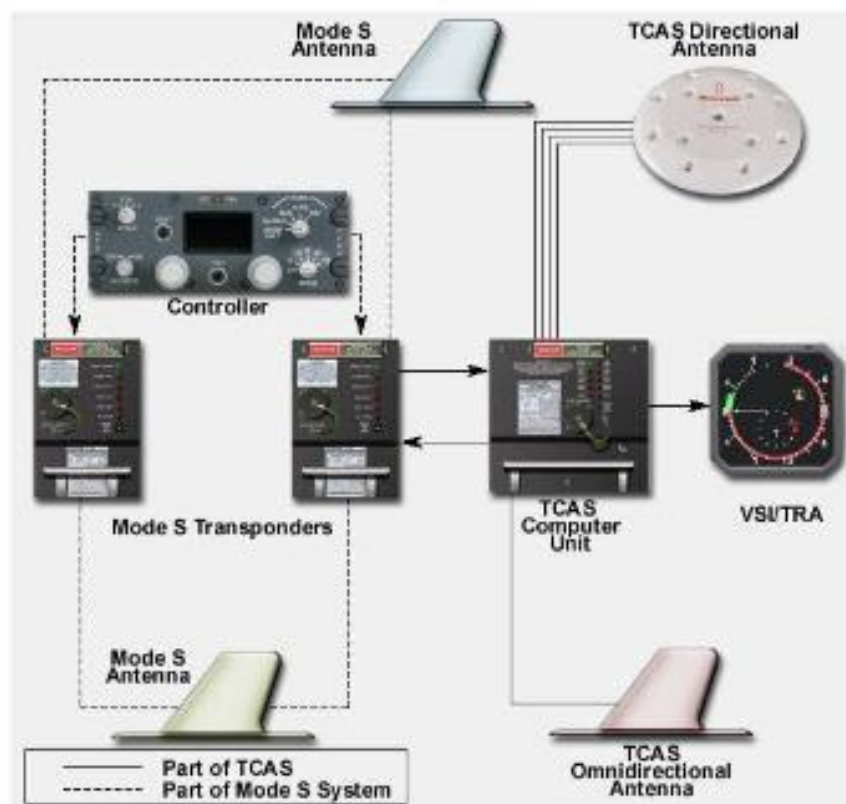


Ilustración 45. Estructura del TCAS <sup>45</sup>

Para la orientación del intruso se utiliza la antena direccional del dispositivo de prevención de colisiones aéreas, el interior de la antena consta de 4 elementos de antenas pasivas que reconocen la orientación relativa del intruso por la diferencia de fase entre cada elemento de la antena.

El intruso recibe la altitud de presión barométrica de la computadora de

datos atmosféricos (ADC) [33] para estandarizar los datos, dado que se transmite al incluirlo en la señal de respuesta, se puede conocer la altitud de la máquina invasora.

Podemos encontrar dos tipos de TCAS:

TCAS I, que indica la dirección de vuelo y la altitud relativa de todas las aeronaves que vuelan dentro de una distancia seleccionada. Se utilizan símbolos de diferentes colores para distinguir el grado de probabilidad de una amenaza [34], que corresponde al Aviso de Tráfico (TA) de un dispositivo de prevención de colisiones aéreas. Ilustración 46.



Ilustración 46. Monitor a bordo de la aeronave del TCAS <sup>46</sup>

Cuando el piloto escucha la alarma de aproximación, debe identificar la aeronave que ingresa al espacio aéreo peligroso. El TCAS I no proporciona una solución, pero sí proporciona información importante que se puede utilizar para tomar una decisión apropiada, es decir, se propone un método para mantener la distancia horizontal mediante criterios de evaluación de distancia y altitud.

El TCAS II es más complejo, emite un Aviso de Resolución al piloto cuando es necesario, junto con una indicación de las condiciones del tráfico. El curso de

cada aeronave se divide en ascenso, descenso y vuelo horizontal. El TCAS II instruye al piloto para "ascender" o "descender" la aeronave como una maniobra evasiva evitando colisionar con otro avión. Si ambas aeronaves están equipadas con el sistema TCAS II, cada computadora emitirá una instrucción de evasión que no genere conflictos entre sí [36].

El TCAS II envía una onda de radio de 1030 MHz al receptor del intruso con un mensaje de pregunta en todas las direcciones para determinar la distancia, orientación y altitud de este, después de que haya transcurrido un cierto retraso, el transmisor del intruso responde al mensaje de la pregunta a una frecuencia de 1090 MHz [35]. El tiempo transcurrido entre el envío de la pregunta y la recepción de la respuesta representa la distancia del intruso.

En la situación de tráfico circundante recopilada, el TCAS II utiliza los datos de distancia y altitud del intruso para calcular repetidamente su posición relativa, la tasa de acceso y la velocidad vertical prediciendo su trayectoria como se muestra en la ilustración 47, determinando una ruta de vuelo libre de colisiones, es decir determina la manipulación del eje vertical necesaria para evitar la colisión (Ilustración 48).

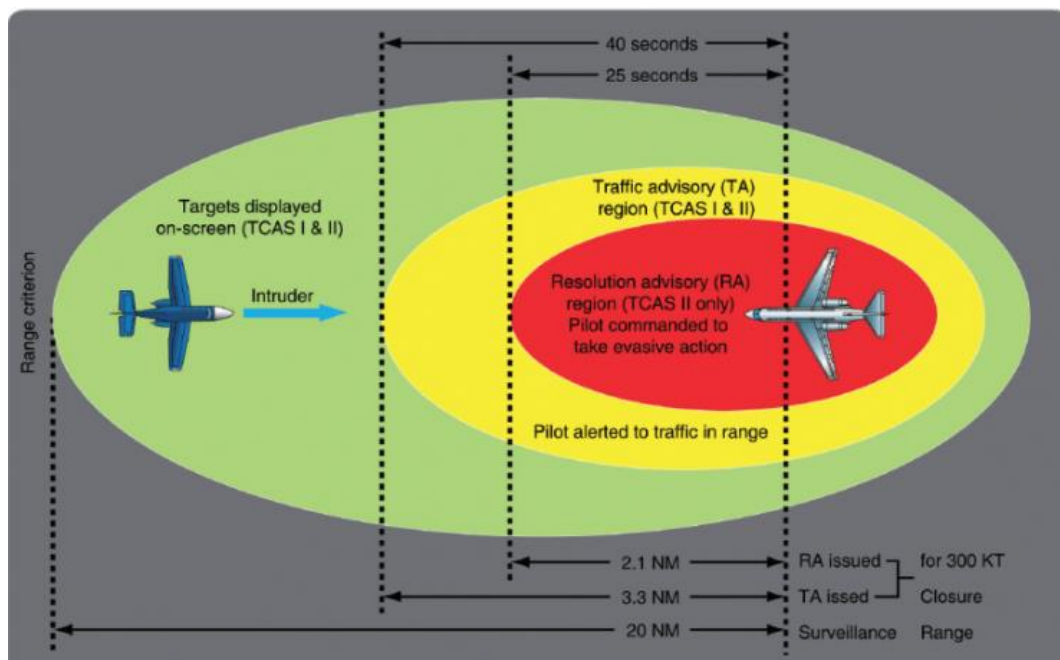


Ilustración 47. Alarma de acceso (TA) y alarma de intrusión (RA) del TCAS <sup>47</sup>

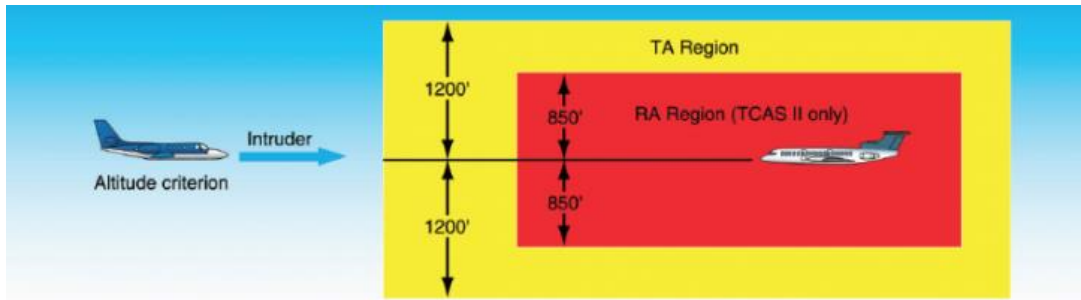


Ilustración 48. Maniobra de eje vertical en el TCAS <sup>48</sup>

Cuando el intruso ingresa, unos 35-45 segundos antes de la colisión se emite la alarma de acceso (TA) al ingresar al área de advertencia, que es aproximadamente 20-30 segundos antes de la colisión, y se emite una alerta de intrusión (RA) para indicar el intruso [36].

### 3.8 Sistema de Control de Tráfico Aéreo (ATC)

El ATC provee información para a las aeronaves desde una base controlada en tierra que es utilizada para evitar colisiones, acelerar los despegues, organizar y coordinar el tráfico aéreo.

El sistema ATC dispara una señal radioeléctrica desde una antena direccional, cuando golpea un objetivo crea una onda reflectante que devuelve una parte de la energía que recibe, este tiempo de reciprocidad de la onda de radio junto a las características de orientación de la antena pueden medir la posición (orientación y distancia) del objetivo, las ondas de radio se disparan y reciben en todas las direcciones desde la antena terrestre [37].

Utilizando este mismo principio, la detección del objetivo se lleva a cabo mediante el 1er Radar de Vigilancia (PSR: Radar primario de vigilancia), como se muestra en la ilustración 49.

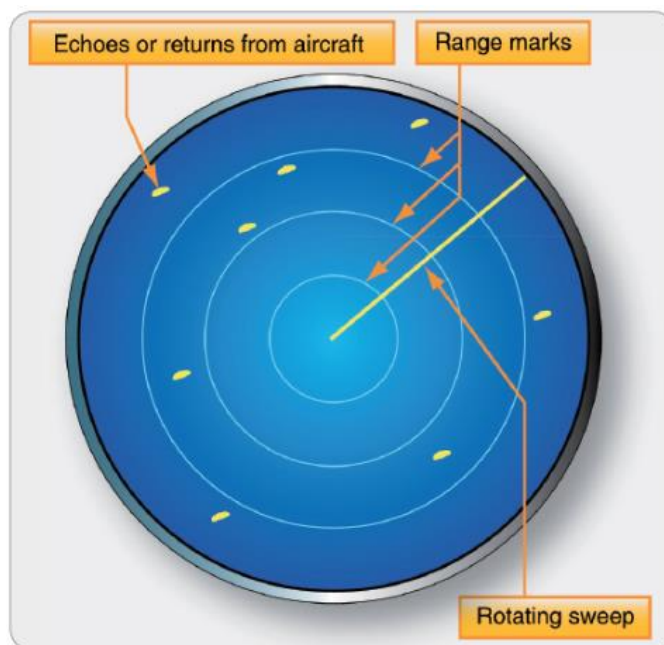


Ilustración 49. Radar primario de vigilancia (PSR) <sup>49</sup>

El radar secundario de vigilancia (SSR) dispara una señal de pregunta desde un interrogador en tierra, y el transpondedor de la aeronave envía la señal de respuesta correspondiente a la señal de pregunta a la instalación en tierra. El sistema SSR responde a una pregunta de 1030 MHz desde la estación terrestre con los transpondedores a 1090 MHz al unísono [38], es decir, el transpondedor SSR envía una respuesta de Modo-A (código de identificación) / C (información de altitud) a la pregunta All Call (Tabla 4), para que el agente de control en tierra pueda conocer la orientación, distancia, código de identificación y altitud de la aeronave, lo que facilita la distinción de esta.

Sin embargo, en el espacio aéreo de alto tráfico, los pulsos de respuesta se superponen, lo que puede llevar a riesgo de interferencia, por lo que la aplicación de la tecnología Mode-S le da a la aeronave una dirección única correspondiente a 24 bits, y permite hacer preguntas individuales a cada aeronave equipada con la estación terrestre Mode-S, compensando así las deficiencias del SSR existente mediante la construcción de un enlace de datos 1:1 [38].

El proceso de interrogación y respuesta del ATC se muestra a continuación:

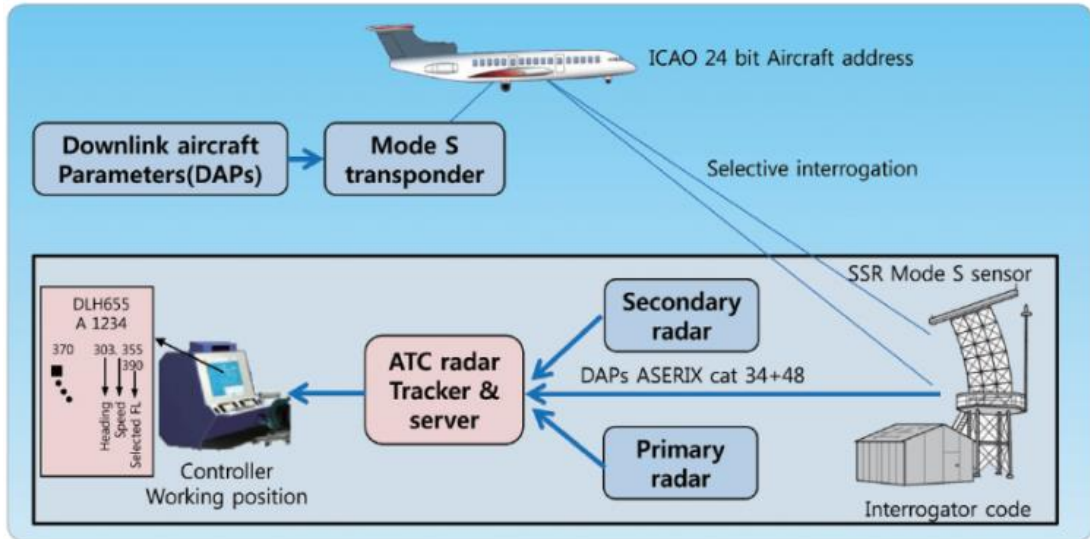


Ilustración 50. Sistema de Control del Tráfico Aéreo <sup>50</sup>

Tabla 4. Configuraciones del SSR

ATC/MODE	INFORMATION ABOUT THE A/C
A	Identification
C	Altitude
S	Selective call, flight data

La función del radar secundario de vigilancia (SSR) puede complementar la información del radar primario de vigilancia (PSR) para reducir significativamente la carga de trabajo del controlador, así como aumentar la capacidad de control y la seguridad de la operación en el control del tráfico aéreo real. Debido a la alta demanda de aeronaves en la actualidad han comenzado a aparecer muchos problemas en las operaciones del SSR, como se mencionó anteriormente todos los aviones están expuestos a riesgos inherentes de hacer y responder preguntas con solo dos posibilidades principales de envío y recepción. Debido a estas limitaciones, se han realizado una serie de mejoras al rendimiento de los sistemas de inteligencia, vigilancia y reconocimiento aéreo (ISR) existentes. La ilustración 51 muestra la antena del avión para el sistema ATC.





Ilustración 51. Antena ATC <sup>51</sup>

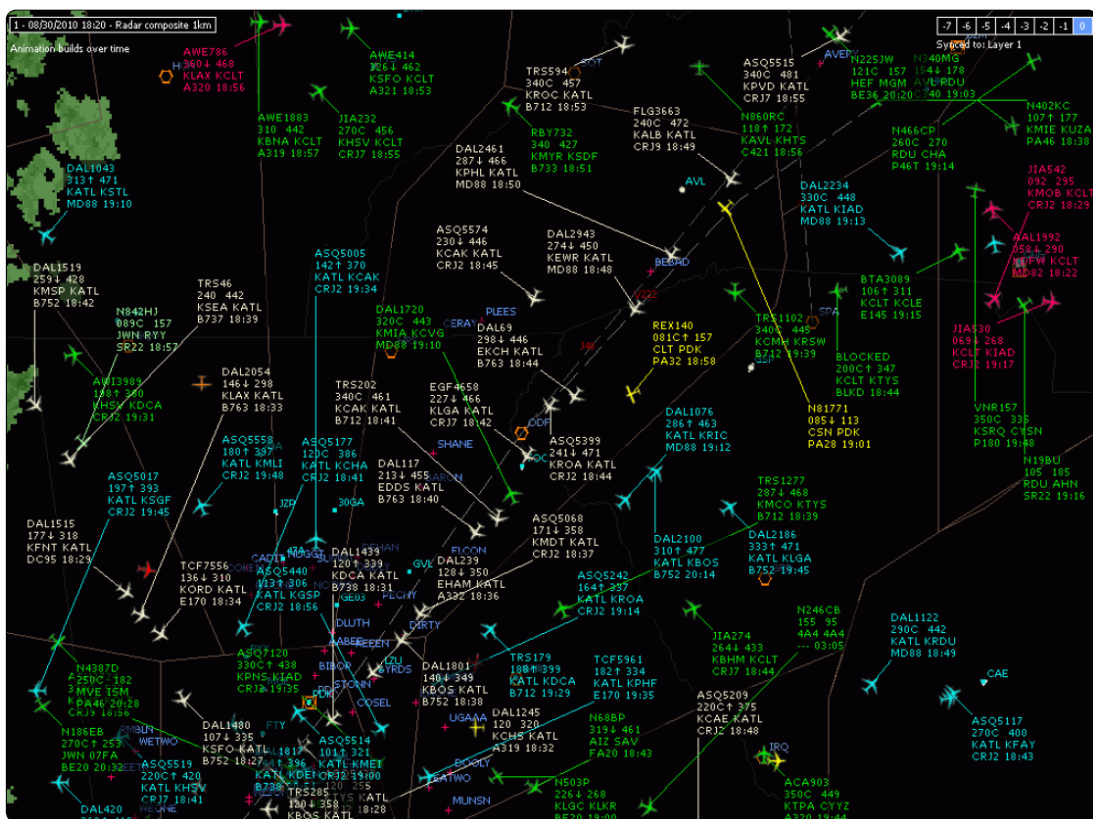


Ilustración 52. Información del tráfico aéreo en una pantalla indicadora de posición <sup>52</sup>

La ilustración 52 muestra un sistema de balizas de radar de control de tráfico aéreo (ATCRBS).

Como una forma de mejorar el rendimiento del SSR, la primera es introducir una técnica Mono-Pulse en los SSR existentes, y la segunda es introducir Modo-S (técnicas de direccionamiento selectivo) en el SSR. La precisión de las mediciones del acimut puede mejorarse considerablemente mediante el



uso de la técnica del monopolso en la estación terrestre sin necesidad de modificar el equipo SSR existente [39], reduciendo así la confusión y aumentando también la eficiencia de utilización de la frecuencia. Esta puede que no sea una solución fundamental para mejorar los diversos problemas del SSR existente, pero puede retrasar la saturación con un aumento del tráfico durante un período de tiempo considerable.

Por otro lado, la técnica de direccionamiento selectivo (modo-S) en el SSR, difiere más del método tradicional en que la aeronave puede ser llamada individualmente para realizar las funciones de consulta y respuesta. Cuando se coloca dentro del área del haz de antena del interrogador de la aeronave, el interrogador puede elegir por sí mismo qué aeronave y en qué momento preguntar. Esto es posible asignando una dirección única a cada aeronave, bajo este método se pueden asignar 1,6 millones de códigos diferentes utilizando 24 bits [38], evitando la confusión por la imposibilidad de repetir el mismo código y superando varios errores y deficiencias que solían ocurrir en los ATC tradicionales.

Una ventaja destacada del modo S del SSR es que puede ser compatible con los sistemas SSR existentes (modos A, C) utilizando la misma frecuencia que la frecuencia de transmisión existente. Como resultado, el servicio del interrogador SSR modo S puede proporcionarse con las funciones de los modos A y C existentes sin ningún cambio significativo en el equipo de carga útil.

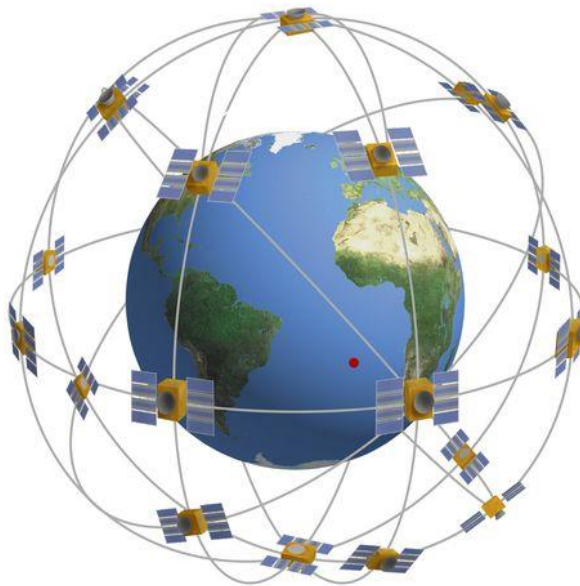
### **3.9 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)**

El GPS es un sistema que obtiene una ubicación recibiendo ondas de radio lanzadas desde un satélite y midiendo el tiempo de viaje, puede medir una posición 3D utilizando 4 o más satélites.

El Sistema de Posicionamiento Global se desarrolló en la década de 1970 con finalidad militar por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, a partir de 1980 los códigos C/A (Adquisición aproximada) de señal GPS han estado abiertos para uso civil, lo que permite el posicionamiento en todo tipo

de clima las 24 horas en cualquier parte del mundo, con una precisión de posición de aproximadamente 4 metros horizontalmente y 3 metros verticalmente [40].

El sistema GPS está constituido de satélites, instalaciones de control terrestre y receptores GPS. Al menos 24 satélites GPS operan en 6 órbitas a intervalos de 60 grados en longitud, con ángulos de inclinación de 55 grados desde el ecuador, y 4 a 5 satélites que operan en cada órbita a un intervalo orbital de 11 horas y 58 minutos, aproximadamente a 20200 km sobre la superficie de la Tierra [41]. Así, es posible recibir más de 4 satélites equipados con un reloj atómico de cesio o rubidio desde cualquier parte del planeta.



*Ilustración 53. Segmentación espacial del GPS, constituido por 24 satélites NAVSTAR <sup>53</sup>*

Para calcular la diferencia de tiempo entre la posición (latitud/longitud/altitud) y el satélite y el período de recepción en la aeronave, se deben recibir al menos 4 señales, como se observa en la ilustración 54.

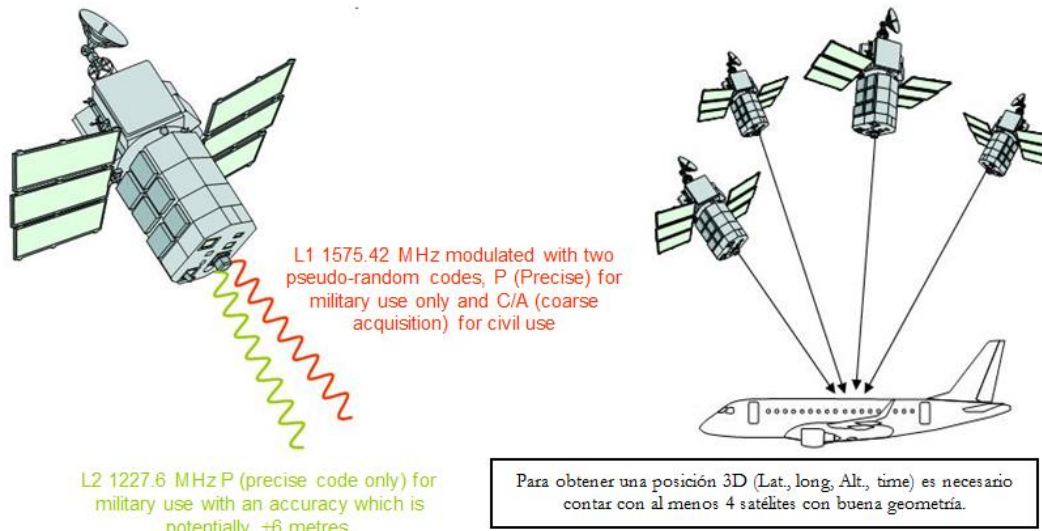


Ilustración 54. Posicionamiento de una aeronave a través del GPS <sup>54</sup>

### 3.9.1 Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS)

El GNSS es un sistema global de navegación por satélite conformado por el GPS en los Estados Unidos (que comenzó a desarrollarse en 1973) y el GLONASS en Rusia (lanzado en 1982) [42], en el que un receptor en tierra recibe señales de al menos 4 satélites, que pueden determinar la información de ubicación dentro de los 100m y el tiempo en nanosegundos para calcular la posición actual del usuario en función de la posición y la información de navegación del satélite, es decir, cronometrando el tiempo de retardo de una señal lanzada desde un satélite hasta el receptor, se puede encontrar la distancia desde el receptor hasta el satélite y calcular la posición actual del usuario mediante trigonometría.

### 3.9.2 Segmentación del GPS

El sistema de posicionamiento global GPS generalmente se compone de tres segmentos [41]:

### **3.9.2.1 Segmento espacial**

Este segmento está conformado por la constelación NAVSTAR (Navigation Satellite Timing An Ranging) a una altitud de 20200 km, en seis planos orbitales con un ángulo de inclinación de 55°, se encuentran 24 satélites que viran alrededor del planeta tierra en un ciclo de 12 horas, cada uno transmitiendo código y datos de navegación a dos frecuencias portadoras de banda L (la Banda L usa las frecuencias de 1 a 2 GHz [40]), L1 de 1575,42 MHz y L2 de 1227,6 MHz. La frecuencia del código C/A (Coarse/Acquisition) es de 1023 MHz y se transmite en la portadora L1, y la frecuencia del código P (Precise) es de 10,23 MHz, que se transporta y transmite tanto en las portadoras L1 como L2. Las señales de código C/A y P incluyen códigos de identificación de satélite, transmisiones de satélites, tiempos de transmisión, velocidad aérea del estado del satélite y estado del satélite, que son los datos necesarios para la medición de la posición.

Actualmente, L1 devuelve el Pcode (código preciso) y Coarse/Acquisition, mientras que L2 solo devuelve el código preciso Pcode.

### **3.9.2.2 Segmento de control**

El sector de control rastrea y monitorea satélites GPS a través de varias jurisdicciones que están ampliamente distribuidas en todo el mundo, estimando la ubicación de los satélites con la mayor precisión posible y transmitiendo información de calibración a los satélites. Cada satélite transmite esta información de corrección establecida al usuario como parte de los datos de navegación. El sistema es conformado por 5 estaciones de monitoreo y vigilancia, 4 estaciones de antenas transmisoras en tierra y una de control maestra [40].



Ilustración 55. Segmento de control del GPS <sup>55</sup>

### 3.9.2.3 Segmento de usuario

La segmentación para usuarios está conformada de receptores de navegación por satélite los cuales reciben señales de satélite para calcular su posición, y diversos dispositivos desarrollados para lograr sus respectivos objetivos específicos mediante su aplicación [41].

El sector de usuarios tiene diversos usos y se aplica a aviones, barcos y automóviles en tierra. Los receptores satelitales utilizan los datos de navegación recibidos de los satélites para calcular la posición y la velocidad del usuario. La antena que se conecta al receptor tiene su propio amplificador, y la señal de la antena que ha pasado por alta frecuencia se convierte en una frecuencia intermedia.

La señal de satélite se demodula a partir de la frecuencia intermedia y se convierte en información como mensajes, pseudo rango, etc., y se calcula mediante un microprocesador. Si el receptor rastrea solo una señal de satélite, puede obtener información de ese satélite sobre la posición relativa de los otros satélites, de modo que todas las señales visibles de satélite puedan rastrearse en un corto período de tiempo.

La información de posición y velocidad calculada mediante la recepción de señales de satélite se utiliza básicamente para la navegación móvil y el

seguimiento.

### **3.9.3 Principio de posicionamiento del sistema de navegación por satélite GPS**

El principio de posicionamiento del GPS se desarrolla como sigue:

- Se recibe una señal de satélite con un tiempo registrado enviado desde su ubicación actual y se obtiene su tiempo de llegada para calcular la distancia entre el satélite y la posición actual donde se encuentra el receptor.

Cuando la señal se recibe simultáneamente desde tres satélites, su ubicación se convierte en su posición actual en 3D (latitud, longitud y altitud, posicionamiento 3D) dada por la intersección.

- El GPS transmite la posición magnética del satélite en relación con el centro de la tierra al sistema de coordenadas fijas de la tierra, y también transmite el tiempo de transmisión de la señal, la velocidad de ciclo, la señal de estado del satélite, etc.
- El receptor recibe la señal de navegación del satélite seleccionado eligiendo 4 satélites con distancias relativamente lejanas entre ellos, lo cual permite una medición más favorable de la distancia en órbita, la distancia se calcula midiendo el tiempo que tarda la señal enviada del satélite al receptor para luego multiplicarla por la velocidad de su propagación. El satélite y el receptor generan la misma señal al mismo tiempo, y el receptor compara la señal del receptor con la señal recibida del satélite para obtener el paralaje. En este momento, el satélite y el receptor deben estar equipados con un reloj en cada uno que pueda medir la hora exacta. El receptor de GPS utiliza la señal de navegación recibida para calcular la distancia entre el receptor y cada satélite para determinar su ubicación como se esquematiza en la ilustración 56 y 57.

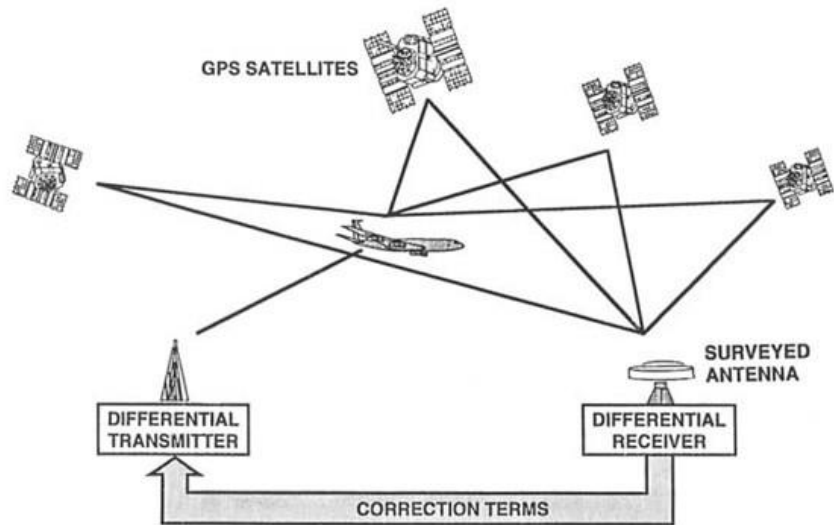


Ilustración 56. Localización GPS <sup>56</sup>



Ilustración 57. Localización de la aeronave utilizando 4 satélites <sup>57</sup>

### 3.9.4 Sistema de Aumento de Área Amplia (WAAS)

Con el fin de aumentar la precisión del GPS para la navegación de aeronaves, se desarrolló en Estados Unidos el Sistema de Aumento de Área Amplia (WAAS). Consiste en aproximadamente 25 estaciones terrestres con capacidad de medición precisa que reciben señales GPS y transmiten información correctiva a la aeronave [43]. La ilustración 38 proporciona una

visión general completa de los componentes y operaciones de WAAS.

La estación terrestre WAAS recibe la señal GPS y el error de localización enviado por las 2 estaciones terrestres centrales. Analiza la información de tiempo y ubicación y envía el comando modificado al satélite de comunicación en órbita geoestacionaria. El satélite propaga una señal similar a GPS para que el receptor GPS pueda modificar la información de ubicación recibida del satélite GPS. WAAS también permite que el receptor GPS utilice WAAS. Si está equipado, la aeronave puede realizar un acceso de precisión en miles de aeropuertos sin necesidad de ningún equipo de aproximación terrestre. El sistema WAAS puede reducir los errores de posición horizontal y verticalmente de 1m a 3m.

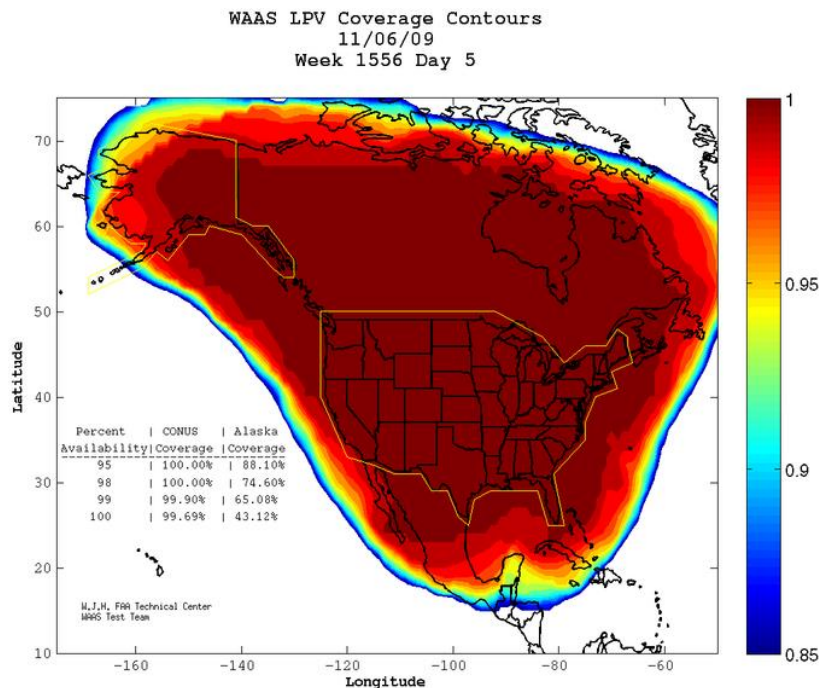


Ilustración 58. Cobertura del WAAS <sup>58</sup>

La cobertura del WAAS comprende Estados Unidos, Canada y Mexico, el área roja del mapa en la ilustración 58 indica mayor cobertura.



### 3.10 Sistema de Gestión de Vuelo (FMS)

El sistema de gestión de vuelo o Flight Management System (FMS) calcula la velocidad, el ascenso, la trayectoria y el empuje optimizados mediante el uso de información dinámica del vuelo recopilada del Sistema de Referencia Inercial (IRS) y la Computadora de Datos Aéreos (ADC) para garantizar que el vuelo se pueda llevar a cabo con el consumo óptimo de combustible y el tiempo de viaje de acuerdo con el plan de vuelo establecido por el piloto, también proporciona información fija como el punto de paso y los procedimientos de elevación y aterrizaje los cuales se almacenan en la Base de Datos de Navegación (NDB). [47]

Según los cálculos, el FMS realiza el control de actitud y el control de empuje en el Sistema Director de Vuelo de Piloto Automático (AFDS) y el Sistema de Aceleración Automática del motor para permitir un vuelo automatizado, de esta forma se aminora el trabajo de la tripulación, prescindiendo de ser necesario, la figura del navegante o del ingeniero de vuelo.

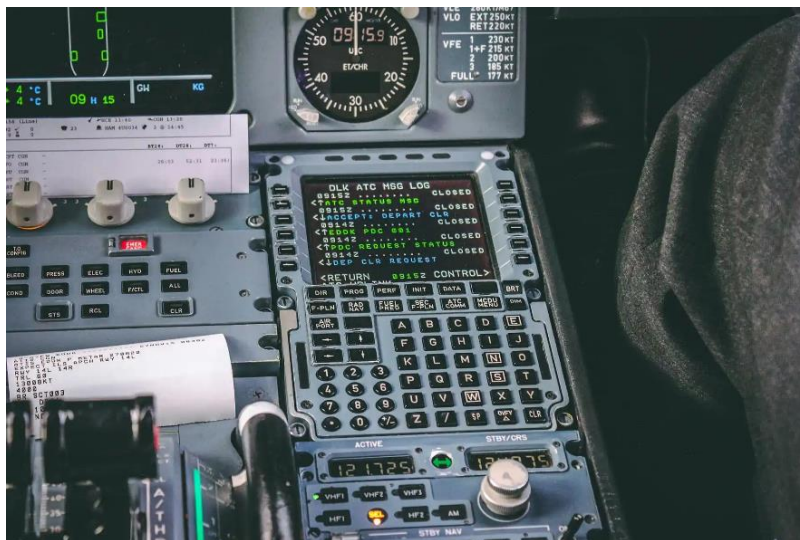


Ilustración 59. Pantalla de la unidad de control del FMS<sup>59</sup>

La unidad de visualización de control (CDU) permite visualizar el contenido de los datos de navegación por el piloto procesados por el FMC, como el número de revoluciones del motor, y funciones de entrada que el piloto

utiliza para comandar el FMC.

Entre las diversas funciones de FMC, resaltan la navegación lateral (LNAV) y la navegación vertical (VNAV): [48]

### **3.10.1 Función de navegación horizontal (LNAV)**

La función LNAV del FMC controla la trayectoria de vuelo en la dirección horizontal.

Debido a que el FMC tiene una base de datos llamada Base de Datos de Navegación (NDB), que almacena toda la información relacionada con la ruta, incluidos los aeropuertos de todo el mundo, las instalaciones de apoyo a la navegación por radio en tierra y toda la información relacionada con la ruta, el piloto simplemente ingresa la ruta de vuelo deseada. La ruta generalmente se establece en el momento de la salida, pero también se puede cambiar durante el vuelo. Una vez que se selecciona la ruta de vuelo, el recorrido desde la ubicación actual hasta el siguiente punto de ruta especificado es calculado automáticamente por el FMC.

Durante el vuelo, el FMC compara la ubicación actual con la ruta de vuelo establecida y, si hay una diferencia, el piloto automático (FCC: Flight Control Computer) interviene manipulando el timón para controlar la trayectoria de vuelo. Para realizar esto, el FMC debe conocer su ubicación actual con precisión, por lo que se refiere a la información del dispositivo de navegación inercial (IRS) o la información de navegación recibida de una instalación de soporte de navegación inalámbrica.

### **3.10.2 Función de navegación vertical (VNAV)**

La función VNAV del FMC controla la ruta de vuelo vertical más eficiente para ahorrar combustible.

Antes de la salida, el FMC recopila datos como el peso de la aeronave, la cantidad de combustible y el rendimiento del motor, y calcula el valor de

empuje de acuerdo con la velocidad de elevación adecuada para el tipo de aeronave y el motor en cuestión, teniendo en cuenta las limitaciones de velocidad y altitud en cada punto de referencia de acuerdo con el plan de vuelo.

En vuelo, la velocidad o empuje óptimo se calcula haciendo referencia a datos como la altitud de vuelo, el peso, la dirección y velocidad del viento. Además, se realizan varios cálculos necesarios para la operación, como la predicción del consumo de combustible según el tiempo y distancia de vuelo, el cálculo de la altitud óptima de vuelo y el cálculo de la velocidad de entrada, así como la información del ángulo de ascenso según el objetivo, estos datos se transmiten a la FCC para controlar la elevación. Al mismo tiempo, el empuje del motor es controlado por medio del sistema de aceleración automática.

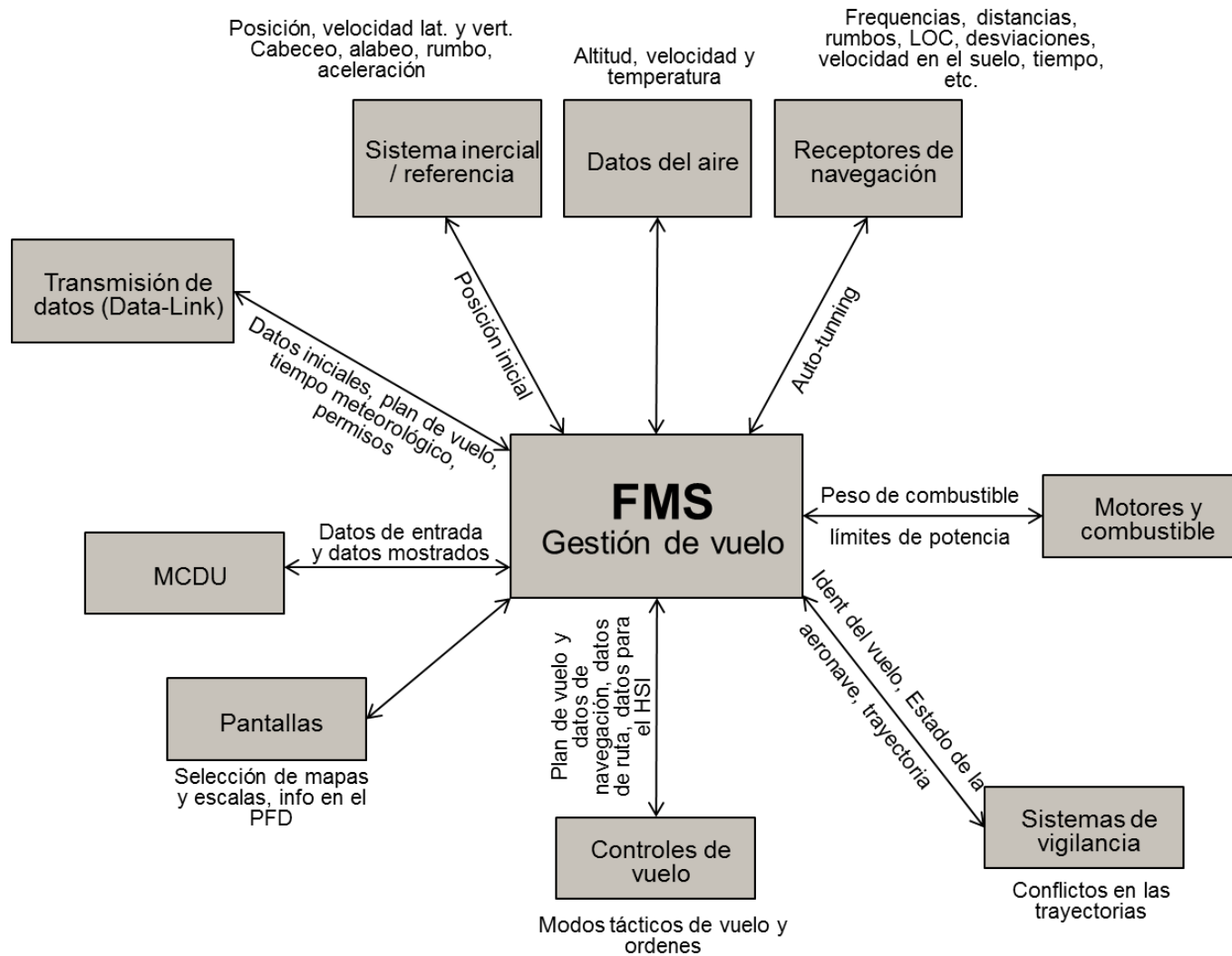


Ilustración 60. Típico diagrama de bloque de la interfaz del gestor de vuelo <sup>60</sup>

## 4. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN EN EL ESPACIO AÉREO COLOMBIANO

### 4.1 Reglamentos aeronáuticos de Colombia

Según el volumen II del plan de navegación aérea para Colombia. Nivel Operacional Técnico Operacional Parte A, la normalización de los sistemas de radioayudas a la navegación aérea está conformada como sigue:

Tabla 5. Sistemas de radioayudas según el plan de navegación aérea colombiano.

1	El sistema de aterrizaje por instrumentos (ILS)
2	El sistema global de navegación por satélite (GNSS)
3	El radiofaro omnidireccional VHF (VOR)
4	El radiofaro no direccional (NDB)
5	El equipo radio telemétrico (DME)
6	La radiobaliza VHF en ruta (IM, MM, OM)

Se procede a desglosar cada uno de los ítems anteriormente descritos enfatizando en sus requisitos básicos de funcionamiento.

#### 4.1.1 Requisitos para el ILS

El Sistema de aterrizaje por instrumental debe contener los siguientes elementos imprescindibles:

- Equipo localizador VHF.
- Equipo UHF de trayectoria de planeo.
- Radiobalizas VHF o equipo radio telemétrico (DME).

En la tabla 6 se muestran las especificaciones de operación, así como algunas características para los sistemas que componen el ILS según el reglamento aeronáutico de Colombia:

Tabla 6. Especificaciones de operación del ILS en el espacio aéreo colombiano.

<b>Equipo</b>	<b>Tipo de modulación de la señal</b>	<b>Frecuencia de operación</b>	<b>Polarización de la señal emitida</b>	<b>Índice de modulación</b>
<b>Localizador VHF</b>	2 señales AM - Señal de 90 Hz -Señal de 150 Hz	Banda de frecuencia de 108 hasta 111,975 MHz.	Polarización horizontal.	El índice de modulación para las señales de 90 y 150 Hz estará en el rango de 18 a 22%.
<b>Equipo UHF de trayectoria de planeo</b>	2 señales AM - Señal de 90 Hz -Señal de 150 Hz	Banda de frecuencia de 328,6 a 335,4 MHz.	Polarización horizontal.	El índice de modulación para los tonos de 90 y 150 Hz será del 40%

<b>Radiobalizas VHF</b>	Modulación en amplitud. - 3000 Hz para radiobaliza interna - 1300 Hz para radiobaliza intermedia - 400 Hz para radiobaliza exterior	Las radiobalizas trabajarán a 75 MHz.	Polarización horizontal.	El índice de modulación para las radiobalizas será del 95%.
-------------------------	--	---------------------------------------	--------------------------	---

**Notas:**

- La radiación de las antenas del localizador proporcionará un diagrama de compuesto por dos regiones de rumbo con predominación de un tono debido a cada una de las señales de 90 Hz y 150 Hz.
- Un tono de 150 Hz ubica el aeroplano a la derecha de la pista de aterrizaje y otro tono de 90 Hz asociado a la izquierda.
- El DME dará información de la distancia desde el punto de vista del aeroplano a las radiobalizas.

**4.1.2 Requisitos del GNSS - Sistema Mundial de Navegación por Satélite**

El GNSS dará a la aeronave información sobre posición y hora, se proporcionará el servicio mediante elementos a bordo, en tierra o satelitales, haciendo énfasis en el servicio prestado por el GPS.

En la tabla 7 se muestran las especificaciones de operación, así como algunas características para el sistema de navegación por satélite según el reglamento aeronáutico de Colombia:

Tabla 7. Especificaciones de operación del GPS en el espacio aéreo colombiano.

<b>Frecuencia de portadora</b>	Cada satélite GPS propagará una señal de radio SPS (Servicio de Posicionamiento Estándar) a una frecuencia de 1575,42 MHz.
<b>Modulación de la portadora</b>	La señal L1 SPS será modulada por desplazamiento de fase bipolar (BPSK) con un ruido pseudoaleatorio (PRN) de código C/A de 1023 MHz.
<b>Potencia de la señal</b>	Funcionará en una banda de $\pm 12$ MHz (1563,42 – 1587,42 MHz)
<b>Cobertura</b>	Desde el planeta tierra hasta 3000 km.
<b>Polarización de la señal transmitida</b>	La señal transmitida será de polarización circular dextrógira.

#### 4.1.3 Requisitos para el VOR o radiofaro omnidireccional VHF

El Radiofaro omnidireccional VHF VOR radiará una señal de radio a la cual se aplicarán dos modulaciones independientes de 30 Hz.

En la tabla 8 se muestran las especificaciones de operación, así como algunas características para el sistema VOR según el reglamento aeronáutico de Colombia:



Tabla 8. Especificaciones de operación del VOR en el espacio aéreo colombiano.

<b>Frecuencia de operación</b>	Banda de frecuencia de 111,975 a 117,975 MHz.
<b>Modulación de la portadora</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Señal de fase variable, una subportadora de 9960 Hz con modulación FM a 30 Hz</li> <li>- Señal fase de referencia modulación AM a 30 Hz</li> </ul>
<b>Polarización de la señal emitida</b>	Polarización horizontal
<b>Índice de modulación</b>	El índice de modulación de ambas señales oscilará entre 28 y el 32%.

#### 4.1.4 Requisitos para el NDB

Las radiobalizas no direccionales NDB radiarán una señal portadora sin interrupción y serán identificadas al ser interrumpidas por una señal modulada en amplitud.

En la tabla 9 se muestran las especificaciones de operación, así como algunas características para las balizas no direccionales (NDB) según el reglamento aeronáutico de Colombia:

Tabla 9. Especificaciones de operación del NDB en el espacio aéreo colombiano.

<b>Zona de servicio</b>	Estará dentro de un radio de 18,5 y 46,3 km
-------------------------	---

<b>Frecuencia de operación</b>	Dependiendo de la disponibilidad en el espectro de las frecuencias abarcadas desde 190 hasta 750 kHz
<b>Modulación de la portadora</b>	Se modulará la portadora bajo una frecuencia de 1020 Hz con tolerancia de 50 Hz o de 400 Hz con tolerancia de 25 Hz.
<b>Índice de modulación</b>	Se escogerá el porcentaje de modulación más elevado posible.
<b>Identificación</b>	Identificación por separado de cada NDB, por medio de 2 o 3 letras del código Morse internacional

#### **4.1.5 Requisitos del DME o equipo radio telemétrico UHF**

El sistema DME proporcionará una medición de distancia comprendida entre un punto de referencia en tierra y la aeronave.

El sistema se compone de dos partes imprescindibles, una configurada a bordo y otra en tierra. El equipo instalado a bordo es llamado “interrogador” y el equipo en tierra “transpondedor”, los interrogadores deben preguntar a los transpondedores y enviar al avión respuestas síncronas con las preguntas, de esta manera se obtiene el cálculo de la distancia exacta.

En la tabla 10 se muestran las especificaciones de operación, así como algunas características para los equipos radio telemétricos UHF o DME según el reglamento aeronáutico de Colombia:

Tabla 10. Especificaciones de operación del DME en el espacio aéreo colombiano.

<b>Frecuencia de operación</b>	Los equipos trabajarán en la banda de frecuencia de 960 a 1215 MHz, Las frecuencias del interrogador y del transpondedor serán asignadas con canales separados por 1 MHz.
<b>Canales</b>	Los canales DME estarán conformados por dúos de frecuencias de respuesta e interrogación.
<b>Identificación del transpondedor</b>	<p>El equipo en tierra puede transmitir dos señales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificación independiente: compuesta por impulsos en código Morse internacional</li> <li>- Señal asociada: cuando el DME es combinado con otra radioayuda.</li> </ul> <p>En ambos casos se emplean señales conformadas por una serie de impulsos.</p>
<b>Decodificación del transpondedor</b>	El transpondedor incluye un circuito de decodificación que es activado cuando recibe un par de impulsos con duración y separación concordantes con las señales del interrogador.
<b>Decodificación del interrogador</b>	El interrogador incluye un circuito decodificador que solo se activa cuando recibe un par de impulsos con duración y separación concordantes con las señales del transpondedor.
<b>Polarización</b>	Polarización vertical

La capacidad de los transpondedores está definida por el tránsito máximo del área donde estén instalados o de 100 aeronaves, se escogerá siempre el

valor más bajo entre las dos opciones.

#### 4.1.6 Requisitos para las radiobalizas VHF en ruta

En la tabla 11 se visualizan las especificaciones de operación, así como algunas características para las radiobalizas VHF en ruta según el reglamento aeronáutico de Colombia:

Tabla 11. Especificaciones de operación para las radiobalizas VHF en ruta en el espacio aéreo colombiano.

<b>Frecuencia de operación</b>	Las emisiones de las radiobalizas VHF operaran a 75MHz
<b>Modulación de la portadora</b>	Se modulará la señal a 3000 Hz $\pm$ 75 Hz
<b>Índice de modulación</b>	El índice de modulación de la portadora estará entre 95 y 100%
<b>Polarización</b>	Radiación con polarización horizontal

Debido a su ubicación geográfica Colombia maneja casi el 75% del tráfico de rutas en todo el continente americano [19], sin embargo, la instalación de radioayudas en tierra ha tenido que sobreponerse a la composición del terreno montañoso del país pues la mayoría de sus aeropuertos están construidos sobre la cordillera de los Andes, influyendo directamente en la baja densidad de instalaciones, actualmente la infraestructura de radioayudas posicionadas sobre el territorio colombiano consta de 50 sistemas VOR, 52 DME, 11 sistemas ILS Y 18 sistemas NDB [20].

La ubicación de los sistemas de navegación VOR/DME e ILS es expuesta en los siguientes mapas. [44]



Ilustración 61. Mapa Sistemas de Navegación VOR/DME <sup>61</sup>



Ilustración 62. Mapa Sistemas ILS <sup>62</sup>

En el caso de los NDB (Radiofaro no direccional), el PSNA (Proveedor de Servicios a la Navegación Aérea) paulatinamente los ha ido desinstalando con un progreso del 93%.

## 4.2 Disponibilidad y antigüedad de equipos de navegación

La disponibilidad de los sistemas de navegación VOR/DME e ILS reportados a 2020 está expuesta en la ilustración 63:

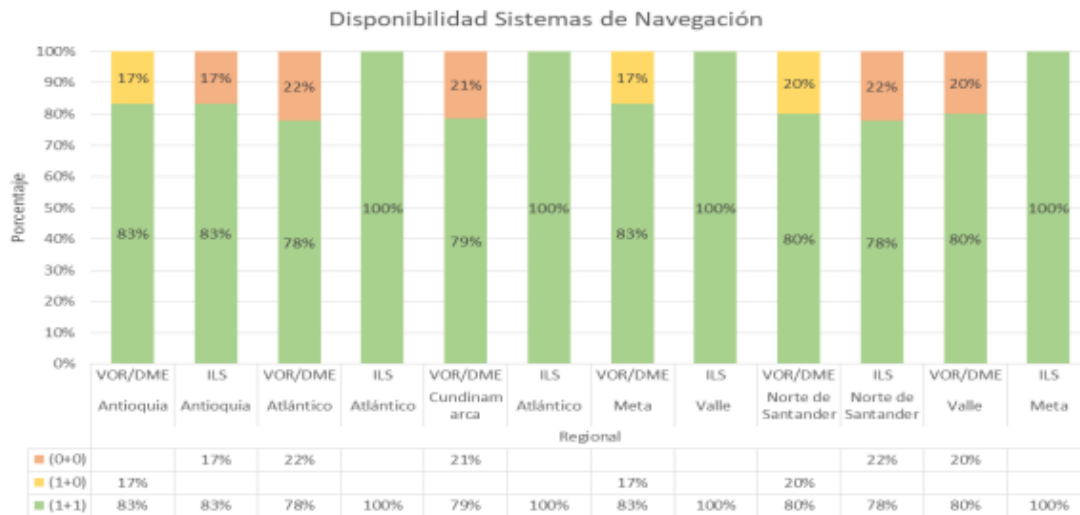
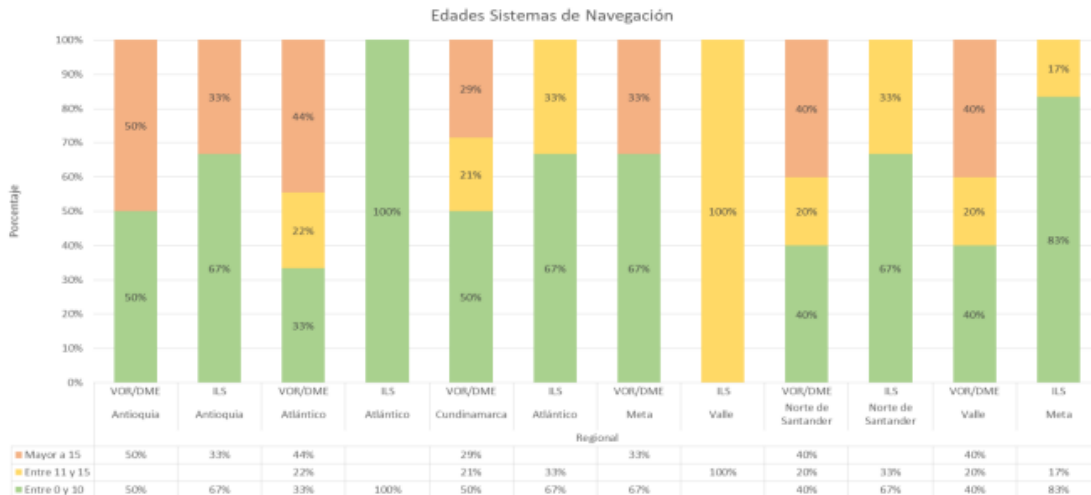


Ilustración 63. Gráfica. Disponibilidad Sistemas de Navegación ILS y VOR/DME (2020) por Regiones<sup>63</sup>

En general, el CNSP (Proveedor de Servicios de Comunicaciones, Navegación, Vigilancia, Automatización, Meteorología y Energía) cuenta con un sistema de ingeniería de navegación el cual responde a las exigencias operacionales asegurando el óptimo desempeño de las infraestructuras. Este sistema de ingeniería incluye las radioayudas que respaldan el Sistema mundial de navegación satelital.

La antigüedad de los sistemas de navegación VOR/DME e ILS reportados a 2020 está expuesta en la ilustración 64:



*Ilustración 64. Gráfica. Antigüedad de sistema de navegación <sup>64</sup>*

En la ilustración 64 están agrupados por grupos de edades los sistemas VOR/DME e ILS reportados a 2020 en todo el territorio colombiano.

### 4.3 Sistemas de Vigilancia

Se puede evidenciar en las ilustraciones 65, 66 y 67 la ubicación de los sistemas SSR (Radar Secundario de Vigilancia), ADS-B (Vigilancia Dependiente Automática) y MLAT (Multilateración) instalados por el Proveedor de Servicios a la Navegación Aérea Aerocivil. [44]

En primer lugar, los radares de vigilancia secundarios (SSR), los cuales son sistemas que permiten la identificación y seguimiento de las naves en el espacio aéreo colombiano.





Ilustración 65. Mapa Sistemas de Vigilancia SSR (Radar Secundario de Vigilancia) <sup>65</sup>

Luego, los sistemas de multilateración los cuales permiten medir la distancia entre dos estaciones por medio sus ubicaciones a través de sus señales emitidas.



Ilustración 66. Mapa sistemas de vigilancia MLAT (Multilateración) <sup>66</sup>



Y por último pero no menos importante, los sistemas ADS los cuales permiten obtener la ubicación de las aeronaves a través de navegación satelital, transmitiéndola periódicamente a la torre de control con el fin de realizar seguimiento.



Ilustración 67. Mapa Sistemas de vigilancia ADS (Vigilancia dependiente automática) <sup>67</sup>

## 5. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN PARA EL AEROPUERTO DE PALONEGRO EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA, SANTANDER, COLOMBIA

### 5.1 Visita técnica al Radiofaro Omnidireccional VHF ubicado en la mesa de Los Santos

En la siguiente ilustración se observa el Radiofaro Omnidireccional VHF ubicado en el salto del duende del municipio de Los Santos, Santander, este VOR es de tipo D, es decir trabaja con un arreglo de antenas en circunferencia basado en el efecto Doppler para realizar la ubicación de la aeronave.



*Ilustración 68. D-VOR mesa de Los Santos, Aeropuerto de Palonegro <sup>68</sup>*



En la actualidad la mayoría de los VOR que se encuentran instalados en el terreno colombiano son de tipo VOR Doppler, la señal 30Hz modulada en amplitud es la señal de referencia y la subportadora de 9960Hz modulada en frecuencia es la señal variable.



*Ilustración 69. D-VOR mesa de Los Santos, Aeropuerto de Palonegro <sup>69</sup>*

El sistema VOR trabaja en conjunto con el sistema DME, los cuales tienen un puesto de control desde el cual el operador puede hacer mantenimiento y visualización de los parámetros de funcionamiento de los dos equipos.



*Ilustración 70. Centro de operación y mantenimiento D-VOR mesa de Los Santos, Aeropuerto de Palonegro <sup>70</sup>*



A continuación, podemos visualizar el arreglo de antenas el cual utiliza un radiador de banda lateral que gira a velocidad de 30 revoluciones por segundo para realizar la modulación en frecuencia dependiendo del azimut de la subportadora debido al efecto Doppler.



*Ilustración 71. Conjunto de antenas para efecto Doppler, D-VOR mesa de Los Santos, aeropuerto Palonegro <sup>71</sup>*

Dentro de la estación podemos encontrar los equipos de control para el Medidor de Distancia (DME) y el VOR.



*Ilustración 72. Sistema de control Equipo Medidor de Distancia (DME) y VOR <sup>72</sup>*



El equipo de control del VOR arroja información relevante acerca de su estado, índice de modulación de las señales, código de identificación de la estación y frecuencia de operación entre otros.



Ilustración 73. Sistema de control D-VOR mesa de Los Santos, aeropuerto de Palonegro <sup>73</sup>

El equipo de control del DME arroja información relevante acerca del tiempo de retardo de la baliza, su eficiencia, radio de transmisión, potencia radiada, potencia del transmisor y el error en la frecuencia de operación entre otros.



Ilustración 74. Sistema de control DME mesa de Los Santos, aeropuerto de Palonegro <sup>74</sup>

## 5.2 Visita técnica a las zonas restringidas: Pista, Sistema ILS, Torre de control y CGAB del Aeropuerto de Palonegro, en la ciudad de Bucaramanga

A lo largo de la pista de aterrizaje del aeropuerto de Palonegro de la ciudad de Bucaramanga se encuentran ubicadas 3 estaciones meteorológicas (al inicio, a la mitad de recorrido y al final de la pista).

Típicamente los sistemas meteorológicos reportados en Colombia son los siguientes:

Tabla 12. Sistemas meteorológicos

<b>Sistemas meteorológicos</b>	
EMAS	Sistemas meteorológicos alterno
Ceilómetros	Radares meteorológicos terrestres
RVR – Transmisómetros	Imágenes de satélite GRB
RVR – Visibilímetros	Sistemas de procedimiento de datos MET
Estaciones ultrasónicas de viento	Modelo numérico de predicción
Sistema D-ATIS	

En conjunto todos los equipos meteorológicos conforman el Sistema automático de Observación Meteorológica utilizado en la aeronáutica civil, el cual abarca desde métodos de estimación del alcance visual en tierra hasta sensores de humedad y temperatura con equipos como: pluviómetros, barómetros, transmisómetros, entre otros.

Todos los datos obtenidos por medio de los sensores meteorológicos reposan en un sistema de visualización e integración de datos para ser monitoreados, algunos de estos datos se pueden consultar en tiempo real en



la pagina web de la Aerocivil de Colombia como las imágenes de satélite, información del radiómetro, los radares terrestres, y algunos sistemas alternos de meteorología.

En el aeropuerto de Palonegro podemos encontrar 3 estaciones meteorológicas, en la siguiente ilustración se observa la estación que abarca el inicio de pista conformada por pluviómetro, barómetro, heliógrafo (mide las horas de luz solar), antena y fuente de poder.



*Ilustración 75. Estación meteorológica a inicio de pista <sup>75</sup>*

A mitad de pista se ubica otra estación meteorológica, esta se conforma de un anemómetro para medir la velocidad del viento, veleta, termómetro, antena, fuente de poder y un panel solar como soporte a fallas eléctricas.



*Ilustración 76. Estación meteorológica a mitad de pista <sup>76</sup>*

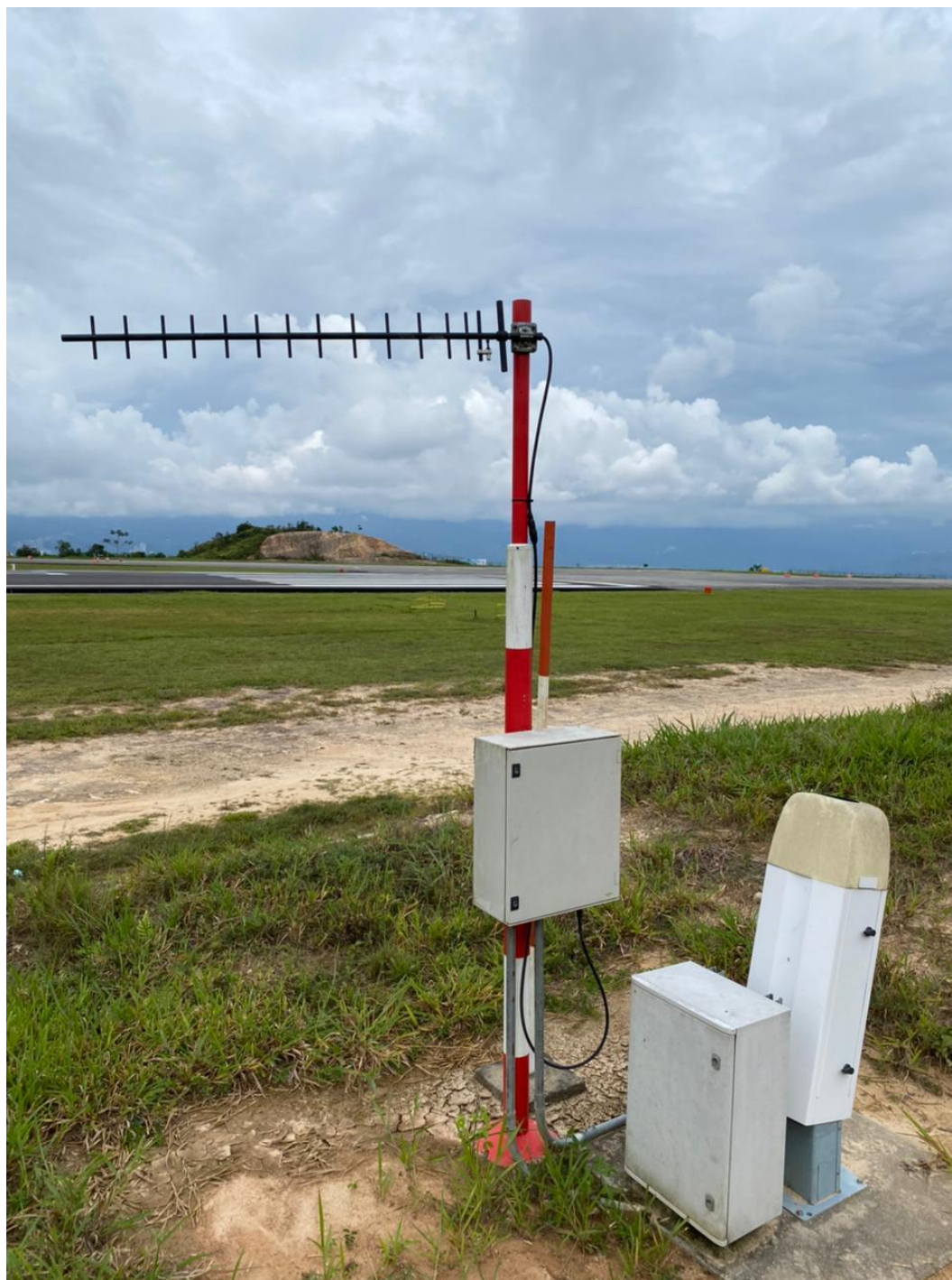


Finalmente, en la terminación de la pista de aterrizaje está dispuesta la última estación meteorológica conformada por los mismos equipos de inicio de pista.



*Ilustración 77. Estación meteorológica a final de pista <sup>77</sup>*

Otro equipo meteorológico instalado en la pista de aterrizaje del aeropuerto de Palonegro es el nefobasímetro el cual permite medir la altura de las nubes por medio del disparo de rayos infrarrojos



*Ilustración 78. Detector de nubosidad por medio de luz infrarroja al borde de la pista de aterrizaje <sup>78</sup>*



El aeropuerto Palonegro de la ciudad de Bucaramanga cuenta con un ILS (Sistema de aterrizaje por instrumentos) conformado por el Glideslope, el localizador y las balizas marcadoras como se muestra a continuación:



*Ilustración 79. Puesto de control del ILS <sup>79</sup>*



El glideslope es conformado por un arreglo de antenas End-Fire ubicadas en la parte superior de la pista, a continuación, observamos el equipo de control para el arreglo de antenas en el cual se visualiza el error de la desviación de la trayectoria además de contar con un sistema de prueba de la potencia de cada antena y un sistema de alarma.

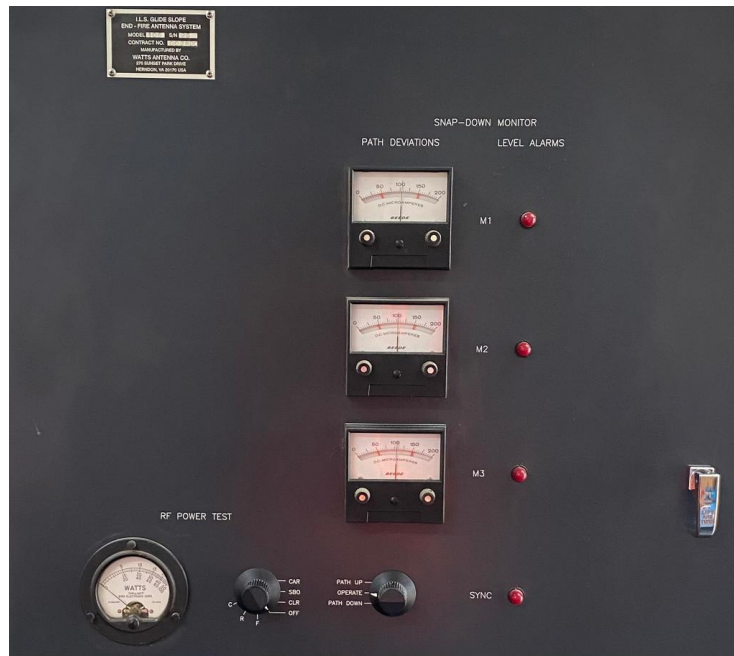


Ilustración 80. Panel de supervisión del Glideslope <sup>80</sup>



Ilustración 81. Módulo de control del Glideslope <sup>81</sup>

En la ilustración 82 se observa el arreglo de antenas End-Fire los cuales son diseñados para obtener enfoque hacia el máximo lóbulo a lo largo del eje del arreglo, comúnmente el arreglo radia únicamente en una dirección.



*Ilustración 82. End-Fire Antenna System para el glideslope <sup>82</sup>*



Como ayuda para el aterrizaje de precisión el aeropuerto de Palonegro también cuenta con luces P.A.P.I. (Indicador de trayectoria de enfoque de precisión) las cuales funcionan como ayuda visual para el piloto.



*Ilustración 83. Luces indicadoras P.A.P.I. indicador de trayectoria de aproximación de precisión <sup>83</sup>*



*Ilustración 84. Antena localizador ILS Palonegro <sup>84</sup>*

El arreglo de antenas del localizador del ILS está situado perpendicular al eje de trayectoria de la pista de aterrizaje y se ubica aproximadamente a 100 metros de esta, el equipo cuenta con un centro de control, y en conjunto, se puede visualizar en las ilustraciones 84, 85 y 86.



*Ilustración 85. Arreglo antenas localizador ILS Palonegro <sup>85</sup>*





*Ilustración 86. Puesto de control antena localizador ILS del aeropuerto Palonegro <sup>86</sup>*

Para la vigilancia de las aeronaves que vuelan el espacio aéreo colombiano el aeropuerto de Palonegro cuenta con el sistema ADS-B como se expuso en el apartado 4.6, su equipo en tierra, sistema de control y panel de visualización se ilustran a continuación:



*Ilustración 87. Sistema ADS-B aeropuerto de Palonegro, Bucaramanga <sup>87</sup>*

## RECOMENDACIONES

En la actualidad la aeronáutica colombiana así como en gran parte de Latinoamérica operan con sistemas importados de seguridad y vigilancia de vuelo debido a las limitaciones de tecnologías domésticas, alrededor de esta temática se propone en consideración a trabajos futuros, la creación de un software que integre los sensores de vigilancia radar y ADS-B para la visualización del tráfico aéreo en tiempo real, con el desarrollo de este software el proveedor de servicios aéreos acezará a pronósticos, alertas de altitud o colisión, creando en conjunto un sistema de alarmas al controlador del tráfico aéreo en caso de anomalías o incidentes.

Por otro lado, la OACI le exige a la aeronáutica que debe comprobar todos sus sistemas de radioayudas (VOR-DME, sistemas de comunicaciones y vigilancia) con frecuencia, para esto, cuenta con un departamento llamado vuelo y comprobación en el que dispone de 2 aeronaves para realizar esta labor, sin embargo esta tarea demanda altos costos, por lo tanto se plantea comprobar el funcionamiento y supervisión de las radioayudas así como de los sistemas de vigilancia y comunicación por medio de drones, de esta manera se disminuirían notablemente los costos y aumentaría la frecuencia con la que se llevan a cabo las comprobaciones de los sistemas, impactando directamente en el aumento del rango de confiabilidad y seguridad de operación de los sistemas de navegación y comunicación instalados en el espacio aéreo colombiano.

Se extiende la invitación para que el personal académico (estudiantes y docentes) de la facultad de ingeniería electrónica en el área de los sistemas de comunicaciones y departamentos afines de la Universidad Pontificia Bolivariana adelanten las investigaciones, teniendo como fundamento el presente proyecto de grado, para desarrollar estas propuestas, las cuales aparte de ser viables, contribuyen al desarrollo tanto académico como científico en el área de los sistemas de comunicaciones.



## CONCLUSIONES

A lo largo de la historia hemos podido constatar el avance que han tenido los sistemas de comunicaciones aplicados en el aérea de la aeronáutica, imprescindibles para la seguridad y la operación de las aeronaves con fines civiles o militares, es de destacar la importancia y soporte que brindan las radioayudas, integrando la información recolectada con la colaboración de seres humanos y la tecnología durante los diferentes procesos ejecutados en pro de la seguridad aérea. En conjunto los sistemas de comunicación, navegación y vigilancia aérea han brindado apoyo al desarrollo de manera segura y ordenada de la aviación civil internacional.

Los sistemas de comunicaciones estudiados en este proyecto de grado definen el gran conjunto de la aeronáutica moderna, sintetizando su influencia en tres ámbitos: el ámbito técnico, el ámbito operacional y el ámbito de la comunidad.

Las instalaciones y servicios a la navegación comprenden las operaciones aeroportuarias, la gestión del tránsito aéreo, la información de vuelo, la búsqueda y salvamento soportados en los sistemas de comunicación, vigilancia, navegación y meteorología a bordo, en tierra y en el espacio. Apoyan las operaciones para la integración de la actividad aeroportuaria y los tiempos de escala, involucrando a toda la comunidad interesada en la prestación de las instalaciones de navegación aérea o quienes soliciten su uso.

En Colombia el mayor asentamiento de sistemas de comunicación y navegación como los equipos VOR/DME e ILS se encuentran instalados en las regiones caribe y andina del país debido a la alta densidad de vuelos en estas dos regiones como consecuencia de la ubicación del mayor desarrollo económico, industrial y demográfico.

En general los sistemas de comunicación, navegación, vigilancia y meteorológicos instalados en el territorio colombiano cuentan con una



antigüedad de menos de 10 años, siendo su vida útil de hasta más de 15, los sistemas pueden seguir en funcionamiento gracias al mantenimiento adecuado de los equipos y un plan de seguridad de las operaciones necesarias para identificar soluciones óptimas cada vez que se requiera; si por el contrario no pueden ser objeto de reparación debido por ejemplo a que los fabricantes no producen repuestos, son deshabilitados, como sucede con los VOR tradicionales y la mayoría de las balizas no direccionales NDB en todo el país, los cuales han sido reemplazados por nuevas tecnologías.

El aeropuerto de Palonegro de la ciudad de Bucaramanga destaca por su gran infraestructura para la seguridad aérea al contar con equipos como: un D-VOR/DME instalado recientemente en el municipio de Los Santos, el cual, empezó a operar como reemplazo de un VOR tradicional, un sistema de aterrizaje por instrumentos ILS que incluye equipo glideslope, localizador y balizas marcadoras, 3 estaciones meteorológicas a lo largo de la pista de aterrizaje y un sistema ADS-B como soporte a la vigilancia radar del espacio aéreo entre otros, todos completamente operacionales y en constante mantenimiento. Estos sistemas involucran diversas áreas de la electrónica que, desde el tratamiento de imágenes y el procesamiento de señales hasta las telecomunicaciones, los sistemas de control y la instrumentación entre otras disciplinas actúan en conjunto para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos, dotando al aeropuerto de Palonegro de la más alta tecnología e influyendo positivamente en la prestación de los servicios aeronáuticos.

## LISTA DE REFERENCIAS

- [1] C. F. Gray, "The five first flights, The slope and winds of big kill devil hill: the first flight reconsidered," *WWI AERO J. Early Aeropl.*, pp. 26–39, 2002.
- [2] G. Alan, "Aviation at the Start of the First World War," *Hampt. Roads Mil.Hist.*, vol. 6, pp. 4–6, 2007.
- [3] R. Johnson, "Blind flying on the beam: aeronautical communication, navigation and surveillance: its origins and the politics of technology," *J. AirTransp.*, vol. 8, pp. 57–78, 2003.
- [4] The New York Times, "Blind plane flies 15 miles and lands; fog peril overcome," p. 1, Sep. 25, 1929.
- [5] Department of the Air Force, "The Radio Range," in *Instrument Flying - AFManual 51-37*, 1966, pp. 14–17.
- [6] Federal Aviation Administration, "FAA Historical Chronology, 1926-1996," *Faa Hist. Chronol.*, p. 303, 1996.
- [7] N. Nagaraja, *Elements of electronic navigation*, Print book. New Delhi: McGraw-Hill, Tata, 1996.
- [8] B. Leonard, *Airport and Air Traffic Control System*. DIANE Publishing, 1982.
- [9] M. Kayton and W. R. Fried, *Avionics Navigation Systems*. John Wiley & Sons, 1997.
- [10] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), "Telecomunicaciones aeronáuticas, Radioayudas para la navegación" vol. I. 2006.

- [11] T. Thom, *Radio Navigation and Instrument Flying (The Air Pilot's Manual)*. Airlife Publishing, 2002.
- [12] Department of Transportation and Department of Defense, "2001 Federal Radionavigation Systems," 2002.
- [13] FAA, "Instrument Flying Handbook," pp. 5–23, 2008.
- [14] Federal Aviation Administration, "Localizer Performance Approaches Introduced," vol. 39, pp. 1–9, 2011.
- [15] W. Blanchard, "Air Navigation Systems Chapter 4. Hyperbolic Airborne Radio Navigation Aids – A Navigator's View of their History and Development," in *The Journal of Navigation*, vol. 44, no. 3, 1991, pp. 285–315.
- [16] J. D. Haigh, "The Services Textbook of Radio, Volume 7, Radiolocation Techniques," 1960, pp. 254–256.
- [17] AIRBUS, "Getting To Grips With Category II and III Operations," no. 3, 2001, p. 46.
- [18] European Space Agency, "EGNOS navigation system begins serving Europe's aircraft," ESA, p. 1, 2011.
- [19] L. Gómez, "Vigilancia Dependiente Automática (ADS-b) en Colombia," *Cienc. y Pod. aéreo, Rev. científica la Esc. postgrados la fuerza aérea Colombiana*, pp. 21–32, 2015.
- [20] E. Gómez and J. Ortiz, "Enlaces de datos En VHF (VDL) dentro del contexto CNSATM para la prestación de los servicios de tránsito aéreo en Colombia," vol. 7, pp. 57–67, 2012.
- [21] F. Jimenez, "Estudio sobre los sistemas de Comunicaciones, navegación, vigilancia, y gestión del tráfico aéreo (CNS-ATM): situación

actual y evolución futura,” 2015.

[22] B. A. Sharpe, “Aircraft Radio Altimeters”, in *The Journal of Navigation*, 1950.

[23] P. G. Capelli, A. E. Outten, & K. E. Bucks, “the application of radio altimeters to aircraft approach and landing”, *The Institution of Electrical Engineers*, 1958.

[24] E. Szpakowska-Peas, “CRW 13 – the new generation radio altimeter: the concept, design, and tests”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 92 (9), 1413–1419. 2020.

[25] J. Labun, P. Kurdel, M. Češkovič, A. Nekrasov, & J. Gamec, “Low altitude measurement accuracy improvement of the airborne FMCW radio altimeters”, *Electronics (Switzerland)*, 2019.

[26] W. F. Hirschfeld, “The Invention of Radar Meteorology”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 67, No. 1, pp. 33-37, 1986.

[27] F. Frédéric, “Radar meteorology: principles and practice”, *Cambridge University Press*, 2018.

[28] T. Fujita and J. McCarthy, “The Application of Weather Radar to Aviation Meteorology”, Chapter 31a, 1990.

[29] T. J. Seymour, and R. K. Baum, “Evaluation of the Ryan Stormscope as a severe weather avoidance system for aircraft”, *Workshop on Grounding and Lightning Technol.* p 29-35, 1978.

[30] J. G. Schneider and V. L. Mangold, “Ground evaluation of lightning monitoring system (Stormscope)”, *Workshop on Grounding and Lightning Technol.* p 37-47 1979.

[31] R.K. Baum, T. J Seymour., “In-Flight Evaluation of a Severe Weather Avoidance System for Aircraft”, *Air Force Wright Aeronautical Labs Wright-Patterson AFB Oh*, 1980.

[32] J. Tang, “Review: Analysis and Improvement of Traffic Alert and

Collision Avoidance System” In IEEE Access (Vol. 5, pp. 21419–21429). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2017.

[33] F. I Romli, J. D King., L. Li., & J. P. Clarke. “Impact of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) on Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) Performance”, 2008.

[34] J.A. Sorensen, W. Hollister, M. Burgess, D. Davis, “Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) - Cockpit Display of Traffic Information (CDTI) Investigation. Phase 1. Feasibility Study”, Massachusetts Inst Of Tech Lexington Lincoln Lab, 1991.

[35] J. D. Welch, V. A. Orlando, “Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS): A Functional Overview of Minimum TCAS II”, Massachusetts Inst Of Tech Lexington Lincoln Lab, 1983.

[36] J. E Holland, M. J. Kochenderfer, & W. A. Olson, “Optimizing the next generation collision avoidance system for safe, suitable, and acceptable operational performance” Proceedings of the 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, ATM 2013, 2013.

[37] G. A. Gilbert. “Historical Development of the Air Traffic Control System”. In IEEE Transactions On Communications (Issue 5). 1973.

[38] W. Xuegang. “Mode S for Secondary Surveillance Radar(SSR): an Introduction and Overview”, Telecommunication Engineering, 2008.

[39] E. Kim, & K. Sivits. “Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance”. Aerospace Science and Technology, 45, 203–208, 2015.

[40] Department of Defense, United State of America, “Global Positioning System, Standard Positioning Service, Performance Standard”, 4th edition, 2008.

[41] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea, F. Sandoval, “Sistema De Posicionamiento Global (GPS): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro”, Instituto de Automática Industrial Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 2015.

- [42] J.M. Dow, R.E. Neilan, & C. Rizos. "The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems". *J Geod* 83, 191–198, 2009.
- [43] P. Enge, T. Walter, S. Pullen, Kee Changdon, Chao Yi-Chung, Tsai Yeou-Jyh, "Wide Area Augmentation of the Global Positioning System", *Proceedings of the IEEE*, Vol 84, Issue 8, 1996.
- [44] Aeronáutica Civil Unidad Administrativa Especial, "Plan de navegación aérea para Colombia Volumen II. Nivel Nacional Técnico Operacional Parte A", 2021.
- [45] Aeronáutica Civil Unidad Administrativa Especial, "Plan de navegación aérea para Colombia Volumen II. Nivel Nacional Técnico Operacional Parte A", Anexo C: Reporte de Mantenimiento, 2021.
- [46] F. L. Moseley, "The Automatic Radio Direction Finder," in *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics*, vol. ANE-2, no. 4, pp. 4-11, Dec. 1955.
- [47] N. B. Sarter, D. D. Woods, "Pilot Interaction With Cockpit Automation: Operational Experiences With the Flight Management System", *The International Journal of Aviation Psychology*, 2:4, 303-321, 1992.
- [48] R. S. F. Patrón, A. Kessaci, and R. M. Botez, "Horizontal flight trajectories optimisation for commercial aircraft through a flight management system," *The Aeronautical Journal* (1968), vol. 118, no. 1210, pp. 1499–1518, 2014.

## Referencias de ilustraciones

1. Imagen tomada de: <http://savannahstreetman.weebly.com/the-wright-brothers.html>
2. Imagen tomada de: <https://altimagem.blogspot.com/2012/03/primeira-travessia-aerea-nocturna-do.html>
3. Imagen tomada de: <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/01/breve-historia-de-las-radioayudas-la.html>
4. Imagen tomada de: <https://www.thisdayinaviation.com/tag/curtiss-aeroplane-and-motor-co/>
5. Imagen tomada de: [http://www.pa3clq.nl/index\\_bestanden/Page557.htm](http://www.pa3clq.nl/index_bestanden/Page557.htm)
6. Imagen tomada de: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:A-N-signals.png>
7. Imagen tomada de: <https://www.flickr.com/photos/psychop/154938081>
8. Imagen tomada de: <https://www.rfcafe.com/references/radio-craft/short-wave-radio-lands-army-plane-december-1937-radio-craft.htm>
9. Imagen tomada de: <http://server.idemdito.org/pics/mil/electro/ondes.htm>
10. Imagen tomada de: <https://www.asociacionbuxa.com/2009/04/torres-de-arneiro/>
11. Imagen tomada de: <https://eclecticomania.net/2019/02/04/los-radiofaros-consol-elektra-sonne-13-la-ampliacion-del-sistema-consol-con-el-paso-del-tiempo/>
12. Imagen tomada de: <http://www.conatel.gob.ve/espectro-radioelectrico/>
13. Imagen tomada de: <https://www.flight-mechanic.com/radio-communication-radio-waves/>
- 14-23. Imagenes tomadas de: [http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo\\_table=sub8\\_6&wr\\_id=513&page=2](http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub8_6&wr_id=513&page=2)
24. Imagen tomada de: <https://www.radioenthusiast.co.uk/news/flight-progress-strips-and-antenna-arrays/>

25. Imagen tomada de:  
<https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/automatic-direction-finder-adf.html>
26. Imagen tomada de: <https://aerocorner.com/blog/how-airplanes-know-where-to-go/>
27. Imagen tomada de: <https://www.flight-mechanic.com/radio-navigation-automatic-direction-finder-adf-and-radio-magnetic-indicator-rmi/>
28. Imagen tomada de:  
<https://www.aeroexpo.online/fr/prod/thales/product-170727-7261.html>
29. Imagen tomada de: <https://aviatorbluewings.com/navegacion-vor/>
30. Imagen tomada de: <https://aviatorbluewings.com/navegacion-vor/>
31. Imagen tomada de:  
[http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo\\_table=sub8\\_6&wr\\_id=514](http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub8_6&wr_id=514)
32. Imagen tomada de: <https://www.aeroexpo.online/es/prod/century-flight-systems-lnc/product-173274-11470.html>
33. Imagen tomada de:  
[http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo\\_table=sub8\\_6&wr\\_id=515](http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub8_6&wr_id=515)
34. Imagen tomada de:  
[http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo\\_table=sub8\\_6&wr\\_id=515](http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub8_6&wr_id=515)
35. Imagen tomada de: <https://www.avionicslist.com/articles/ILS-glideslope.php>
36. Imagen tomada de: <https://www.transponder1200.com/que-son-y-como-funcionan-las-radiobalizas/>
37. Imagen tomada de: <https://www.aviacioncivil.com.ve/los-radares-en-los-aviones-civiles/>
38. Imagen tomada de:  
<http://sgcg.es/articulos/2010/05/11/radioaltimetro/>
39. Imagen tomada de: <https://www.ais-inst.com/instrument-and-radio-repair>
40. Imagen tomada de:  
[http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo\\_table=sub8\\_6&wr\\_id=523&page=2](http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub8_6&wr_id=523&page=2)
41. Imagen tomada de:  
[https://aerodynamix.com/portfolio\\_category/garmin-avionics/](https://aerodynamix.com/portfolio_category/garmin-avionics/)
42. Imagen tomada de: [http://www.seam-avionic.com/index.php?cPath=14\\_142](http://www.seam-avionic.com/index.php?cPath=14_142)
43. Imagen tomada de:  
<http://velocityavionics.com/store/c6/Indicators.html>



44. Imagen tomada de:  
[https://www.ivao.at/wiki/Meteorological\\_Aerodrome\\_Report\\_-\\_METAR](https://www.ivao.at/wiki/Meteorological_Aerodrome_Report_-_METAR)
45. Imagen tomada de: <https://www.aviacioncivil.com.ve/los-radares-en-los-aviones-civiles/>
46. Imagen tomada de:  
<https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/collision-avoidance-systems.html>
47. Imagen tomada de: <https://ops.group/blog/tcas-trouble-why-were-getting-it-wrong/>
48. Imagen tomada de: <https://ops.group/blog/tcas-trouble-why-were-getting-it-wrong/>
49. Imagen tomada de:  
<https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/radar-beacon-transponder.html>
50. Imagen tomada de:  
[http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo\\_table=sub8\\_6&wr\\_id=521&page=2](http://www.ace.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub8_6&wr_id=521&page=2)
51. Imagen tomada de: <http://www.parmavia.ru/postavka-avioniki/antenny.html>
52. Imagen tomada de:  
<https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/radar-beacon-transponder.html>
53. Imagen tomada de:  
<https://www.sciencephoto.com/media/1021591/view/gps-navigation-satellite-network>
54. Imagen tomada de:  
<https://nap.nationalacademies.org/read/4920/chapter/9>
55. Imagen tomada de: <https://topografia2.com/como-funciona-gps/>
56. Imagen tomad de:  
<https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/01/el-sistema-de-posicionamiento-gps.html>
57. Imagen tomada de:  
<https://www.kickstarter.com/projects/davidfg/you-have-to-see-this-place>
58. Imagen tomada de: <https://www.nstb.tc.faa.gov/24hour-plots.html>
59. Imagen tomada de: <https://pilotstories.net/flight-management-system-fms-aircrafts-brain/>
60. Imagen tomada de:  
<https://greatbustardsflight.blogspot.com/2016/06/teoria-del-fms-flight-management-system.html>

61-67. Imágenes tomadas de: Aeronáutica Civil Unidad Administrativa Especial, “Plan de navegación aérea para Colombia Volumen II. Nivel Nacional Técnico Operacional Parte A”, Anexo C: Reporte de Mantenimiento, 2021.

68-87. Imágenes de autor.