



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA**

FAC SISTEL

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**Análisis de la interferencia electromagnética inducida por
jammers en sistemas de comunicación de un dron virtualizado
mediante Simulink**

González Alejandro Jonathan Stalyn

Ricardo De La A Xiomara Cristina

Dirigido por:

Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.

LA LIBERTAD – 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA**

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph. D.
DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE GUÍA / TUTOR

Ing. Mario Alomoto Tomalá, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Corina Gonzabay De La A, Mgtr.
SECRETARIA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **GONZÁLEZ ALEJANDRO JONATHAN** y **RICARDO DE LA A
XIOMARA**

DECLARAMOS QUE:

El trabajo de titulación, “**Análisis de la interferencia electromagnética inducida por jammers en sistemas de comunicación de un dron virtualizado mediante Simulink**” previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando los derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente, nuestro trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del trabajo de titulación referido.

La Libertad, a los 18 días del mes de agosto del año 2026

AUTORES

González Alejandro Jonathan

Ricardo De La A Xiomara



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA**

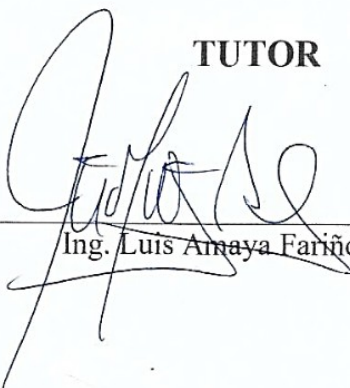
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **González Alejandro Jonathan Stalyn y Ricardo de la a Xiomara Cristina**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**.

La Libertad, a los 18 días del mes de agosto del año 2026

TUTOR



Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE
SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **González Alejandro Jonathan y Ricardo De La A Xiomara**

Autorizamos a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de nuestro trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los derechos en línea patrimoniales del trabajo de integración curricular de alto nivel con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de nuestro trabajo académico dentro de las regulaciones de la universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.

Santa Elena, a los 18 días del mes de agosto del año 2026

AUTOR

González Alejandro Jonathan

Ricardo De La A Xiomara



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **“Análisis de la interferencia electromagnética inducida por jammers en sistemas de comunicación de un dron virtualizado mediante Simulink”**, presentado por los estudiantes, **González Alejandro Jonathan Stalyn y Ricardo De La A Xiomara Cristina** fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 9% , por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.

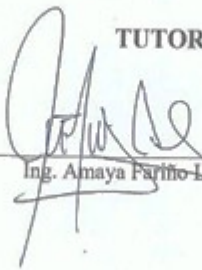


Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | UPSE-ECU

Trabajo de Integración Curricular-23-152
ID : 3f55bb86e3cc0bcad0603c6eae42a33ef9ab3038



9%
Textos sospechosos


TUTOR
Ing. Amaya Farfán Luis, Mgtr.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero que nada a mi Dios, quien me ha permitido salud y vida para llegar hasta mi último proceso de la vida universitaria.

Agradecer a mi madre Antonia Alejandro quien ya no está en esta vida, pero fue de influencia para que nunca me rindiera y siguiera adelante mi carrera universitaria hasta el final.

Agradezco también con un cariño bien bonito a mis madrinas Janeth Arroba y Concepción Arroba por ser también parte de mi proceso estudiantil, por brindarme su apoyo incondicional incluso de la lejanía y siempre darme sus consejos positivos para terminar mis estudios.

Agradezco también a mi compañera Xiomara Ricardo, quien con su amistad sincera dentro de todo el período universitario también me brindó su apoyo.

Quiero expresar también un agradecimiento muy bonito a una persona súper especial, Adriana Vera Bailón, quien en tan poco tiempo de conocerla, llegó una mujer súper importante en mi vida, brindándome su apoyo incondicional, sus consejos, y mucho más.

Y por último, agradecer a todas esas personas externas que me acompañaron también en todo mi proceso académico.

Jonathan Stalyn González Alejandro

A Dios, por darme vida, salud, sabiduría y la fuerza para superar cada obstáculo y alcanzar un importante hito en la vida.

A mi padre, Geovanny Alejandro, por ser el pilar de nuestra familia y por esforzarse cada día para ayudarnos a alcanzar nuestras metas. Gracias por tu apoyo incondicional.

A mi madre, Cecilia Cristina, por sus consejos, su educación y por ayudarme a criar a mi pequeña con tanto amor. Hoy comprendo el valor de tus sacrificios.

A mis hermanos: Joel, por ser mi modelo para seguir; Julexy por enseñarme con su lucha y perseverancia; y especialmente Carmen, por cuidar de mi hija siempre que la necesité. No lo habría logrado sin su ayuda.

A mi esposo, David, por creer en mí, inspirarme y nunca dejarme rendir.

A mi asesor, el ingeniero Luis Amaya, y al experto, el ingeniero Mario Alomoto, por su paciencia, orientación y valiosa contribución al desarrollo de nuestro trabajo. A mi colega y amigo Jonathan González, por su apoyo y por hacer un proceso más llevadero.

Y a mi canina Chiripa, que fue una fiel compañera en mis estudios matutinos y cuya presencia me reconfortaba en los momentos de cansancio.

Xiomara Cristina Ricardo De la A

DEDICATORIA

Con una inmensa felicidad le dedico ante todo a Dios por permitirme llegar hasta el final de mi carrera universitaria con bienestar y un mañana lleno de alegría y felicidad.

Dedico también mi esfuerzo y logro a mis padres, en especial a mi madre quien con tanto sacrificio luchó para mí en mis primeros pasos universitarios y lograr mi objetivo

A mis docentes y tutor especialista quienes, con su conocimiento y sabiduría, me supieron formar como estudiante, hasta lo que soy hoy en día.

Y por último dedico todo mi esfuerzo, a mi familia, amigos, y demás personas que estuvieron para brindarme su apoyo y su manera positiva de siempre decirte que nunca me rindiera

Jonathan Stalyn González Alejandro

Mi amada hija, Gloria Georgina, tiene apenas 6 meses, a pesar de todos los riesgos, hoy estás conmigo, sana y llena de luz.

Tu llegada marcó un antes y un después. Cuando pensé que no podía más, tu sonrisa y tu mirada inocente me devolvieron la fuerza. Fuiste mi mayor inspiración, mi razón de vivir y la luz que me guió en cada noche de insomnio y ante cada obstáculo.

Eras muy pequeña cuando tuve que dejarte con mi madre para ir a clase. Ambas hicimos muchos sacrificios para llegar hasta aquí, lo logramos, mi querida: muy pronto tendremos nuestros títulos en nuestras manos. Llegar a concluir un logro es el ejemplo que quiero dejarte: que, con esfuerzo y perseverancia, las metas se pueden alcanzar. Nunca pierdas la fe en ti misma.

A mi querido abuelo, Papi Pachila Santos Isidro de la A Yagual. Aunque ya no estás físicamente conmigo, te llevo en lo más profundo de mi alma y en cada latido de mi corazón. Te extraño, te recuerdo con gratitud y amor. Sé que desde el cielo te alegras conmigo por esta victoria, tal como siempre quisiste verme crecer. Tu ejemplo de trabajo duro y honestidad me ha dado el valor para nunca rendirme.

Con infinito amor y gratitud, Tu madre

Xiomara Cristina Ricardo De la A

ÍNDICE

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO.....	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
DEDICATORIA.....	IX
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	23
CAPÍTULO I.....	24
1. MARCO REFERENCIAL.....	24
1.1. Planteamiento del tema.....	24
1.2. Contexto y relevancia.....	25
1.3. Problema de investigación.....	25
1.4. Objetivos del proyecto.....	27
1.4.1. Objetivo general.....	27
1.4.2. Objetivos específicos:.....	27
1.5. Justificación.....	28
1.6. Alcance y delimitaciones.....	29
1.7. Delimitación de la investigación.....	29
1.8. Hipótesis.....	30
1.9. Metodología general.....	31
1.10. Estructura del documento.....	31
CAPÍTULO II.....	32

2.1. Marco teórico y plataforma de simulación.....	32
2.2. Fundamentos de UAV.....	33
2.2.1. Arquitectura UAV.....	33
2.2.2. Tipos de UAV.....	34
2.3. Sistema de control de vuelo.....	35
2.4. Relación con la interferencia electromagnética.....	36
2.5. Relación con los objetivos de la investigación.....	36
2.6. El controlador de vuelo.....	37
2.7. Sistema de comunicación en UAV.....	37
2.7.1. Comunicación inalámbrica.....	38
2.7.2. Principios de funcionamiento.....	39
2.7.3. Característica de la comunicación inalámbrica.....	39
2.7.4. Comunicación inalámbrica en UAV.....	40
2.7.4.1. Banda ISM de 2.4 GHz.....	40
2.8. Tecnologías inalámbricas utilizadas.....	41
2.8.1. Wi-Fi.....	42
2.8.2. Bluetooth.....	42
2.8.3. GPS	43
2.8.4. LoRa.....	44
2.9. Interferencia electromagnética.....	44
2.9.1. Compatibilidad electromagnética (EMC).....	46
2.9.2. Ruido electromagnético.....	50
2.9.3. Interferencia electromagnética en sistemas de comunicación.....	53
2.9.4. Efectos de la interferencia electromagnética sobre el UAV.....	59
2.10. Fundamentos matemáticos del sistema.....	60
2.10.1. Modelo general de comunicación.....	60

2.10.2. Relación señal a interferencia más ruido (SINR).....	61
2.10.3. Tasa de error de bit (BER).....	62
2.10.4. Magnitud del error vectorial (EVM).....	63
2.10.5. Teorema de Nyquist.....	64
2.10.6. Degradación de la señal.....	65
2.11. Instrumentación virtual y métricas de desempeño.....	66
2.12. Validación conceptual del modelo.....	66
CAPÍTULO III.....	68
3.1. Metodología.....	68
3.1.1. Tipo de investigación.....	68
3.1.2. Investigación aplicada.....	68
3.1.3. Investigación cuantitativa.....	68
3.1.4. Investigación experimental.....	69
3.2. Descripción del diseño de la investigación general del sistema propuesto.....	69
3.3. Herramientas y recursos utilizados por capas del sistema propuesto.....	70
3.4. Software utilizado.....	70
3.5. Hardware utilizado.....	71
3.6. Hardware necesario para una simulación fluida.....	71
3.7. Desarrollo e implementación del sistema de simulación.....	73
3.8. Arquitectura general del sistema.....	73
3.9. Desglose de la arquitectura general.....	75
3.9.1. Diseño e integración del dron.....	75
3.9.2. Configuración de bloques del diseño del área RPM.....	76
3.9.3. Propeller Initial Rotation y PID Controller3.....	76
3.9.4. Simulation 3D Scene Configuration.....	77
3.9.5. Quadcopter.....	78

3.10. Integración de las tecnologías inalámbricas al dron.....	80
3.10.1. GPS.....	80
3.10.2. GPS Signal y GPS Enable.....	80
3.10.3. GPS Product.....	81
3.10.4. Interferencia GPS.....	82
3.10.5. Filtro Salida GPS.....	83
3.10.6. Wi-Fi.....	85
3.10.7. Wi-Fi Signal y Wi-Fi Enable.....	85
3.10.8. Wi-Fi Product.....	86
3.10.9. Interferencia Wi-Fi.....	87
3.10.10. Filtro Salida Wi-Fi.....	89
3.10.11. Bluetooth.....	90
3.10.12. Bluetooth Enable y Bluetooth Signal.....	90
3.10.13. Bluetooth Product.....	92
3.10.14. Interferencia Bluetooth.....	93
3.10.15. Filtro Salida Bluetooth.....	94
3.10.16. LoRa.....	96
3.10.17. LoRa Enable y LoRa Signal.....	96
3.10.18. LoRa Product.....	97
3.10.19. Interferencia LoRa.....	98
3.10.20. Filtro Salida LoRa.....	99
3.10.21. Código general de la integración de bloques.....	101
3.10.22. Integración del panel de visualización de las tecnologías integradas.....	102
3.10.23. Monitor de tecnologías.....	102
3.11. Integración de inhibidores de señales (jammers) en el diseño.....	104
3.11.1. Jammer de ruido blanco.....	104

3.11.2 Jammer Blanco Enable y Jammer Blanco Signal.....	105
3.11.3. Jammer Blanco Product y ZOH Blanco.....	106
3.11.4. Jammer de banda limitada.....	107
3.11.5. Jammer Banda Enable y Jammer Banda Signal.....	108
3.11.6. Jammer Banda Product y ZOH Banda.....	109
3.11.7. Jammer de radio gaussiano.....	110
3.11.8. Jammer Gauss Enable y Jammer Gauss Signal.....	110
3.11.9. Jammer Gauss Product y ZOH Gaus.....	112
3.11.10. Jammer de ruido impulsivo.....	113
3.11.11. Jammer Imp Enable y Jammer Imp Signal.....	114
3.11.12. Jammer Imp Product y ZOH Imp.....	115
3.11.13. Integración del panel de visualización de los inhibidores de señales.....	116
3.11.14. Monitor jammers.....	116
3.12. Diseño del control de funciones.....	118
3.12.1. Código y diseño.....	118
3.12.2. Lógica de interacción entre jammers y tecnologías inalámbricas.....	122
3.12.3. Aplicación de la interferencia a cada tecnología.....	123
3.12.4. Bloque de procesamiento de señales.....	124
3.12.5. Procesamiento de datos de los jammers y señales integradas.....	126
3.12.6. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas.....	128
3.13. Pruebas y simulación.....	131
3.13.1. Prueba 1: Simulación del dron volando.....	131
3.13.2. Prueba 2: Tecnologías inalámbricas integradas en el dron.....	132
3.13.3. Prueba 3: Inhibidores de señales (jammers).....	134
3.13.4. Jammer de ruido blanco frente a tecnologías integradas.....	136
3.13.5. Jammer de banda limitada frente a tecnologías integradas.....	137

3.13.6. Jammer de ruido gaussiano frente a tecnologías integradas.....	138
3.13.7. Jammer de ruido impulsivo frente a tecnologías integradas.....	139
3.13.8. Todos los jammers activos frente a tecnologías integradas.....	141
3.13.9. Parámetros de simulación.....	142
CAPÍTULO IV.....	145
4.1. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	145
4.1.1. Resultados de interacción entre jammer de ruido y tecnologías del dron...145	
4.1.2. Resultados estadísticos presentados en el software.....	146
4.1.3. Jammer de banda limitada y tecnologías del dron.....	148
4.1.4. Resultados estadísticos presentados en el software.....	149
4.1.5. Jammer de ruido gaussiano y tecnologías del dron.....	150
4.1.6. Resultados estadísticos presentados en el software.....	152
4.1.7. Jammer de ruido impulsivo y tecnologías del dron.....	153
4.1.8. Resultados estadísticos presentados en el software.....	154
4.1.9. Jammers y tecnologías del dron.....	156
4.1.10. Resultados estadísticos presentados en el software.....	157
4.1.11. Comparación de los cuatro jammers.....	158
CONCLUSIONES.....	160
RECOMENDACIONES.....	161
REFERENCIAS.....	162

Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1. Señal recibida producida por el jammer.....</i>	<i>52</i>
<i>Ecuación 2. Señal recibida.....</i>	<i>54</i>
<i>Ecuación 3. Señal recibida.....</i>	<i>60</i>
<i>Ecuación 4. Fórmula general de SINR.....</i>	<i>61</i>
<i>Ecuación 5. SINR expresada en dB.....</i>	<i>62</i>
<i>Ecuación 6. Fórmula de BER.....</i>	<i>62</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Principios de funcionamiento.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 2. Elementos de la I.E.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3. Principales características de la interferencia electromagnética (EMI).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 4. Hardware utilizado componentes.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 5. Recomendaciones de hardware.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 6. Parámetros de simulación.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 7. Comparativa de degradación por tecnología.....</i>	<i>158</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1: Referencial cuadricóptero [16].....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2: Esquema general de la I.E [32].....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3: Jammer de ruido [40].....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4: “Sweep jammer” [42].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5: Jammer de tono único [43].....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6: Jammer de banda ancha [44].....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 7: Diagrama general de Simulink.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 8. Código y diagrama Simulink.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 9. RPM Rev/Min.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 10. Propeller Initial Rotation y PID Controller3.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 11. Simulation 3D Scene Configuration.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 12. Quadcopter.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 13. GPS Signal y GPS Enable.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 14: GPS Product.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 15. Interferencia GPS.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 16. Filtro Salida GPS.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 17. Wi-Fi Signal y Wi-Fi Enable.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 18. Wi-Fi Product.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 19. Interferencia Wi-Fi.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 20. Filtro Salida Wi-Fi.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 21. Bluetooth Enable y Bluetooth Signal.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 22. Bluetooth Product.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 23. Interferencia Bluetooth.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 24. Filtro Salida Bluetooth.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 25. LoRa Enable y LoRa Signal.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 26. LoRa Product.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 27. Interferencia LoRa.....</i>	<i>99</i>

<i>Figura 28. Filtro Salida LoRa.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 29. Código integración de tecnologías.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 30. Monitor de tecnologías.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 31. Código integración de monitor de visualización.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 32. Jammer Blanco Enable y Jammer Blanco Signal.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 33. Jammer Blanco Product y ZOH Blanco.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 34. Jammer Banda Enable y Jammer Banda Signal.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 35. Jammer Banda Product y ZOH Banda.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 36. Jammer Gauss Enable y Jammer Gauss Signal.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 37. Jammer Gauss Product y ZOH Gaus.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 38. Jammer Imp Enable y Jammer Imp Signal.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 39. Jammer Imp Product y ZOH Imp.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 40. Monitor jammers.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 41. Diseño del control de funciones.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 42. Interfaz principal.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 43. Título control.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 44. Columna izquierda diseño.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 45. Columna derecha diseño.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 46. Botones de acción.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 47. Código de aplicación de la interferencia a cada tecnología.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 48. Bloque de procesamiento de señales.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 49. Procesamiento de datos del control hacia los jammers y señales integradas.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 50. Control genérico de estados.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 51. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas N°1.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 52. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas N°2.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 53. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas N°3.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 54. Botones de inicio y estadísticas.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 55. Simulación del dron volando.....</i>	<i>132</i>

<i>Figura 56. Tecnologías inalámbricas integradas en el dron.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 57. Inhibidores de señales (jammers).....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 58. Jammer de ruido blanco frente a tecnologías integradas.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 59. Jammer de banda limitada frente a tecnologías integradas.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 60. Jammer de ruido gaussiano frente a tecnologías integradas.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 61. Jammer de ruido impulsivo frente a tecnologías integradas.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 62. Todos los jammers activos frente a tecnologías integradas.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 63. Jammer de ruido blanco y tecnologías del dron.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 64. Resultados estadísticos presentados en el software.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 65. Jammer de banda limitada y tecnologías del dron.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 66. Resultados estadísticos presentados en el software.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 67. Jammer de ruido gaussiano y tecnologías del dron.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 68. Resultados estadísticos presentados en el software.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 69. Resultados de interacción entre jammer y tecnologías del dron.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 70. Resultados estadísticos presentados en el software.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 71. Resultados de interacción entre todos los jammers y tecnologías del dron.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 72. Resultados estadísticos presentados en el software.....</i>	<i>157</i>

RESUMEN

La investigación se desarrolla íntegramente en un entorno virtual mediante MATLAB/Simulink, lo que permite examinar la respuesta dinámica del sistema frente a diversos escenarios de ruido. La secuencia metodológica contempla, en primer lugar, una revisión de los fundamentos teóricos de propagación y modelado inalámbrico; en segundo lugar, la caracterización técnica del dron; y finalmente, la integración de los jammers dentro del modelo de simulación. Mediante un proceso en el que se incrementa progresivamente la potencia interferente, se miden parámetros como la relación señal a ruido (SNR) y la potencia de la señal recibida, a partir de los cuales se calcula el porcentaje de degradación de la comunicación. El enfoque basado en simulación resulta metodológicamente relevante, pues permite evitar los costos asociados a la implementación en hardware físico durante las fases preliminares de investigación, además de ofrecer una interpretación matemática rigurosa de los fenómenos que ocurren durante la comunicación entre el UAV y su estación de control.

Palabras Claves: UAVs, Interferencia electromagnética, Simulación, Simulink, MATLAB, Señal, Relación Señal-Ruido (SNR)

ABSTRACT

The research is conducted entirely in a virtual environment using MATLAB/Simulink, enabling an examination of the system's dynamic response to various noise scenarios. The methodological approach involves, first, a review of the theoretical fundamentals of wireless propagation and modeling; second, the technical characterization of the drone; and finally, the integration of jammers into the simulation model. Through a process of progressively increasing interference power, parameters such as the signal-to-noise ratio (SNR) and received signal power are measured to calculate the percentage of communication degradation. This simulation-based approach is methodologically significant, as it avoids the costs associated with physical hardware implementation during the preliminary research phases while offering a rigorous mathematical interpretation of the phenomena occurring during communication between the UAV and its control station.

Keywords: UAVs, Electromagnetic interference, Simulation, Simulink, MATLAB, Signal, Signal-to-Noise Ratio (SNR).

INTRODUCCIÓN

El avance de las tecnologías inalámbricas y el creciente uso de UAV han posicionado a los drones como herramientas fundamentales en diversos sectores, gracias a su versatilidad, facilidad de despliegue y gran capacidad de transmisión de datos. Los sistemas de comunicación inalámbrica dependen de enlaces de comunicación estables, principalmente en la banda de 2.4 GHz, a través de ella reciben los comandos de control y envían información. Sin embargo, su funcionamiento se ve afectado por diversas perturbaciones externas que degradan, alteran o incluso interrumpen la conexión [1].

Entre las amenazas más comunes se encuentran las interferencias electromagnéticas, ya sean intencionales o generadas por dispositivos jammers. Estos últimos actúan de distintas formas: algunos generan poca interferencia y otros bastante, pero en ambos casos reducen la relación señal-ruido y comprometen la disponibilidad del sistema de comunicación inalámbrica [2].

En el ámbito estudiantil, el estudio de estos fenómenos al no ser visibles a simple vista, presentan limitaciones tanto a nivel práctico como legal. Generar interferencias electromagnéticas reales requeriría contar con entornos controlados y autorizados para ello. Frente a estas limitaciones se ha realizado el estudio pertinente para analizar y comprender cómo se comportarían en un entorno real los efectos de la interacción entre jammers y las señales inalámbricas de un dron. De esta manera, se busca obtener resultados que permitan entender el comportamiento de estos aspectos de la comunicación inalámbrica dentro de un entorno completamente controlado [3].

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Planteamiento del tema

El trabajo se enmarca en el campo de las comunicaciones inalámbricas aplicadas a vehículos aéreos no tripulados, con énfasis en la degradación del enlace causada por interferencias intencionales y en la evaluación de su impacto sobre métricas técnicas de calidad de comunicación. La investigación prioriza el análisis del fenómeno físico y de su modelo matemático, más que la descripción extensa de la plataforma de simulación [4].

Entre las amenazas más relevantes para la seguridad en telecomunicaciones se encuentra la interferencia electromagnética intencional, denominada jamming. Esta técnica consiste en la emisión de señales de ruido de alta potencia diseñadas para ocupar el mismo rango de frecuencia que el sistema objetivo. Como consecuencia, esta acción reduce drásticamente la relación señal a ruido (SNR), impidiendo que el receptor distinga la información útil del ruido ambiental. Por lo tanto, se compromete de manera directa la disponibilidad, la integridad y la seguridad del sistema de comunicaciones afectado [5].

El estudio se centra específicamente en la banda de frecuencia de 2.4 GHz e implementa tres tipos de perturbaciones espectrales: ruido de banda estrecha, ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) y ruido por pulsos [6].

1.2. Contexto y relevancia

Los UAV han llegado a adquirir una gran importancia en muchos aspectos, como aplicaciones industriales, civiles e incluso de temáticas de seguridad, debido a que estos tienen una gran capacidad para realizar misiones de monitorización, transporte y visualización remota. Aunque el funcionamiento de todas estas plataformas depende de enlaces de comunicación que realizan comunicación de control, telemetría e incluso hasta de visualización de videos en tiempo real a través de cámaras siendo estos a su vez afectados por la naturaleza inalámbrica de estos enlaces inalámbricos incluyendo los ya mencionados jammers o inhibidores de señal. [7].

En esta temática de interferencias electromagnéticas que es inducida o provocada por los jammers o inhibidores de señales representan una amenaza importante porque provocan reducciones de calidad del canal e incluso llegan a afectar lo que es la relación señal-ruido, la tasa de error de bit y la magnitud de error vectorial [8].

1.3. Problema de investigación

El problema central de esta investigación consiste en determinar de qué manera la interferencia electromagnética generada por un jammer altera la estabilidad y disponibilidad de los sistemas de comunicación de un UAV virtualizado, evaluando la degradación del espectro de la señal cuando el sistema es modelado en un entorno de simulación como Simulink. Se busca cuantificar la degradación del enlace en función de la potencia, el tipo y la configuración temporal o espectral del jammer [9].

Del problema general se desprenden las siguientes preguntas específicas:

¿Qué modelo matemático describe de forma adecuada la acción de un jammer sobre un enlace UAV?

¿Cuál es el nivel de degradación y pérdida del enlace de comunicación bajo diferentes escenarios de interferencia y potencias de bloqueo?

¿Qué parámetros del canal y del jammer influyen con mayor intensidad en la degradación de la comunicación?

¿Qué tan útil resulta la simulación en Simulink para representar y analizar el fenómeno con criterios de ingeniería?

El modelo desarrollado constituye una herramienta útil para el diseño de sistemas de comunicación más robustos, para la enseñanza de fenómenos electromagnéticos y para la evaluación de riesgos en aplicaciones civiles y de seguridad.

1.4. Objetivos del proyecto

1.4.1. Objetivo general

Analizar en Matlab/Simulink el impacto de la interferencia electromagnética sobre las comunicaciones de un dron, exponiendo el rendimiento a través de métricas tabulares y representaciones gráficas.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Fundamentar teórica y matemáticamente la propagación en 2.4 GHz, el muestreo de Nyquist y la conversión de potencia (dBm/V/W).
- Describir y fundamentar teóricamente los modelos matemáticos que permiten evaluar la degradación de la comunicación.
- Diseñar la arquitectura modular del sistema, integrando subsistemas de generación de señal, interferencia, e instrumentación simulada.
- Desarrollar una interfaz para el control de tecnologías integradas, jammers, estado de vuelo y obtención de resultados en tiempo real.
- Parametrizar el entorno de simulación en MATLAB/Simulink para modelar la interacción EMI-dron y evaluar los enlaces de comunicación.
- Analizar los efectos de la interferencia electromagnética sobre el rendimiento de las tecnologías de comunicación del dron virtual mediante la interpretación de los resultados obtenidos en la simulación.

1.5. Justificación

La investigación justifica una necesidad de gran relevancia, como la comprensión de vulnerabilidades de los sistemas de comunicación en UAV frente a amenazas de interferencias intencionales provocadas por jammers. El estudio del mismo fundamenta en esta investigación una importancia en comprender y evaluar el desempeño de los modelos o enlaces de radiofrecuencia, como es 2.4 GHz en cuanto a perturbaciones intencionales.

Al desarrollar el sistema en Matlab junto con el entorno de Simulink y la configuración de los diferentes parámetros de simulación, se crea un entorno totalmente controlado que permitirá visualizar cómo se comporta el dron frente a diferentes interferencias. El enfoque de la temática permitirá determinar la potencia que es provocada por el bloqueo de comunicación.

En cuanto a la justificación científica y metodológica el estudio sustenta en aspectos teóricos y matemáticos que llegan a regir la propagación de señales y cómo también a la conversión de potencias. La investigación ofrecida de manera científica releva el análisis de la degradación de la señal frente a diversos tipos de jammers, fundamentándose de manera teórica los principios de relación señal-ruido y de la distorsión, lo que nos permite realizar una evaluación sobre el impacto de la interferencia electromagnética.

En cuanto al programa Matlab/Simulink se justifica por su capacidad para modelar sistemas muy complejos, ofreciéndonos una gran variedad de librerías que nos permiten el funcionamiento de simulaciones complejas como la que se realizará.

1.6. Alcance y delimitaciones

El alcance de esta investigación se llega a limitar al análisis del sistema de comunicación simulado frente ataques de jammers. El estudio se elabora mediante un modelado simulado con un énfasis de evaluación sobre la vulnerabilidad del espectro de señales y la caída de enlaces provocados por interferencia intencional.

La investigación llega a considerar varios escenarios representados por propagaciones inalámbricas utilizando a su vez modulaciones comunes en sistemas digitales. El alcance general de toda esta temática principal sería de texto explicativo, descriptivo y experimental centrado mucho en modulación y simulación de enlaces de radiofrecuencias en un UAV.

Se espera con el prototipo simulado, demostrar correctamente la ejecución de los modelos matemáticos y la virtualización de los componentes. Además, el análisis de toda la trama de degradación en cada tecnología integrada.

1.7. Delimitación de la investigación.

Para asegurar la viabilidad del proyecto, se establecen las siguientes delimitaciones:

Delimitación espacial: La investigación se circunscribe exclusivamente al entorno de simulación virtual en MATLAB/Simulink. No contempla pruebas de campo o experimentación con hardware físico (drones reales o equipos de radiofrecuencia físicos), debido a las restricciones regulatorias y de seguridad asociadas al uso de jammers en espacios abiertos [10].

Delimitación temática: El estudio se enfoca únicamente en el análisis de la capa física (PHY) de la comunicación. Quedan fuera del alcance los protocolos de red (IP,

TCP, HTTP, DNS), algoritmos de control de vuelo, o la seguridad a nivel de software/firmware del dron.

Delimitación tecnológica: Se trabajará sobre un modelo de comunicación estándar operando en la banda ISM de 2.4 GHz. Se considerarán modelos de interferencia específicos (como barrage o spot jamming) definidos durante el diseño, no siendo objeto de estudio otros tipos de interferencia no electromagnética.

Delimitación temporal: El período de desarrollo comprende la implementación y validación del modelo dentro del cronograma académico establecido para la tesis.

Delimitación tecnológica y de frecuencia: El estudio se restringe de forma exclusiva al análisis de la capa física (PHY) de los enlaces de comunicación inalámbrica que operan en la banda Industrial, Científica y Médica (ISM) de 2.4 GHz (relevante para los módulos de Wi-Fi y Bluetooth incorporados), además de la caracterización del enlace de navegación GPS en su portadora comercial L1 (1575.42 MHz) y el enlace de largo alcance LoRa (902 – 928 MHz).

1.8. Hipótesis

El incremento de la potencia de interferencia y la concentración espectral del jammer causan una degradación progresiva en la calidad de la transmisión, superando los umbrales de tolerancia del receptor y provocando la inestabilidad y pérdida total del enlace de comunicación del dron virtualizado, siendo la interferencia de banda limitada la que produce la mayor degradación bajo condiciones equivalentes de potencia.

1.9. Metodología general

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo y experimental. Se llega a desarrollar un marco teórico como también un desarrollo matemático del sistema

simulado, donde se incluye una arquitectura totalmente modelada en Simulink, integraciones de señales inalámbricas y de jammers.

A partir de allí, se integran parámetros necesarios para una simulación fluida y exitosa. Finalmente se evalúan los resultados en tiempo real obteniendo métricas de desempeño, y se comparan con referencias de toda la fundamentación teórica.

1.10. Estructura del documento

La tesis se organiza en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Introducción, donde se presenta el problema, los objetivos y la justificación.

Capítulo II: Marco teórico y plataforma de simulación, donde se desarrollan los fundamentos de UAV, comunicaciones, interferencia, jamming, canal inalámbrico y métricas de análisis.

Capítulo III: Metodología, donde se detallan el modelo, la arquitectura de simulación y los parámetros empleados.

Capítulo IV: Resultados y análisis, donde se presentan los datos obtenidos.

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.

Anexos: configuraciones, parámetros adicionales, bloques de Simulink y material complementario.

CAPÍTULO II

2.1. Marco teórico y plataforma de simulación

En el siguiente capítulo se establece la base teórica necesaria para comprender el comportamiento de los sistemas de comunicación utilizados en vehículos aéreos no tripulados y los efectos de la interferencia electromagnética causada por señales interferentes. Para ello, en primer lugar, se abordan conceptos relacionados con la arquitectura, el funcionamiento y los componentes principales de los VANT, dado que estos sistemas dependen de conexiones inalámbricas para el control, la telemetría y la transmisión de datos.

A continuación, se analizan los fundamentos de la comunicación inalámbrica aplicada a los UAV, considerando tecnologías de uso común como Wi-Fi, Bluetooth, GPS y LoRa, así como los principios relacionados con la banda ISM de 2,4 GHz. Estos conceptos establecen la base técnica para las conexiones de comunicación, que se representarán mediante un modelo virtual.

Además, se abordan los fundamentos de la interferencia electromagnética, la compatibilidad electromagnética y los fenómenos de interferencia constituyen el foco principal de esta investigación. Se describen los modelos matemáticos utilizados para representar la interacción entre la señal efectiva, la interferencia y el ruido, incluyendo modelos de propagación, potencia recibida y métricas de rendimiento.

Finalmente, se presentan los principios de la plataforma MATLAB/Simulink y la arquitectura conceptual del modelo de comunicación del UAV, lo que establece la relación entre los conceptos teóricos y la implementación del sistema de simulación.

2.2. Fundamentos de UAV

En Ecuador, la utilización de UAV está totalmente regulada por una norma específica llamada RDAC 101 la cual fue establecida por DGAC (Dirección General de Aviación Civil). Esta norma establece que el registro de los dispositivos que tienen un peso superior a los 250 g y alcanza una altura de 122 m, indica que prohíbe su operación en diversas zonas como las zonas de seguridad y áreas inmensas. [11].

Los UAV son equipos voladores que operan sin la necesidad de un piloto que manipule los controles físicos internamente en el dron, sino de manera remota. En cuanto a la ingeniería de telecomunicaciones son fundamentales estos análisis involucran mucho el tema de señales inalámbricas, comunicaciones inalámbricas y todo lo referente a sistemas de telecomunicaciones [12].

2.2.1. Arquitectura UAV

La estructura de un UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado) abarca cuatro subsistemas fundamentales: la aeronave, la Estación de Control Terrestre (GCS), el enlace de comunicación y la carga útil. Todos estos elementos interactúan para facilitar un vuelo autónomo o semiautónomo, recolectar información y llevar a cabo la misión, Los elementos principales se organizan de esta forma, Segmento Aéreo (Aeronave): Es la parte física del UAV. Controlador de Vuelo (FCU): Actúa como el cerebro de la aeronave. Emplea una serie de sensores (IMU, GPS, brújula) para calcular y ejecutar las maniobras necesarias durante el vuelo. Para desarrollos escalables o software, hay plataformas del sistema de control de vuelo con arquitectura abierta que ofrecen mayor flexibilidad.

- **Sistema de propulsión:** Incluye motores, reguladores de velocidad (ESC) y hélices, que funcionan con baterías o sistemas híbridos.

- **Enlace de comunicación (Data Link):** Se encarga de la telemetría y del control en tiempo real entre el UAV y la estación terrestre. Puede operar usando radiofrecuencia o a través de redes móviles/satelitales.
- **Estación de control terrestre (GCS):** Es la interfaz (software y hardware, como computadoras o tabletas) que utiliza el operador para planear misiones, seguir el estado del vehículo y visualizar información.
- **Carga útil (Payload):** Son los equipos específicos necesarios para la misión, que pueden incluir cámaras, sensores Lidar, sistemas multiespectrales o paquetes de entrega. La confiabilidad del enlace es crítica para la operación segura de la aeronave [13]

2.2.2. Tipos de UAV

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son aeronaves sin piloto que constituyen el elemento central de los sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS); estos últimos comprenden la propia aeronave, el centro de mando en tierra y el sistema de información. Dichas aeronaves pueden ser totalmente autónomas (programadas para seguir una ruta específica y basándose en instrucciones predeterminadas) o pilotadas a distancia mediante un enlace de datos. Estas últimas se denominan aeronaves pilotadas a distancia (RPA) o sistemas de aeronaves pilotadas a distancia. Los UAV pueden clasificarse según su configuración aerodinámica en multi rotores, de ala fija y de despegue y aterrizaje vertical son apropiados para vuelos de corta duración; los de ala fija ofrecen mayor alcance y eficiencia energética; y los híbridos combinan características de ambas categorías [14].

Los UAV cuadricópteros, como se observa en la **Figura 1**, es un vehículo aéreo no tripulado que se sostiene y maniobra en el aire gracias a cuatro rotores de velocidad

variable. A diferencia de los aviones, no requiere movimiento horizontal para producir sustentación; sube, baja, gira y se detiene exactamente el sistema de control lo indique. Su diseño lo ha convertido en el tipo de UAV más utilizado tanto en aplicaciones recreativas como industriales [15].



Figura 1: Referencial cuadricóptero [16]

2.3. Sistema de control de vuelo

El sistema de control de vuelo básicamente es un conjunto de componentes que comprende hardware y software que permiten el control de estabilidad, precisión, dirección y una navegación de lo que es un dron. En los drones modernos, el sistema que controla el vuelo dispone de un controlador interno de vuelo como sensores, receptores GPS y muchos algoritmos que permiten el control absoluto del UAV.

Desde la expectativa de la ingeniería, el control de vuelo tiene un funcionamiento dado por un control de retroalimentación. Posterior a eso el controlador compara todos esos valores con parámetros referenciales calculando el error actual y llega a generar acciones muy correctivas para mantener la trayectoria de vuelo y estabilidad.

2.4. Relación con la interferencia electromagnética

Los medios de desempeño de un sistema de control de vuelo dependen especialmente de la existencia y fiabilidad del enlace del sistema de comunicación entre el UAV y la estación de control del mismo. En caso de que un bloqueador inyecte información interferente en la misma banda operativa, esta se puede ver afectada de forma directa, lo que puede resultar en un enlace de control de vuelo con mala calidad (retrasos, pérdida de paquetes y/o total pérdida del enlace). A partir del momento, el controlador de vuelo puede implementar los mecanismos de seguridad predefinidos, indicando, por ejemplo, un comportamiento loiter (mantener la posición), un return to home (regresar a casa) e incluso aterrizajes de emergencia. No obstante, si la interferencia también afecta el sistema de navegación donde se hayan logrado las transacciones del controlador, logrando superar el límite de recuperación del controlador, el comportamiento del UAV puede verse afectado considerablemente.

En esta investigación, esta base teórica nos ayuda a entender cómo la degradación de la comunicación, que puede ser simulada en MATLAB/Simulink a partir de diferentes modelos de jammers, puede hacer que indirectamente se vea afectada la operación del sistema de control de vuelo del dron virtual.

2.5. Relación con los objetivos de la investigación

En el siguiente apartado se concreta y respalda los diversos propósitos que están muy vinculados a la arquitectura que contiene el sistema simulado el control de vuelo está integrado dentro de una interfaz que hará que el dron vuele automáticamente en un entorno totalmente controlado.

2.6. El controlador de vuelo

Se podría denominar "UAV Brain" esta, orquesta todo lo que ocurre en el vehículo aéreo. Recibe información proveniente de los distintos sensores, ejecutando on-line los algoritmos de control aplicando las leyes de control correspondientes y enviando comandos al controlador de velocidad electrónica ESC cuando se necesite modificar la velocidad del motor. El controlador de velocidad electrónica ESC es el encargado de mantener el vuelo en condiciones estables y a su vez desempeña n veces la tarea de mantener una determinada altitud, navegación autónoma, seguimiento de rutas y las tareas de seguridad, entre las que destaca el regreso automático al punto de inicio (return to home) si la conexión se pierde [17].

2.7. Sistema de comunicación en UAV

Los sistemas de comunicación de un vehículo aéreo no tripulado consisten en un enlace inalámbrico que ayuda a intercambiar información entre la aeronave y la estación de control en tierra (GCS) [18] .

Desde la comunicación de un UAV desde un punto de vista funcional, es un sistema de comunicación bidireccional, la estación de control, mediante el enlace ascendente, envía los comandos al vehículo aéreo, y el UAV, empleando el enlace descendente, envía la información a la estación. La fiabilidad de estos enlaces depende de la potencia de transmisión, del ancho de banda disponible, de las características del canal del medio inalámbrico, de la sensibilidad del receptor y de las condiciones de propagación de la señal, entre otras coincidencias.

2.7.1. Comunicación inalámbrica

La comunicación inalámbrica es el proceso de enviar y recibir información entre dos o más dispositivos sin ningún cable físico, utilizando ondas electromagnéticas que

viajan por el aire. A diferencia de la comunicación por cable, donde los datos se transmiten a través de cables de metal o fibra óptica, la comunicación inalámbrica usa el espectro de radio para enviar información, lo que permite que los dispositivos intercambien datos más fácilmente a distintas distancias [19].

El trabajo de un sistema de comunicación inalámbrica es convertir la información en una señal eléctrica, que luego se modula en una onda portadora de radiofrecuencia y se envía a través de una antena [20]. Durante la transmisión, la señal puede pasar por cosas como atenuación, reflexión, curvado, dispersión y multitrayectoria, y también puede ser afectada por ruido e interferencias de otras fuentes electromagnéticas. Finalmente, el receptor captura la señal a través de su antena, la demodula y recupera la información original.

En general, un sistema de comunicación inalámbrico básicamente consiste en cinco componentes principales: una fuente de información, un transmisor, un canal inalámbrico, un receptor y un destino de la información. El rendimiento del sistema depende de varios parámetros, como la potencia de transmisión, el ancho de banda, la sensibilidad del receptor, la relación señal-a-interferencia más ruido (SINR) y las características del canal de propagación en la siguiente **Tabla 1**, donde se presenta el sistema inalámbrico, el flujo de información puede describirse mediante las siguientes etapas:

2.7.2. Principios de funcionamiento

Tabla 1. Principios de funcionamiento.

Generación de la	Se prepara información para enviar, como comandos, datos
------------------	--

información	o vídeos.
Modulación:	La información se incorpora a una señal portadora de radiofrecuencia usando tecnología de modulación digital.
Transmisión:	La señal modulada se transmite al aire mediante una antena
Propagación:	La onda electromagnética se mueve a través del canal inalámbrico, donde puede encontrarse con pérdidas e interferencias
Recepción:	La antena receptora capta la señal y la envía al receptor.
Demodulación y recuperación:	El receptor extrae la información original para su procesamiento.

Nota 1. En la tabla se detalla de manera explicativa el principio de su funcionamiento

2.7.3. Característica de la comunicación inalámbrica

La comunicación por radio ofrece varias características que determinan su funcionalidad:

- **Movilidad:** Permite la comunicación entre dispositivos que están en movimiento, sin necesidad de depender de una infraestructura cableada.
- **Flexibilidad:** Facilita la instalación y expansión de redes de comunicación [21].
- **Cobertura variable:** Su alcance depende de la potencia transmitida, la frecuencia de operación y las condiciones del entorno.
- **Sensibilidad a las interferencias:** Las señales pueden verse afectadas por el ruido, los obstáculos y las emisiones de otros dispositivos que operan en la misma banda de frecuencia.

- **Uso compartido del espectro:** En bandas de uso libre, como la banda ISM de 2.4 GHz, varias tecnologías pueden coexistir, lo que aumenta las posibilidades de interferencia [21].

2.7.4. Comunicación inalámbrica en UAV

Las aeronaves no tripuladas hacen uso de los sistemas inalámbricos para el enlace entre la aeronave y la estación de control en tierra en el intercambio de información. Dependiendo de la misión y de la plataforma de ejecución de esta, un UAV puede disponer de enlaces independientes y dedicados para el control de vuelo, telemetría y transmisión de imágenes bajo vídeo en tiempo real.

Para la mayoría de los UAV, los enlaces de comunicación operan en valores de frecuencia sin licencia en 2.4 GHz y 5 GHz debido a la facilidad de obtener que los dispositivos de comunicación se den y a su idoneidad para la tecnología comercial sin hilos. El problema de compartir dichas bandas es que aumenta la posibilidad de interferencia electromagnética, sobre todo si hay transmisiones de alta potencia o si hay sistemas que emiten de manera intencionada señales de interferencia como la interrupción [22].

2.7.4.1. Banda ISM de 2.4 GHz

La banda ISM de 2.4 GHz (Industrial, Scientific, and Medical) es una parte del espectro de radiofrecuencia para su uso por aplicaciones industriales, científicas y médicas que generan radiofrecuencia. Con el desarrollo de la tecnología de comunicación inalámbrica, esta banda usa extensamente el uso para los sistemas de comunicación de corto y medio alcance porque, en la mayoría de los países, no se necesita licencia personal para usarla, siempre que la unidad cumpla con las reglas del organismo. La banda ISM de 2.4 GHz se extiende aproximadamente a 2.400 GHz hasta

2.4835 GHz, por lo que ofrece un ancho de banda de aproximadamente 83.5 MHz, suficiente para múltiples tecnologías de comunicación inalámbrica.

Algunas aplicaciones de uso común son las redes IEEE 802.11 (Wi-Fi), el Bluetooth, el zigbee, algunos sistemas de control remoto y algunos enlaces de comunicación utilizados en vehículos aéreos no tripulados [23].

Para los UAV (vehículos aéreos no tripulados), esta banda va a ser utilizada principalmente para crear enlaces de control, telemetría y transmisión de datos, pues es una banda que tiene un buen equilibrio entre el alcance, la potencia de transmisión y la propia disponibilidad de los equipos comerciales. Sin embargo, también es una banda de acceso compartido en el marco de las distintas tecnologías, lo que supone una alta probabilidad de que haya interferencia o bloqueo, lo que a su vez puede llegar a condicionar la calidad de la comunicación, en caso de que varios sistemas transmiten juntos en frecuencias cercanas [24].

2.8. Tecnologías inalámbricas utilizadas

Los vehículos aéreos no tripulados integran diversas tecnologías inalámbricas para establecer comunicación entre aeronaves, centros de control terrestre y otros dispositivos. La selección de cada tecnología depende del alcance, la velocidad de transmisión, el consumo de energía, la latencia y la fiabilidad requeridas para su aplicación. El estudio considera las tecnologías Wi-Fi, Bluetooth, GPS y LoRa, que representan diferentes escenarios de comunicación vulnerables a la interferencia electromagnética y pueden modelarse en MATLAB/Simulink para analizar su comportamiento en presencia de señales interferentes [25].

2.8.1. Wi-Fi

Wi-Fi se presenta como una forma de comunicación inalámbrica que atiende a la familia de estándares IEEE 802.11, desarrollado para transmitir información mediante ondas de radio en las bandas ISM de 2,4 GHz y 5 GHz. Wi-Fi se caracteriza principalmente por la transmisión de datos a alta velocidad, razón por la que se ha convertido en una de las tecnologías más utilizadas para la construcción de redes de área local inalámbricas [26].

En los drones, el Wi-Fi se utiliza para establecer una conexión de comunicación entre el vehículo y la estación de control, de forma que permite la transmisión de comandos, telemetría, imágenes y vídeo en tiempo real. Si bien su amplia disponibilidad, bajo coste y facilidad de integración han favorecido su uso en drones comerciales y en plataformas de investigación, su funcionamiento, casi de forma exclusiva, en la banda ISM de 2,4 GHz implica la competitividad del espectro que comparte con numerosos dispositivos inalámbricos y el potencial de interferencias electromagnéticas [27].

2.8.2. Bluetooth

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance que permite intercambiar datos entre dispositivos electrónicos utilizando la banda ISM de 2,4 GHz. Hace uso de la técnica de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS), que permite a la comunicación cambiar continuamente de canal a fin de minimizar la probabilidad de interferencia y maximizar la fiabilidad del enlace.

Bluetooth es ampliamente utilizado en aplicaciones de vehículos aéreos no tripulados para la configuración inicial del vehículo, el intercambio de datos con dispositivos móviles, así como la conexión a sensores o periféricos cercanos. Aunque

su consumo energético es menor, su rango y velocidad de transmisión son inferiores a los de Wi-Fi, por lo que no se utiliza generalmente para la transmisión continua de vídeo [28].

Bluetooth se incluye en el trabajo como un ejemplo de tecnología que trabaja en la misma banda de frecuencia que Wi-Fi, y, por lo tanto, probablemente verá su eficacia disminuida en función de las interferencias electromagnéticas provocadas por inhibidores de señal.

2.8.3. GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de navegación por satélites que forma parte de la familia de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). La manera en que funciona es a partir de la recepción de unas señales que emite una constelación de satélites que ayuda al receptor a determinar su posición, velocidad y tiempo utilizando técnicas de trilateración.

A diferencia del Wi-Fi y Bluetooth, el GPS no establece una comunicación bidireccional al dron, pero si establece una comunicación con una estación terrestre; en su caso, se comporta como un sistema pasivo de recepción de señales satelitales. Debido a que éstas llegan a la superficie de la Tierra con un nivel de energía muy bajo, el sistema se torna especialmente sensible a interferencias electromagnéticas y ataques de bloqueo, dificultando así el cálculo de la posición exacta del vehículo.

En los drones, el GPS es uno de los principales sensores de navegación y resulta, dependiendo de la aplicación, de importancia crucial para tareas como la navegación automática, el seguimiento de rutas o el retorno automático al punto de partida [29].

2.8.4. LoRa

LoRa (Long Range) es la tecnología de comunicación inalámbrica a larga distancia y de bajo consumo adecuada para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT), que utiliza una técnica de modulación de espectro ensanchado conocida como Chirp Spread Spectrum (CSS) que permite conseguir una alta sensibilidad de recepción, proporcionando enlaces de comunicación a larga distancia y bajo consumo [30].

En el caso de aplicaciones con vehículos aéreos no tripulados, se aplica principalmente para la transmisión de datos de telemetría y datos de sensores, superando la cobertura ofrecida por tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth. Aun así, la velocidad de transmisión de datos de LoRa queda caracterizada por ser mucho menor, por lo que no es adecuada para aplicaciones que necesitan de un alto rendimiento de datos, como puede ser la transmisión de vídeo de alta resolución.

2.9. Interferencia electromagnética

La interferencia electromagnética es particularmente relevante en el caso de los vehículos aéreos no tripulados, pues la mayoría de los enlaces de comunicación son utilizados para el control de vuelo, la transmisión de telemetría, vídeo y la navegación mediante señales de radiofrecuencia. Estas señales son susceptibles a perturbaciones causadas tanto por fuentes naturales como por dispositivos electrónicos o transmisores cercanos diseñados específicamente para generar interferencias [31].

Desde la perspectiva de la ingeniería en telecomunicaciones, la interferencia electromagnética se puede dividir en dos categorías: no intencional, cuando es generada por equipos eléctricos, motores, convertidores de potencia o transmisores que utilizan el espectro radioeléctrico; e intencional, cuando es creada deliberadamente por un dispositivo conocido como inhibidor, cuyo propósito es interrumpir o bloquear la

comunicación entre un transmisor y un receptor. Modelo conceptual del fenómeno de interferencia electromagnética aplicado a sistemas de comunicación, en el que una fuente de EMI transmite una señal perturbadora que se propaga por el canal e impacta el funcionamiento del receptor, como se muestra en la **Figura 2**.

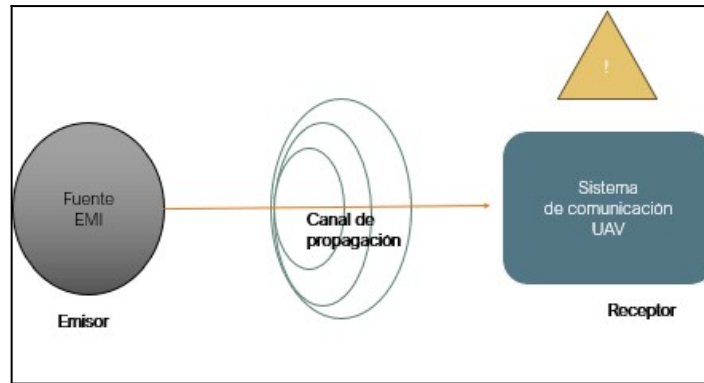


Figura 2: Esquema general de la I.E [32]

1. Elementos de la interferencia electromagnética

Para que se produzca la interferencia electromagnética (EMI), deben coexistir los siguientes elementos:

Tabla 2. Elementos de la I.E

Fuente de interferencia	Medio de propagación	Sistema receptor susceptible
Genera energía electromagnética no deseada.	Facilita que la energía llegue al sistema afectado.	Recibe la perturbación y como el rendimiento se ve afectado.

Nota 2. El modelo será útil más adelante para comprender cómo un inhibidor actúa como fuente de interferencia en el sistema de comunicación de un UAV.

2.9.1. Compatibilidad electromagnética (EMC)

La compatibilidad electromagnética (CEM) es la capacidad de un equipo, dispositivo o sistema para funcionar correctamente en un entorno electromagnético específico, sin generar interferencias electromagnéticas que afecten el rendimiento de

otros equipos, ni sufrir una degradación inaceptable de su rendimiento debido a perturbaciones en dicho entorno [33]

Desde la perspectiva de la ingeniería electrónica y de telecomunicaciones, la CEM es un criterio fundamental en el diseño de equipos, garantiza que múltiples dispositivos puedan operar simultáneamente compartiendo el espectro electromagnético sin comprometer su rendimiento. Para lograrlo, los sistemas deben cumplir con los requisitos relacionados con el control de las emisiones electromagnéticas y la resistencia a las perturbaciones externas, lo que posibilita la correcta coexistencia de diferentes tecnologías inalámbricas [34].

A. EMI no intencional

Se refiere a la radiación o conducción no deseada de energía electromagnética que se genera como efecto secundario del funcionamiento normal de equipos o sistemas electrónicos, sin que sea su propósito interferir con otros dispositivos. La EMI accidental es aquella que se produce como subproducto del funcionamiento normal de otros equipos o fenómenos naturales, sin que exista un propósito de interrumpir o degradar la comunicación. Entre sus fuentes más comunes se encuentran:

Fuentes naturales: descargas atmosféricas, ruido cósmico de fondo, actividad solar.

Fuentes artificiales no dirigidas: motores eléctricos, fuentes conmutadas, líneas de alta tensión, otros transmisores RF operando en bandas cercanas (interferencia co-canal o de canal adyacente), armónicos de osciladores digitales, y radiación espuria de dispositivos electrónicos cercanos (por ejemplo, los propios motores brushless del cuadricóptero o su electrónica de potencia).

Esta interferencia generalmente se caracteriza como aleatoria o estadísticamente predecible y, a menudo, se modela como ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN) en el análisis de sistemas de comunicaciones, como se describe en la sección BER.

B. EMI intencional

La EMI intencional es aquella generada deliberadamente con el objetivo de degradar, interrumpir o manipular un enlace de comunicación específico. Precisamente es el caso del jamming, donde la fuente interferente concentra su energía de forma dirigida (en frecuencia, tiempo o ambas) hacia el sistema víctima, buscando maximizar la relación J/S en el receptor.

A diferencia de la EMI no intencional, la interferencia intencional:

- Tiene un objetivo claro (negación de servicio, degradación de calidad, o engaño).
- Puede adaptarse dinámicamente al comportamiento del sistema víctima (por ejemplo, jammers reactivos que detectan la actividad del enlace antes de transmitir).
- No sigue necesariamente una distribución estadística estacionaria, lo que dificulta su modelado analítico y justifica el uso de simulación (como se mencionó previamente en cuanto a BER, en presencia de jamming) [35].

Como se observa en la **Tabla 3**, las fuentes de interferencia electromagnética que afectan a un UAV pueden clasificarse en intencionales y no intencionales, siendo los jammers la principal fuente intencional al generar señales de RF deliberadamente sincronizadas para degradar el enlace de comunicación, mientras que elementos propios del sistema como motores BLDC, controladores ESC y módulos Wi-Fi o Bluetooth

constituyen fuentes no intencionales que introducen ruido de banda ancha o emisiones

Tipo de EMI	Fuente	Naturaleza de la emisión	Mecanismo de generación	Efecto principal sobre los sistemas del UAV
Intencional	Jammers	Emisión deliberada de energía en RF	Señales sincronizadas en la banda objetivo	Reduce (SNR), aumenta (BER) y puede provocar la pérdida de navegación o enlace de control
No intencional	Motores BLDC	Radiación y conducción no deseada	Conmutación de corriente genera armónicos de alta frecuencia	Introduce ruido de fondo, degrada la recepción de señales débiles
No intencional	Controladores ESC	Radiación y conducción no deseada	Modulación (PWM); variaciones bruscas de tensión	Genera interferencia de banda ancha en enlaces costo y posicionamiento
No intencional	Módulos Wi-Fi	Emisión operativa con componentes fuera de banda	Lóbulos laterales y armónicos en frecuencias adyacentes	Interfiere en banda ISM 2,4 GHz, reduce alcance y estabilidad de enlace
No intencional	Módulos Bluetooth	Emisión operativa con componentes fuera de banda	Salto de frecuencia, pero con radiación residual	Aumenta ruido en la banda, limita sensibilidad del receptor

fuera de banda como subproducto de su funcionamiento normal.

Tabla 3. Principales características de la interferencia electromagnética (EMI).

Nota 3: La Tabla 3 distingue el EMI intencional (jammer, que degrada deliberadamente el enlace) del no intencional (ruido residual de motores, ESC, Wi-Fi y Bluetooth).

2.9.2. Ruido electromagnético

El ruido electromagnético es una irregularidad aleatoria que afecta a los sistemas eléctricos y a los sistemas electrónicos. Esta irregularidad se superpone a la señal útil durante el proceso de transmisión, propagación o recepción de la misma; a diferencia de las señales interferentes, que se producen deliberadamente, el ruido no es capaz de transportar información y se comporta de manera impredecible en todos sus parámetros como son la amplitud, la frecuencia y la fase; y su presencia reduce la capacidad que tiene un usuario para poder recibir correctamente la información a partir del canal que esté apropiado, y también provoca una reducción del enlace de comunicación y un aumento de la probabilidad de error durante cualquier tipo de detección de datos.

Desde el punto de vista de las telecomunicaciones, el ruido es un efecto intrínseco a cualquier sistema de comunicación. De cualquier manera, el ruido puede producirse en fuentes internas, que están representadas por los elementos electrónicos del emisor y del receptor, o bien en fuentes externas, como podrían ser las relacionadas con el medio electromagnético. Dado que el ruido es un fenómeno aleatorio, nunca puede ser eliminado, pero sí que puede ser reducido con técnicas de filtrado [36].

Clasificación del ruido electromagnético

El ruido electromagnético se puede clasificar en las siguientes categorías según su origen:

1. Ruido interno

Se origina por los elementos electrónicos del propio sistema de comunicación. Sus principales manifestaciones son el ruido térmico, provocado por la excitación térmica de los electrones que viajan a lo largo de los conductores, y el ruido de disparo, que se origina por el movimiento discontinuo de las cargas eléctricas en los dispositivos semiconductores. El tipo de ruido se presenta de forma permanente y es normal en el funcionamiento de los circuitos electrónicos.

2. Ruido externo

Proviene de fuentes externas al sistema de comunicación. También puede ser causado por fenómenos naturales, como rayos o radiación solar, y por dispositivos eléctricos y electrónicos cercanos que producen radiación electromagnética no deseada. En entornos urbanos, las redes inalámbricas, los motores eléctricos y los equipos industriales son algunas de las principales fuentes de ruido externo [37].

3. Ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN)

El ruido, en el contexto del análisis y simulación de sistemas de comunicación, se representa comúnmente mediante el modelo de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN), cuya suposición fundamental es que el ruido se acopla linealmente con la señal transmitida, presenta una distribución de probabilidad de tipo gaussiano y su densidad espectral de potencia es prácticamente constante en el rango de frecuencias correspondiente al ancho de banda útil.

El modelo AWGN es uno de los más utilizados en comunicaciones por su simpleza desde el punto de vista matemático y su buena aproximación. Dependiendo del tipo de aplicación y de la naturaleza del ruido en el entorno de explotación, existen distintas formas de describir el ruido en ambientes realistas utilizando estos modelos, siendo el modelo AWGN el óptimo. MATLAB/Simulink incluye bloques para

implementar el modelo en un canal de comunicaciones de forma que se puede evaluar el comportamiento del sistema para distintas condiciones de ruido.

En esta investigación se usará el modelo de ruido AWGN para modelar el ruido del propio canal de comunicación, como se expresa a continuación:

Ecuación 1. Señal recibida producida por el jammer

Donde

$s(t)$: señal útil transmitida.

$j(t)$: señal interferente generada por el jammer.

$n(t)$: ruido blanco gaussiano aditivo en el canal.

4. Efectos del ruido en los sistemas de comunicación

Al crecer el ruido, disminuye la capacidad del receptor para identificar correctamente la señal deseada, como resultado hay errores en la forma de reconocer los símbolos y bits transmitidos. Por tal motivo, la calidad del enlace inalámbrico se reduce, al tiempo que se incrementan indicadores como la tasa de error de bits (BER) y el error de medición de señal (EVM). No obstante, tanto el ruido como la interferencia electromagnética tienen distintas repercusiones. El ruido es intrínseco a cualquier sistema de comunicación, en contraposición con la interferencia, la cual puede proceder de otras transmisiones o bien de fuentes deliberadas como los inhibidores de señal, diseñados para reducir deliberadamente el rendimiento del enlace [38].

2.9.3. Interferencia electromagnética en sistemas de comunicación

La interferencia electromagnética es la perturbación no deseada de una señal por la presencia de otras emisiones electromagnéticas. La interferencia electromagnética

comprende toda perturbación no deseada que altera la transmisión, recepción o procesamiento de una señal en un sistema de comunicaciones. En el caso de los UAV, esta perturbación adquiere especial importancia debido a que los enlaces de comando, telemetría, navegación y carga útil operan sobre medios inalámbricos expuestos a fuentes intencionales y no intencionales de degradación. Cuando la interferencia se produce de manera deliberada con el propósito de afectar el enlace, se denomina jamming. En sistemas UAV, puede originarse por fuentes accidentales o por ataques deliberados.

La interferencia electromagnética en las comunicaciones es el fenómeno por el cual una señal electromagnética no deseada interfiere con la transmisión, propagación o recepción de una señal deseada, degradando la calidad del enlace de comunicación. Esta interferencia puede originarse en otros sistemas electrónicos, transmisores que operan en la misma banda de frecuencia o dispositivos diseñados para causar interferencia intencionalmente, afectando la capacidad del receptor para recuperar correctamente la información transmitida.

En las comunicaciones inalámbricas, las señales se transmiten en el espacio libre mediante ondas electromagnéticas. Durante el proceso, la señal deseada puede verse afectada por ruido, pérdida de propagación, desvanecimiento y otras interferencias causadas por la transmisión. Cuando la potencia de la señal interferente aumenta hasta igualar o superar la de la señal deseada, el receptor tiene dificultades para distinguir la información transmitida, lo que aumenta la probabilidad de errores en la recepción de datos.

Desde el punto de vista del análisis de comunicaciones, la señal recibida puede representarse mediante el siguiente modelo matemático:

Donde:

- $r(t)$: Señal recibida.
- $s(t)$: Señal útil transmitida.
- $i(t)$: Señal interferente.
- $n(t)$: Ruido del canal.

En esta investigación, cuando la interferencia provenga de un dispositivo de jamming, la componente se representará como , obteniéndose el modelo:

El modelo constituye la base para la implementación del canal de comunicación en MATLAB/Simulink.

1. Principio de funcionamiento del jamming

El éxito de una interferencia intencional depende de diversos factores relacionados con el sistema de comunicación y con las características del transmisor interferente. Entre los más importantes se encuentran:

- La potencia transmitida por el jammer.
- La distancia entre el jammer y el receptor.
- La frecuencia de operación de la señal útil.
- El ancho de banda ocupado por la interferencia.
- La ganancia de las antenas del transmisor y del receptor.

- Las pérdidas de propagación del canal inalámbrico.

Cuando estos factores favorecen a la señal interferente, la relación señal-interferencia más ruido (SINR) disminuye, lo que incrementa la tasa de error de bit (BER) y la distorsión de la señal modulada, reflejada mediante el Error Vector Magnitude (EVM).

2. Jamming en sistemas de comunicación UAV

Los vehículos aéreos no tripulados dependen de enlaces inalámbricos para mantener la comunicación con la estación de control terrestre. Estos enlaces soportan funciones esenciales como el envío de comandos de vuelo, la transmisión de telemetría, la recepción de información de navegación y, en muchos casos, la transmisión de vídeo en tiempo real.

La presencia de un jammer puede afectar estos enlaces al introducir una señal interferente que reduce la capacidad del receptor para recuperar la información transmitida. Dependiendo de la intensidad de la interferencia y de las características del sistema de comunicación, pueden presentarse efectos como pérdida de paquetes, incremento de la latencia, disminución de la calidad del enlace o interrupción de la comunicación [39].

En sistemas de navegación satelital como el GPS, el efecto del jamming resulta especialmente crítico debido a que las señales procedentes de los satélites llegan al receptor con niveles de potencia muy bajos. En consecuencia, una señal interferente relativamente intensa puede impedir la correcta recepción de la información de navegación

1. Jammer de ruido (noise jammer).

Dispositivo que emite señales aleatorias, caóticas y continuas (parecidas al ruido estático), cubriendo las señales útiles del enemigo. Las hace inaudibles o indetectables, como si taparas una voz fuerte con un ruido muy alto. Es el tipo más básico y común. Como se observa en la **Figura 3**, se muestra un supresor de ruido de audio jammer Bug Hunter BDA que se encontró en las investigaciones realizadas como tipo de interferencia que actúa transmitiendo ruido de forma continua sobre el canal de comunicación, reduciendo la relación señal-ruido (SNR) y comprometiendo el desempeño del receptor.

En particular, se destaca que el jammer de ruido gaussiano puede implementarse de manera eficiente en MATLAB/Simulink mediante bloques de generación de ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise), lo que permite reproducir escenarios controlados de interferencia y evaluar el impacto sobre el desempeño del enlace de comunicaciones del UAV [40].



Figura 3: Jammer de ruido [40].

2. Jammer de barrido (Sweep Jammer)

Dispositivo que concentra toda su potencia en una sola frecuencia y la va moviendo o "barriendo" lentamente por todo un rango de frecuencias. Cubre muchas bandas, pero no todas al mismo tiempo: pasa por cada una secuencialmente. Es un punto medio entre el de tono único y el de banda ancha: gasta menos energía que el de banda

ancha, pero cubre más que el de tono único. El tipo de jammer transmite una señal que cambia continuamente de frecuencia dentro de un rango determinado el Sweep Jammer, como se puede ver en la **Figura 4**.

Entre sus principales ventajas destacan la capacidad de cubrir múltiples frecuencias con un consumo de potencia inferior al de un *jammer* de banda ancha, lo que permite afectar enlaces multicanal, sistemas de posicionamiento global (GPS) y tecnologías de comunicación inalámbrica como Wi-Fi y Bluetooth [41].



Figura 4: "Sweep jammer" [42].

3. Jammer de tono único (Spot jammer).

La **Figura 5**, ilustra el rendimiento del jammer de tono único y permite observar que toda la energía de transmisión se puede informar en una única frecuencia determinada. Además, explica precisamente que sólo la interferencia es la que se da en el canal de objetivo, así como se asume que los sistemas fijos tienen muy buenos resultados, el resto de ellos no padece de ninguna violencia.



Figura 5: Jammer de tono único [43].

4. Jammer de banda ancha (Barrage jammer)

Es un dispositivo que genera interferencia de alta potencia en un gran número de frecuencias y se representa en la **Figura 6**, por lo que es capaz de cubrir varias bandas al mismo tiempo. El dispositivo bloquea todo lo que esté dentro de su espectro como radares, comunicaciones o navegación, todos quedan bloqueados simultáneamente. Se muestra el principio de funcionamiento del jammer de banda ancha en el que la señal interferente se distribuye de forma simultánea sobre un amplio espectro de frecuencias. Esta propiedad no requiere información previa de la frecuencia exacta ya que bloquea múltiples sistemas de comunicación o de navegación al mismo tiempo [44].



Figura 6: Jammer de banda ancha [44].

2.9.4. Efectos de la interferencia electromagnética sobre el UAV

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son dependientes de los enlaces de comunicación por vía inalámbrica para intercambiar información con la estación de

control terrestre. Cuando intercambian información, los enlaces existen para la transmisión de comandos de control, de telemetría, de información de navegación y, en un gran número de los casos, de vídeo en tiempo real. La comunicación es efectuada mediante ondas electromagnéticas, es susceptible a los fenómenos de perturbación y puede ver comprometida su operatividad en los casos donde el entorno radioeléctrico presenta un elevado ruido o interferencia [45].

1. Impacto sobre el rendimiento del sistema de comunicación

La interferencia electromagnética modifica las condiciones de operación del canal inalámbrico y puede producir una disminución progresiva de la calidad del enlace [46].

Entre las principales consecuencias se encuentran:

- Reducción de la calidad de la señal recibida.
- Disminución de la confiabilidad del enlace de comunicación.
- Reducción del alcance efectivo de la comunicación inalámbrica.

2.10. Fundamentos matemáticos del sistema

Para poder analizar un sistema de comunicación es necesario contar con una representación matemática que describa la relación entre la señal transmitida y las perturbaciones que pueden aparecer en su propagación. En un canal inalámbrico, la señal recibida no se corresponde sólo con la información emitida por el transmisor. En el proceso de propagación se imponen efectos de ruido y señales interferentes que existen en el entorno electromagnético [47]. El motivo por el cuál se hace uso de modelos matemáticos se debe a que son la base de estudio de los sistemas de

comunicación y que permiten establecer los efectos de dichas perturbaciones en el rendimiento del enlace.

En perfecta condición la señal recibida sería igual a la señal emitida. Sin embargo, en escenarios reales la propagación de ondas electromagnéticas viene determinada por atenuación, por ruido térmico, por pérdidas del canal y por la interferencia provocada por otros transmisores. El modelo debe incluir una señal generada deliberadamente para interferir, como una señal emitida por un jammer [48].

En la investigación se utilizará un modelo simplificado de un canal de comunicación, suficiente para estudiar el efecto de la interferencia electromagnética a lo largo del enlace inalámbrico del UAV en el entorno de simulación.

2.10.1. Modelo general de comunicación

El modelo general utilizado para representar la señal recibida es:

Ecuación 3. Señal recibida

- $r(t)$: señal recibida en el receptor.
- $s(t)$: señal útil transmitida por el sistema de comunicación del UAV.
- $i(t)$: señal interferente generada por el *jammer*.
- $n(t)$: ruido en el canal de comunicación, generalmente modelado como ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN).

Esta representación corresponde a las superposiciones de las señales a la recepción, el receptor percibe la suma de la información útil, junto con la de las perturbaciones que contiene el canal [49].

2.10.2. Relación señal a interferencia más ruido (SINR)

La relación entre la señal recibida, la interferencia y el ruido se define como el cociente entre la potencia útil recibida y la suma de la potencia de interferencia. Esta métrica, en términos matemáticos, expresa el grado de dominancia de la señal de interés frente a la interferencia proveniente del canal [50]. Cuando el jammer sube su potencia o se convierte en un jammer más eficiente espectralmente, por lo tanto, la SINR decae lo que produce dando una probabilidad de error aumentada, tal como se describe:

Ecuación 4. Fórmula general de SINR

Donde:

- es la potencia de la señal deseada.
- es la potencia de la interferencia.
- es la potencia del ruido.

En decibelios (dB), la expresión es:

Ecuación 5. SINR expresada en dB

Aquí, las potencias están en escala logarítmica (dB), por lo que la suma y resta representan la relación.

2.10.3. Tasa de error de bit (BER)

La tasa de error de bit es un parámetro que calcula o cuantifica la calidad y fiabilidad de una transmisión de datos, tal como se describe [51]:

Donde:

- es la tasa de error de bits
- es el número de bits recibidos con error.
- es el número total de bits recibidos.

2.10.4. Magnitud del error vectorial (EVM)

Para individualizar en cuantitativa dicha diferencia entre los símbolos recibidos y los símbolos de referencia en el plano de constelación se emplea la magnitud del error vectorial EVM, la cual correlaciona el hecho de que, si los valores de EVM se consideran elevados, habrá peor calidad de modulación de señal (el EVM tiene pendiente positiva claramente hacia la distorsión) [52]. Es una métrica que resulta especialmente útil en el análisis de interferencia en tanto en cuanto captura errores de amplitud y de fase en la recepción.

Para cada símbolo recibido, el error vectorial es la diferencia entre el símbolo recibido y el símbolo de referencia (ideal) en el plano I/Q:

Donde:= símbolo recibido k-ésimo (complejo, con componentes I/Q)

= símbolo de referencia ideal k-ésimo

1. EVM por símbolos

2. EVM total (RMS), forma más usada

Donde:

- = número total de símbolos evaluados
- (símbolo recibido en el instante k)
- (símbolo ideal correspondiente)

1. Expresado en componentes I/Q

2. EVM en porcentaje (forma habitual de reportarlo)

EVM en dB

El valor de EVM indica el grado de error en la señal modulada: mientras más bajo, mejor es la calidad de la señal recibida.

2.10.5. Teorema de Nyquist

El Teorema de Nyquist permite convertir una señal analógica a una señal digital y la frecuencia de muestreo de ser mucho menor al doble de la frecuencia máxima [53].

1. Expresión matemática

El criterio de Nyquist se expresa mediante la siguiente relación:

Donde:

- : frecuencia de muestreo (Hz).
- : máxima frecuencia en la señal (Hz).

La frecuencia

Se conoce como frecuencia de Nyquist.

Cuando esta condición se cumple, la señal puede reconstruirse sin ambigüedades a partir de las muestras obtenidas.

2.10.6. Degradación de la señal

La degradación de la señal se puede considerar como la disminución de la calidad de la señal cuando la señal se propaga a través de un canal inalámbrico. La degradación de la señal se puede presentar de diferentes formas, como la disminución de la potencia recibida, el aumento del ruido, la disminución de la relación señal-ruido, el incremento de la tasa de error de bits y el aumento del valor absoluto del vector de error [54].

Para calcular el porcentaje de degradación se utiliza la siguiente fórmula:

donde:

- D%: Indica porcentaje de degradación
- PI: Indica la potencia de la interferencia (Ocasionada por el jammer)
- PS: Indica la potencia de la señal deseada (Señal útil del dron)
- PN: Indica la potencia de ruido del canal

En el modelo de simulación, esta degradación es el efecto esperado de la interacción entre la señal efectiva, la interferencia causada por el inhibidor y el ruido del

canal. Al analizar esta degradación, se determina el impacto de diferentes escenarios de interferencia en el rendimiento del sistema de comunicación del UAV.

2.11. Instrumentación virtual y métricas de desempeño

La instrumentación virtual está constituida por un conjunto de herramientas que sirven para observar, medir y evaluar el comportamiento de un sistema de comunicación durante la simulación. La finalidad de la instrumentación es la de proporcionar información gráfica y cuantitativa del estado de la señal cuando ésta se encuentra en diferentes etapas del modelo, esto permite verificar cómo la interferencia electromagnética que se presenta en el entorno afecta el enlace inalámbrico.

En el ámbito de esta investigación no altera el comportamiento del sistema de comunicación, sino que es utilizada como un sistema de monitorización y análisis. Esas herramientas permiten no sólo visualizar cómo las señales evolucionan en el tiempo, sino también permiten su análisis espectral y calcular indicadores evaluando la calidad del enlace en función de las condiciones en las cuales se encuentra la interferencia.

2.12. Validación conceptual del modelo

La validación del concepto del modelo consiste en comprobar que el marco que se ha propuesto representar de un modo fiel el comportamiento de uno o más sistemas de comunicación inalámbrica afectados por interferencias electromagnéticas. Y antes de exponer los resultados de la simulación con el modelo de interferencia electromagnética hay que verificar también que los subsistemas que componen el modelo de transmisión, interferencia, canal, recepción y componentes, tengan continuidad con los postulados teóricos y matemáticos que se han descrito en los capítulos previos.

En el siguiente caso, la validación del concepto se fundamenta en la coherencia del modelo de simulación en el entorno de comunicación. Para ello se tendrá que

comprobar que la forma de la transmisión de la señal en los gráficos se corresponde con el modelo de Freese, que el ruido del canal sea coherente con el comportamiento del modelo AWGN, y que la interacción entre la señal efectiva, la interferencia y el ruido esté representada por el modelo de comunicación general: $(r(t) = s(t) + j(t) + n(t))$.

CAPÍTULO III

3.1. Metodología

3.1.1. Tipo de investigación

Esta investigación está encaminada a estudiar el efecto de la interferencia electromagnética forjada por diferentes tipos de jammers sobre un dron virtual estructurado en MATLAB/Simulink. Para ello se elabora un entorno de simulación controlado que permite inspeccionar el funcionamiento de la comunicación autorregistrada en el dron para diferentes maneras de interferencia, recogiendo así datos que nos ayuden a evaluar su rendimiento y estabilidad.

3.1.2. Investigación aplicada

Esta investigación sitúa la generación de conocimientos que contribuyan a la solución de un problema determinado, el que se relaciona con la vulnerabilidad que presentan los sistemas de comunicación de los drones ante interferencias electromagnéticas. A partir de los resultados se brinda información válida para valorar el comportamiento del sistema y, a su vez, se progresa en el desarrollo de tácticas que mejoren la fiabilidad de las comunicaciones.

3.1.3. Investigación cuantitativa

Esta declaración retórica gira en torno a la obtención y análisis de reseñas numéricas que provienen de las simulaciones realizadas con MATLAB/Simulink. Las variables de estudio se evalúan con indicadores como la relación entre la señal y el ruido (SNR, por su sigla en inglés: Signal-to-Noise Ratio), la tasa de error de bits (BER, por su sigla en inglés: Bit Error Rate), la potencia de la señal y otras medidas del tipo que permiten medir objetivamente el desempeño del dron.

3.1.4. Investigación experimental

Corresponde a una investigación experimental, se opera de forma controlada la variable autónoma, representada por los diferentes tipos de jammers, para visualizar y analizar su efecto sobre la variable dependiente, correspondiente al desempeño del dron virtual dentro de un entorno de simulación elaborado en MATLAB junto con el entorno de Simulink.

3.2. Descripción del diseño de la investigación general del sistema propuesto

La investigación se elabora en un entorno de simulación implementado en MATLAB/Simulink, el cual permite controlar las diversas condiciones de cada experimento y mantener de manera uniforme los parámetros del sistema. En el entorno se ejecutan diferentes escenarios de simulación para evaluar el comportamiento del dron bajo condiciones normales de funcionamiento y frente a la aplicación individual de un jammer de ruido blanco, un jammer gaussiano, un jammer de banda limitada y un jammer de ruido impulsivo.

Dentro de cada espacio se almacenan las diferentes señales que fueron formadas por las diferentes tecnologías inalámbricas, así como también los diversos parámetros de desempeño que fueron obtenidos mediante las diferentes herramientas de monitoreo que ofrece el entorno de Simulink.

3.3. Herramientas y recursos utilizados por capas del sistema propuesto

Las herramientas que llevaron a cabo la investigación simulada permitieron modular e implementar la forma en que se comportaría un dron virtual frente a interferencias electromagnéticas producidas intencionalmente.

3.4. Software utilizado

MATLAB fue el programa seleccionado para desarrollar la simulación con Simulink, considerado como el software más empleado para el modelado de sistemas de comunicación y el procesamiento de señales gracias a su tremenda disponibilidad de librerías especializadas, siendo un programa muy conocido dentro de la rama de ingeniería, que permitieron representar de manera adecuada el tema tratado en el trabajo, así como desarrollar el modelo de simulación [55].

3.5. Hardware utilizado

Las simulaciones se llevaron a cabo en un computador con recursos suficientes para ejecutar y simular el modelo desarrollado en MATLAB/Simulink. En la **Tabla 4**, se pueden visualizar las diferentes características del hardware específico usado durante la elaboración de esta investigación.

Tabla 4. Hardware utilizado componentes

Componente	Especificación
Equipo	HP 14-ep0002la
Procesador	Intel Core i3
Memoria RAM	8 GB
Almacenamiento	SSD
Sistema operativo	Windows 11 de 64 bits

3.6. Hardware necesario para una simulación fluida

Para lograr una práctica de simulación fluida en MATLAB/Simulink, el hardware actual basado en un procesador Intel Core i3 y 8 GB de RAM puede volverse

insuficiente, en especial, si los modelos aumentan en complejidad, tienen muchos bloques o utilizan herramientas de cálculo.

Para optimizar el rendimiento y garantizar simulaciones fluidas, se recomienda el siguiente hardware con las siguientes especificaciones:

Tabla 5. Recomendaciones de hardware

Recomendaciones de hardware		
Componente	Especificación recomendada (para mayor fluidez)	Razón
Procesador (CPU)	Intel Core i7 / AMD Ryzen 7 (o superior)	Más núcleos físicos mejoran la gestión de simulaciones complejas y el procesamiento paralelo.
Memoria RAM	16 GB mínimo (32 GB ideal)	MATLAB es muy intensivo en RAM. 8 GB es el mínimo absoluto; 16 GB+ permite manejar modelos grandes sin ralentizaciones.
Almacenamiento	SSD NVMe (M.2)	Indispensable para reducir tiempos de carga de programas, carga de grandes conjuntos de datos y escritura de logs.
Gráficos (GPU)	GPU dedicada con al menos 2-4 GB de VRAM	Mejora la renderización de gráficos (Scopes, Simulation Data Inspector) y acelera ciertos cálculos mediante CUDA/OpenCL.

La **Tabla 5**, describe el equipamiento técnico que se dedicó para ejecutar las simulaciones. En concreto, se usó un ordenador modelo HP 14-ep0002la para

proporcionar los recursos de procesamiento necesarios para que el modelo elaborado en MATLAB/Simulink se ejecute sin que se vea afectado el rendimiento del hardware. Es decir, la configuración de esta base estaba compuesta únicamente por un procesador de tipo Intel Core i7, una memoria RAM de 16 GB y una unidad de almacenamiento tipo SSD NVMe.

3.7. Desarrollo e implementación del sistema de simulación

La generación e implementación del sistema de simulación es la parte esencial de esta investigación, modelará el comportamiento de un dron virtual y permitirá evaluar el efecto producido por la interferencia electromagnética como consecuencia de diferentes tipos de jammers sobre sus tecnologías de comunicación. En torno a lo comentado, se utilizó MATLAB/Simulink debido a que nos aporta herramientas para el diseño, la integración y simulación de sistemas dinámicos. En el siguiente apartado se hace referencia a la arquitectura general del sistema propuesto y al proceso de implementación de cada uno de sus componentes, se presenta el modelo del dron virtual, la integración de las tecnologías de comunicación GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, el diseño de los distintos tipos de jammers implementados para la creación de escenarios de interferencia controlada, los diagramas en Simulink y los fragmentos de código en MATLAB que sirven para su configuración y funcionamiento, con el objetivo de evidenciar la interacción entre ambos entornos y facilitar la comprensión de la arquitectura del sistema de simulación.

3.8. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del sistema tal como se presenta en la **Figura 7**, fue concretada para demostrar el funcionamiento de un dron virtual con distintas tecnologías de comunicación integradas de forma inalámbrica y poder comprobar el aporte de la interferencia electromagnética por diferentes tipos de inhibidores de señal.

3.9. Desglose de la arquitectura general

3.9.1. Diseño e integración del dron

El diseño del dron fue elaborado en MATLAB junto con el entorno virtual de Simulink mediante un modelo tridimensional que representa la estructura y el comportamiento básico de un modelo cuadricóptero 3D durante la simulación, como se muestra en la **Figura 8**.

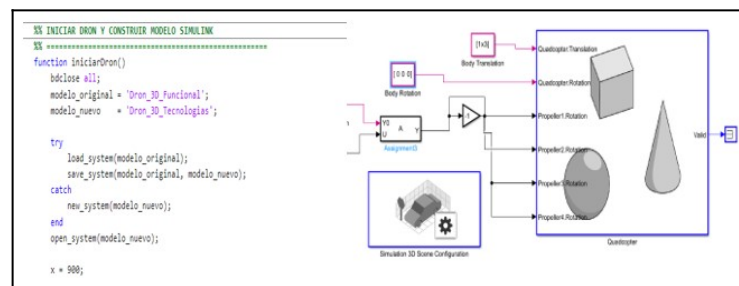


Figura 8. Código y diagrama Simulink

El sistema constituye de un controlador PID que maneja y a su vez da control a la velocidad de rotación de las diferentes hélices, mientras que el bloque de asignación y ganancia es el encargado de asignar las señales necesarias para invertirlas y simular el sentido de giro que tienen los motores, de tal modo que se respete el comportamiento real del dron.

El diagrama también recibe diferentes constantes de posición y orientación que se usaran para poner al día el modelo cuadricóptero mostrado en el entorno 3D. De forma adicional, se complementa en el entorno de simulación la finalización de los modelos propios abiertos y se inicializa la base programada y parametrizada.

3.9.2. Configuración de bloques del diseño del área RPM

La gestión de las RPM en un dron modelado en 3D bajo el entorno de Simulink representa la variable de control crítica que traduce las señales eléctricas provenientes del controlador de vuelo en fuerza de sustentación y momentos de giro.

Como se observa en la **Figura 9**, esto permite específicamente configurar la velocidad de las hélices del dron, entre menos sea el valor que se coloca, menor es la velocidad y entre mayor sea el número que se coloca, mayor velocidad tendrá.

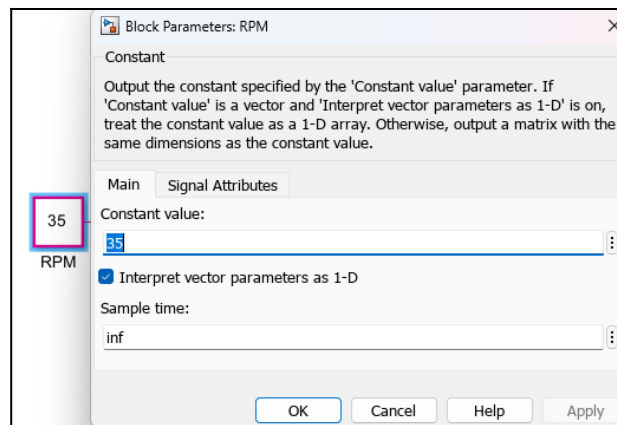


Figura 9. RPM Rev/Min

3.9.3. Propeller Initial Rotation y PID Controller3

La simulación tridimensional del dron se prioriza en dos pilares esenciales: la configuración inicial y el control activo.

A continuación, se demuestran estos dos componentes necesarios:

La **Figura 10**, nos muestra los dos bloques de Simulink que permiten que el dron virtualizado se desplace y se mantenga estabilizado, con el fin de tener éxito en su entorno 3D.

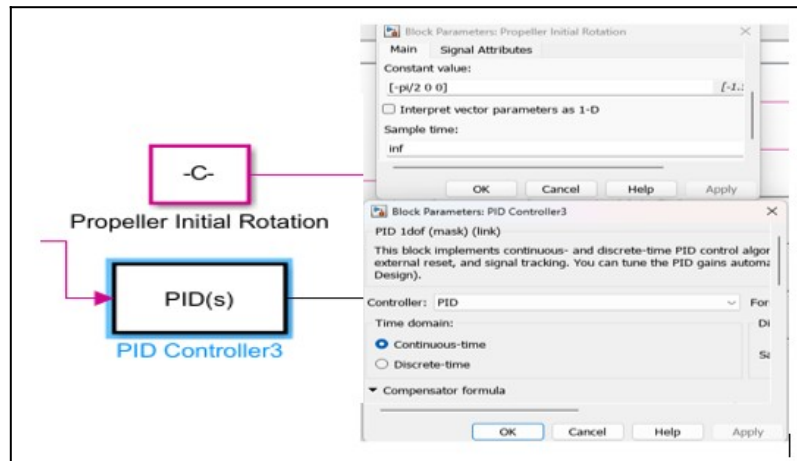


Figura 10. Propeller Initial Rotation y PID Controller3

El primer bloque es el que establece la orientación física inicial de la "pieza", es decir, el que aplica dicha rotación matemática de -90 grados, que permite que las hélices inicien la posición horizontal totalmente antes de hacer girar el dron durante la simulación.

El controlador PID hace las veces de sistema de equilibrio de la aeronave mientras trabaja continuamente; se encarga de calcular el error de inclinación o de posición para modificar la fuerza de los motores, de tal manera que el dron "navegue" adecuadamente y no se des controle y caiga.

3.9.4. Simulation 3D Scene Configuration

El bloque Simulation 3D Scene Configuration como se observa en la **Figura 11**, es el bloque clave de Simulink que actúa como la interfaz entre el modelo matemático y el espacio virtual, donde el espacio virtual del dron tiene que funcionar. El bloque Simulation 3D Scene Configuration está destinado a configurar los parámetros básicos de la escena, como la iluminación, las condiciones atmosféricas, el medio físico, etc., los cuales son necesarios para realizar una visualización y una validación del comportamiento del dron en el espacio 3D.

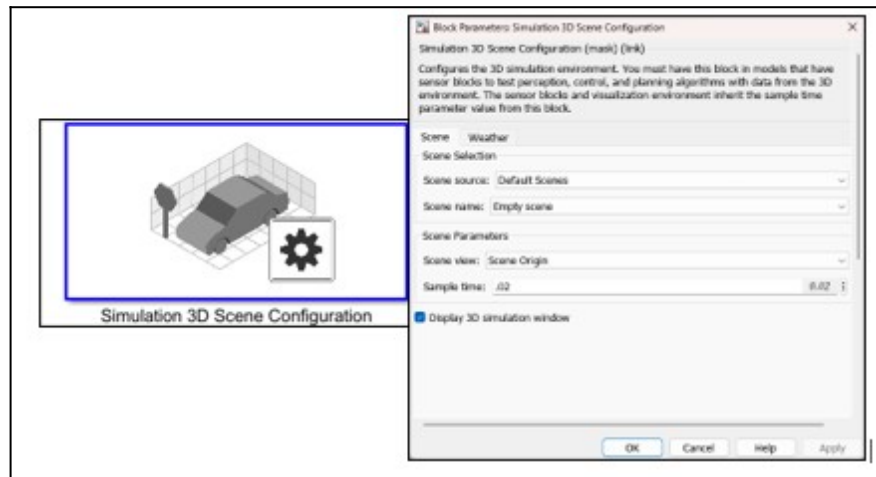


Figura 11. Simulation 3D Scene Configuration

El siguiente bloque también es el que actúa como el motor principal de la creación y gestión del entorno tridimensional virtual donde se moverá el dron. En la configuración actual, le está indicando a Simulink que se demuestre una escena por defecto vacía ("Empty scene") vista desde el origen de coordenadas, para hacer una especie de pintura en blanco para la simulación.

Además, en cuanto al tiempo de muestreo, se está indicando de manera explícita un tiempo de muestreo de 0.02 segundos, lo que implica que el entorno virtual se actualizará 50 veces por segundo, lo que permitirá que los controles sean precisos. Finalmente, el checkbox "Display 3D simulation window" se encuentra marcado. El bloque que está haciendo que la ventana emergente con los gráficos en 3D se abra cada vez que se ejecuta el modelo permite visualizar el vuelo y los sensores en tiempo real.

3.9.5. Quadcopter

El bloque de Quadcopter en Simulink como se presenta en la **Figura 12**, representa el comportamiento físico del dron dentro de un espacio 3D. Un bloque que contempla las leyes de la física como la gravedad, la resistencia aerodinámica y la inercia para procesar las señales de salida de los motores y deducir cómo tiene que moverse y rotar la aeronave en el espacio que nos rodea. Es decir, actúa como el cuerpo

rígido del sistema que convierte los comandos de potencia en una respuesta a las variables del vuelo que esté acorde con las condiciones ambientales que están definidas.

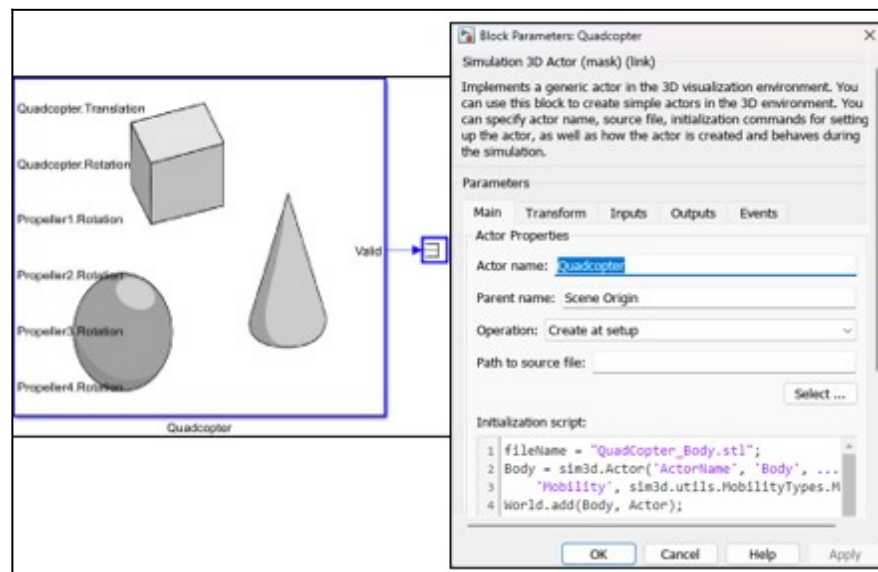


Figura 12. Quadcopter

El bloque de Quadcopter en Simulink hace de modelo dinámico y cinemático central que representa el comportamiento físico del dron dentro de un espacio 3D. Un bloque que contempla las leyes de la física como la gravedad, la resistencia aerodinámica y la inercia para procesar las señales de salida de los motores. Es decir, actúa como el cuerpo rígido del sistema que convierte los comandos de potencia en una respuesta a las variables del vuelo que esté acorde con las condiciones ambientales que están definidas.

3.10. Integración de las tecnologías inalámbricas al dron

El UAV se encarga de controlar la propia operación general de la simulación correspondiente al modelo virtualizado creado con MATLAB/Simulink, permitiendo controlar a su vez la interacción entre el usuario y los diferentes componentes de la simulación; en ese sentido deja controlar el estado de funcionamiento de las tecnologías

de comunicación aplicadas, como también el comportamiento del UAV a la hora de hacer la ejecución de los propios experimentos.

3.10.1. GPS

La integración de GPS en un dron simulado consiste en integrar un bloque sensor capaz de calcular la posición global del vehículo aéreo simulado. El sistema capta las coordenadas del dron de manera real con un elixir, ruido y latencias a fin de simular el comportamiento que tendría un receptor GNSS real.

3.10.2. GPS signal y GPS enable

Los bloques GPS Signal y GPS Enable conforman el modo de gestionar y de activar la información de la posición dentro de la arquitectura de control del dron de acuerdo con la forma de control del mismo, como se muestra en la **Figura 13**. Esto resulta en la posibilidad de gestionar con eficiencia el sistema de navegación del dron, confirmando que la posición se mantenga disponible a la vez que sea utilizada solamente cuando se presenten condiciones de vuelo o requerimientos de la misión que puedan llegar a requerir tal información.

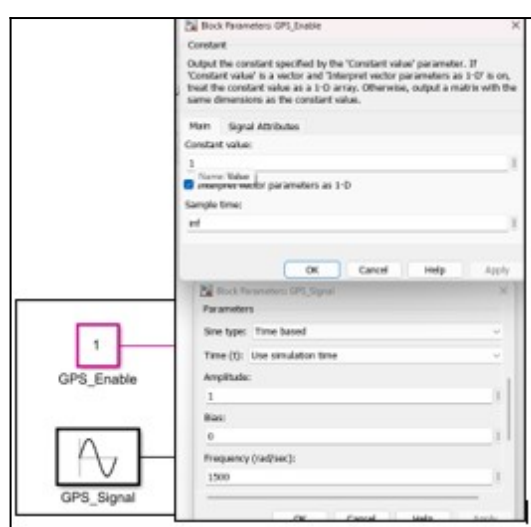


Figura 13. GPS Signal y GPS Enable

3.10.3. GPS product

El bloque funciona como una etapa de procesamiento y acondicionamiento que consolida las señales de posicionamiento provenientes del sensor GPS. Su labor consiste en recibir la información de geolocalización y estructurar de forma coherente para que el sistema de control pueda interpretarla como una referencia espacial válida.

Se observa el bloque producto como un elemento de aritmética básica en Simulink que, de tal manera, se encarga de realizar una operación de multiplicación entre dos señales de entrada distintas como se muestra en la **Figura 14**.

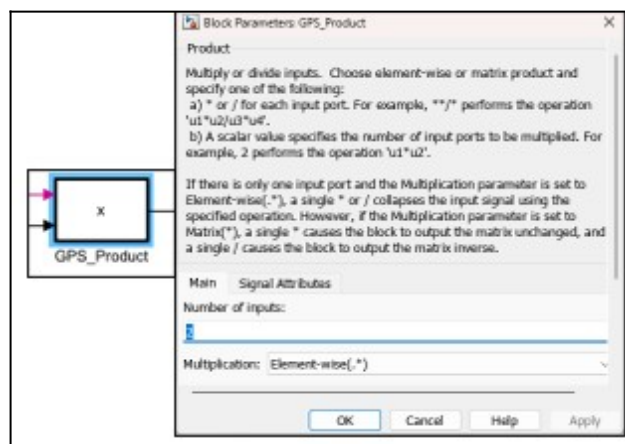


Figura 14: GPS Product.

Dado que su configuración la mantenemos en element wise (*) con una cantidad de entradas de 2, el bloque procesa ambas señales de entrada y obtendrá una única salida, la cual se obtiene multiplicando cada punto y lo que en la particularidad del subsistema GPS Product tiene un papel de control muy importante: une la señal de enable (interruptor lógico de 0 o 1) con la señal de tipo de onda senoidal que produce el GPS. Así, cuando el interruptor se encuentra en 1, la señal queda bien y se transmite a la salida, mientras que cuando lo colocamos en 0, la multiplicación anula la señal de salida y obtenemos el efecto de "apagar" o, en su defecto, "encender" la comunicación del dron mediante un software de manera efectiva y precisa.

3.10.4. Interferencia GPS

La interferencia GPS en un simulador del dron, equivale a una degradación o incluso la pérdida total de la precisión de los datos de la geolocalización, lo que equivale a una forma de evaluar el modelo para valorar la capacidad del sistema ante un entorno adverso. En Simulink, esta forma se desarrolla a través de la introducción de ruidos gaussianos, sesgos temporales o bloqueos de señal leídos de forma que se da paso a modificar las coordenadas leídas y generar situaciones en que no existe ninguna coordenada que se pueda considerar fiablemente en el modelo de la simulación de las comunicaciones.

La **Figura 15** presenta un bloque sumador (sum), que es uno de los bloques más elementales de la lógica de control del modelo el cual permite incluir los efectos de la interferencia. El bloque sumador necesita recibir dos o más señales eléctricas/datos y combinar matemáticamente en una salida, como se controla por su propiedad de "List off signs". El bloque en cuestión tiene el valor de configuración en ++ y por ello el resultado es una suma simple: la señal de emisión original (ej. GPS) más la señal de ruido que proviene de los "Jammers", los cuales se encuentran configurados en el código fuente. La lógica del crecimiento persigue la veracidad de un entorno hostil en el que la señal útil que llega al dron tiende a desaparecer bajo el ruido electromagnético, siendo el resto del sistema el que deberá detectar si la señal contaminada y comprobar si el dron sigue siendo estable o ha perdido el contacto.

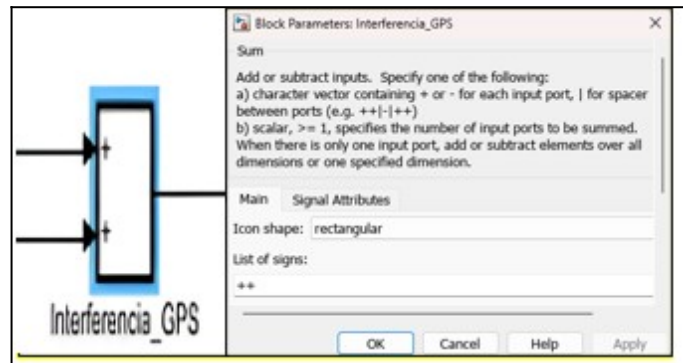


Figura 15. Interferencia GPS

3.10.5. Filtro Salida GPS

El componente es el encargado de procesar y suavizar la señal de posicionamiento que se recibe una vez llega al filtro modo antes de ser utilizada por el control en su funcionalidad de modo de control del dron. El componente se ocupará de contener los algoritmos de filtrado usados (filtros pasa-bajos o filtros de Kalman) y eliminar el ruido, errores de deriva u oscilaciones bruscas de la señal, las cuales suelen ser intrínsecas a las señales satelitales, de forma que el controlador de vuelo recibe unos datos de posición estables y predecibles, y pequeñas oscilaciones inesperadas en la señal proporcionada por el GPS no den lugar a movimientos indeseados o que el comportamiento del dron tenga oscilaciones abruptas durante la simulación.

La estructura del bloque Filtro de Salida GPS, la que podemos observar en la **Figura 16**, es la misma que la de los bloques de producto anteriores, es, por tanto, una puerta lógica de control de la señal de salida del GPS.

Su importancia radica en la integración del sistema donde recibe por un puerto la señal del GPS ya procesada, pero dañada por interferencia, y por el otro puerto recibe la señal habilitadora (los estados "on/off" son manejados desde la interfaz de MATLAB). Al multiplicar ambas señales, el bloque actúa como un filtro y asegura que, si el sistema detecta que la tecnología GPS está "apagada", el dron no recibirá ninguna

señal de localización incorrecta o residual, permitiendo al sistema de control del dron ignorar por completo la señal GPS y recurrir únicamente a sus otros sensores o sistemas inerciales.

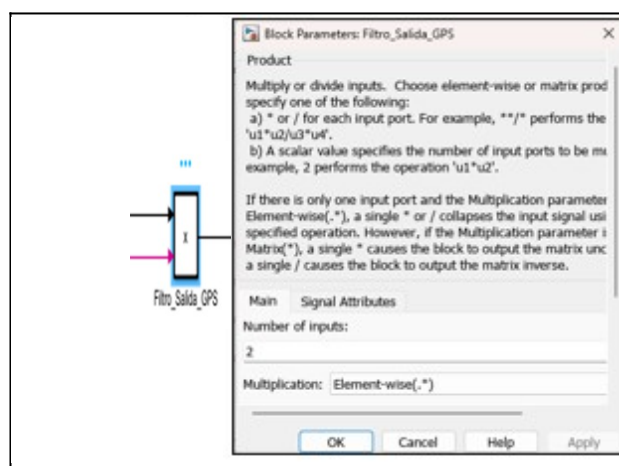


Figura 16. Filtro Salida GPS

3.10.6. Wi-Fi

La inclusión de Wi-Fi en la simulación 3D de un dron en Simulink supone la posibilidad de poder modelizar el enlace de comunicación entre la aeronave y el sistema de control terrestre (en inglés Ground Control Station). En el escenario, el bloque de Wi-Fi no solamente es capaz de simular la transmisión de datos de telemetría y de instrucciones de vuelo, sino que también se integran otros aspectos críticos de la realidad como la latencia de red, la pérdida de tramas o paquetes y la atenuación de la señal en función de la distancia. Tal posibilidad puede ser fundamental para poder conocer el comportamiento del sistema de control al ser capaz de simular posibles desconexiones del sistema o degradaciones de la calidad del enlace. Al simular el enlace o canal inalámbrico se puede determinar la caída del SINR y el crecimiento de la tasa de error de bits (BER) en función de cuando la señal de control empieza a perder integridad.

3.10.7. Wi-Fi Signal y Wi-Fi Enable

Estos bloques Wi-Fi Signal y Wi-Fi Enable funcionan como el sistema de gestión del enlace de comunicaciones inalámbricas dentro de la arquitectura de la simulación se presenta visualmente en la **Figura 17**:

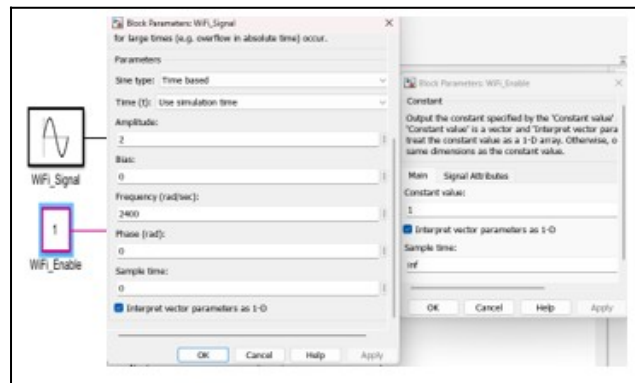


Figura 17. Wi-Fi Signal y Wi-Fi Enable

El componente Wi-Fi Enable actúa como un interruptor lógico de tipo constante; al tener asignado el valor de 1, permite el paso de la señal, mientras que un cambio a 0 interrumpiría la transmisión de datos hacia el resto del modelo.

Por su parte, el bloque Wi-Fi Signal es un generador de onda senoidal diseñado para representar la portadora del protocolo inalámbrico, con una amplitud de 2 unidades y una frecuencia de 2400 radianes por segundo, emulando la banda de 2.4 GHz. La integración de ambos elementos permite que el sistema simule con precisión el estado de la conexión inalámbrica, permitiendo activarla o degradarla dinámicamente mediante la interfaz de usuario para observar cómo afecta esta señal a la estabilidad o telemetría global del dron durante la simulación.

3.10.8. Wi-Fi Product

El bloque antes indicado actúa como la interfaz de procesamiento y empaquetado final que corresponde a la señal de comunicación inalámbrica del sistema,

como aparece mostrado en la **Figura 18**. El bloque que nos ocupa realiza la consolidación de los datos de control y telemetría, el objetivo de esta etapa es la de convertir la señal sin tratar surgida del enlace Wi-Fi en un flujo de información que el controlador del dron pueda comprender. En líneas generales, el bloque garantiza que exista coherencia en la comunicación entre el vehículo aéreo y la estación terrestre, esto se traduce en que tanto las órdenes enviadas como los datos de telemetría recibidos sean los adecuados y se integren correctamente en el modelo, evitando cualquier desprecio por daños o desincronizaciones, de modo que, la operación puede llevarse a cabo sin problemas y con seguridad.

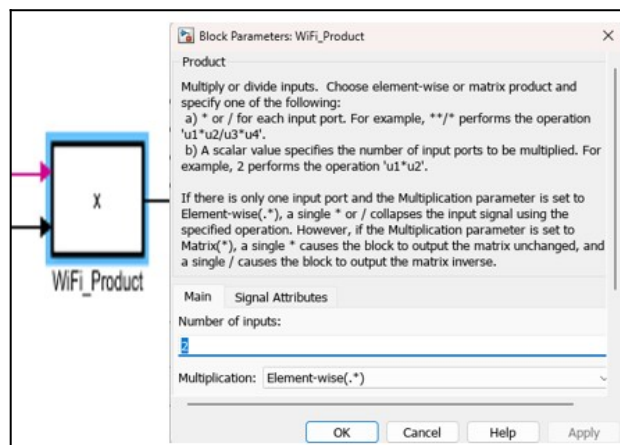


Figura 18. Wi-Fi Product

En el sistema de comunicaciones, el bloque multiplicador es el nodo de control más importante. Está configurado con 2 entradas y, a su vez, se trata de un bloque donde la operación es del tipo element-wise (por lo que el resultado de la multiplicación entre las señales de entrada podría ser perfectamente la operativa de una puerta lógica).

Entrando ya en su funcionalidad, el bloque multiplicador toma la salida que proporciona, en nuestro caso, la señal de la onda senoidal (un análogo de la señal de transmisión de datos del Wi-Fi) y multiplica inmediatamente esta señal por la señal del control de habilitación.

Lo que hace el bloque multiplicador es similar a lo que haría una puerta lógica: cuando el sistema de habilitación está en uno, la señal del Wi-Fi pasa a través de él sin ninguna modificación; si el sistema de habilitación está en cero, el resultado de la multiplicación es cero, por lo que se puede realizar la desconexión limpia del enlace vía sistema inalámbrico dentro de la simulación.

3.10.9. Interferencia Wi-Fi

La interferencia Wi-Fi en la simulación de un dron se puede entender como la descripción de la alteración de un medio electromagnético o físico que degrada el enlace entre el dron y la estación de tierra. En Simulink, esto implica la adición de ruido, la atenuación de la señal, o la pérdida selectiva de paquetes de datos, tal como simular la inclusión de obstáculos, interferencias provocadas por otros aparatos o aumentar la distancia entre el dron y la estación de tierra. Introducir la interferencia en la simulación tiene como finalidad poder comprobar la robustez de los protocolos de comunicación y comprobar si el sistema puede, ante una señal de control inestable o completamente perdida, mantener el comportamiento en estabilidad e ir a situarse en maniobras de seguridad como volver a casa (RTH) o simplemente el vuelo estacionario automático como se muestra en la **Figura 19**.

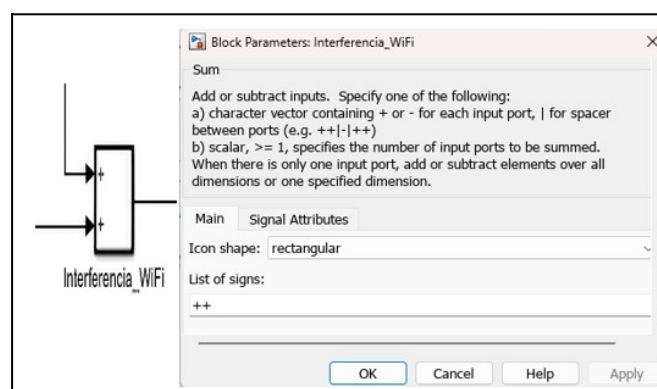


Figura 19. Interferencia Wi-Fi

El bloque, que se denomina Interferencia Wi-Fi, repite la función lógica a la que corresponde con la de la interferencia del GPS que hemos comentado en el apartado anterior. Es un bloque de suma según el parámetro ++, es decir, se configura para sumar dos señales de entrada en una única salida para dar una respuesta por suma directa.

En los sistemas de comunicaciones inalámbricas, el bloque mencionado es un componente de la señal original que contiene el Wi-Fi (la que tiene forma de una onda senoidal que transporta la telemetría o el control) y se combina con la señal de ruido o de interferencia generada por el "jammer". La salida de dicho bloque es una señal desagradable que contiene tanto la información útil como el ruido electromagnético y permite que el modelo se convierta en una simulación exacta de la realidad, la calidad del enlace Wi-Fi va decreciendo o desapareciendo a medida que se ejecuta un ataque, y el sistema del dron responde a la pérdida de conexión o a una tasa de errores por encima de un umbral crítico.

3.10.10. Filtro Salida Wi-Fi

En cuanto al filtro de salida del Wi-Fi, por lo general contiene la parte donde se procesa la señal que se recibe a través de esta vía inalámbrica con el objetivo de hacer que los comandos de control y la telemetría sean recibidos por el sistema con fiabilidad y con limpieza. En función, por un lado, de aplicar técnicas de filtrado que permitan disminuir el ruido, eliminar los cambios drásticos o corregir errores originados por la recepción de paquetes de datos, como consecuencia de la inestabilidad de la conexión se visualiza en la **Figura 20**. Suavizando estas señales, el filtro impide que las variaciones sean comprendidas por el controlador de vuelo como órdenes erróneas, lo que podría provocar movimientos imprevistos o comportamientos poco predecibles del dron en situaciones de comunicación deficientes.

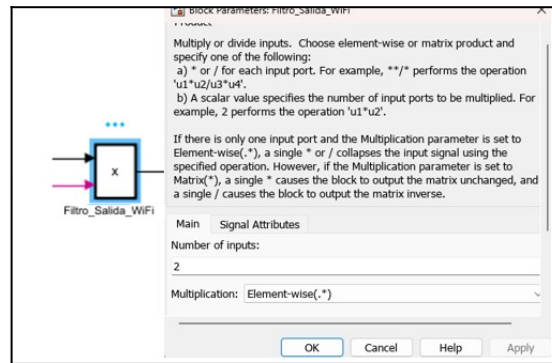


Figura 20. Filtro Salida Wi-Fi

El bloque Filtro Salida Wi-Fi realiza la misma función y finalidad que la del bloque de filtrado GPS que se acaba de definir, siendo por tanto el último punto clave de la señal de datos inalámbricos antes que llegue a la entrada del sistema de tratamiento del dron. Como se puede observar en la configuración, se trata de un bloque de producto con dos entradas, para poder gestionar el modo element-wise, lo que significa que multiplica la señal de datos Wi-Fi dañada (la que proviene del producto con la interferencia) por la señal de habilitación. Su forma de actuar es parecida a la correspondiente a una puerta de seguridad lógica: si el sistema de control decide que la conexión Wi-Fi no existe (por ejemplo, porque se ha detectado que el nivel de interferencia es insostenible o bien por una instrucción de parar) la señal de habilitación pasa a ser cero, es decir, de forma automática, lleva a la no salida del bloque, de forma que impide que el dron reciba como entrada el dato de telemetría corrupta o nula.

3.10.11. Bluetooth

La incorporación de Bluetooth en un dron simulado dentro de Simulink representa el modelado de un canal de comunicación de corto alcance, comúnmente empleado para emitir telemetría básica, una configuración de parámetros en tierra o el control de corto alcance entre el dron y el dispositivo móvil. En contraposición a Wi-Fi, el bloque emula un protocolo de menor tasa de transferencia de datos y de menor

consumo, siendo un elemento primordial para comprobar la viabilidad de la comunicación en aquellas condiciones que precisan una conexión estable, pero que sean de baja complejidad. Su incorporación al modelo permite de esa forma analizar como la limitación de ancho de banda o la proximidad física entre el usuario y el dron hacen que cada interacción entre ellos mantenga como aseveración que cualquiera de los comandos críticos debe recabarse adecuadamente dentro del rango de operación del dron.

3.10.12. Bluetooth Enable y Bluetooth Signal

Estos bloques Bluetooth Enable y Bluetooth Signal constituyen lo que es el sistema de gestión de links cortos en la arquitectura del dron. Bluetooth Enable actúa como un control que activa o desactiva el subsistema del dron para esta conexión concreta, lo que permite especificar o bien ignorar parte del sistema de comunicación. Y Bluetooth Signal es el bloque que simula el comportamiento físico de la transmisión, además de la limitación de distancia y las interferencias propias de esta forma de transmisión. En conclusión, garantizan que, mientras el dron opera dentro de exactamente el rango de proximidad, los datos se estructuran correctamente, permitiendo realizar una rápida configuración o bien control local sin depender de la infraestructura de la red más amplia del Wi-Fi como se muestra en la **Figura 21**.

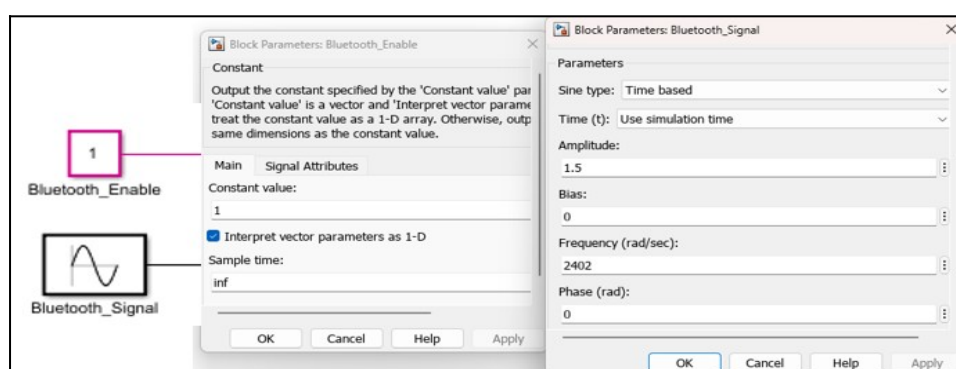


Figura 21. Bluetooth Enable y Bluetooth Signal

Aquí se ha presentado la configuración técnica del subsistema Bluetooth de la misma manera que se han presentado los módulos GPS y Wi-Fi. El bloque Bluetooth Enable es un bloque de constant con valor 1 que se comporta a modo de interruptor de control; es decir, si es 1 entonces permite que la señal sea tratada por el resto del sistema; al modificar la signal a 0 la conexión se anula lógicamente.

El bloque Bluetooth Signal es, por su parte, un generador de onda senoidal modificado con amplitud 1.5 y frecuencia de 2402 rad/s, con el fin de emular la banda de frecuencia inicial del estándar Bluetooth (2.4 GHz). Esta adición de bloques hace que el modelo permita simular la presencia/ausencia de conectividad Bluetooth de forma independiente, creando herramientas de resiliencia que permiten comprobar que el sistema de control debe ser capaz de gestionar/desplegar la gestión de la desconexión de un periférico o enlace inalámbrico a corta distancia.

3.10.13. Bluetooth Product

La unidad Bluetooth Product se elige como el núcleo de procesamiento que realiza la consolidación y el borrado de los datos de comunicación por Bluetooth; esta ofrece la recepción de las señales de corto alcance y asegura que la información sea traducida en un protocolo capaz de ser procesado por el sistema de control del dron, confirmando la integridad de la información de los paquetes transmitidos, se convierte en la capa de abstracción que permite la inclusión de los comandos de configuración y la telemetría local en el modelo de simulación, intentando incluso que, con las restricciones de ancho de banda del protocolo, la transferencia de la información hacia el controlador de vuelo no sufra errores de sincronización.

El bloque Bluetooth Product presenta una funcionalidad lógica análoga a aquella correspondiente a los bloques cuyo funcionamiento en modo multiplicador hemos

comentado ya para el caso del GPS y del Wi-Fi como se observa en la **Figura 22**. Es un multiplicador de dos entradas en modo element-wise que representa para la señal de Bluetooth la puerta de control final.

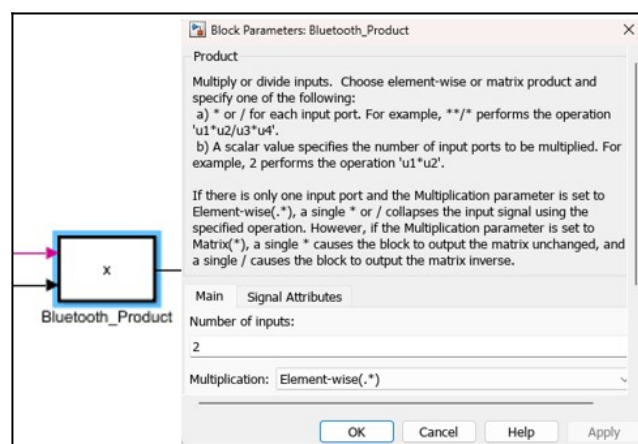


Figura 22. Bluetooth Product.

El funcionamiento es el siguiente: por un puerto recibe la señal generada en onda senoidal de Bluetooth, la cual ha sido sumamente mezclada por interferencia, y por el otro puerto recibe la señal de habilitación. Al multiplicar ambos puertos, el bloque permite que el sistema "corte" o "active" el enlace Bluetooth instantáneamente. Si la señal de habilitación es cero, el valor reportado por el bloque es cero, emulando eficazmente una interrupción total del enlace de comunicación debido a una interferencia externa o a una decisión lógica del software de control del dron.

3.10.14. Interferencia Bluetooth

La interferencia de la tecnología Bluetooth en la simulación de un dron es el modelado de una serie de perturbaciones que aparecen en los espectros de alta densidad, donde la proximidad a los equipos inalámbricos o a una pared modifican la calidad del enlace. En Simulink, esta interferencia se llega a modelar mediante la introducción de unas degradaciones específicas como puede ser el fading de la señal por un obstáculo, el ruido térmico del entorno o la saturación del canal que lleva al sistema a tener que

gestionar una tasa de errores superior o una disminución de la velocidad para la transmisión.

La **Figura 23** permite observar el bloque de Interferencia Bluetooth. El bloque de interferencia Bluetooth tiene la misma lógica de configuración que el bloque de interferencia GPS y el de interferencia Wi-Fi que se han abordado a lo largo del capítulo.

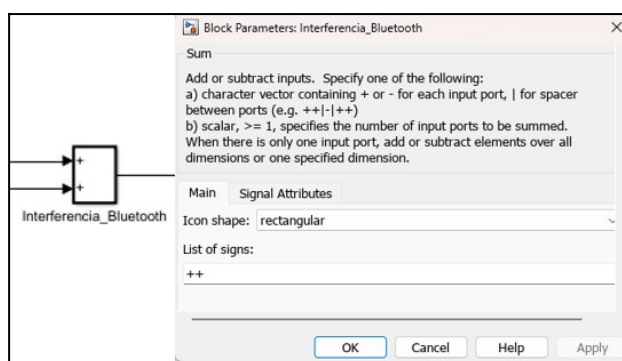


Figura 23. Interferencia Bluetooth

El principio es el mismo, se trata de un bloque “sum” con la lista de signos configurada como ++, por tanto, el bloque tiene la finalidad de sumar las dos señales de entrada mediante el método de la aritmética directa. El bloque de interferencia de Bluetooth toma la señal Bluetooth original (la onda senoidal que transporta la comunicación) y la suma con la señal de ruido o interferencia proveniente de los sistemas de jamming programados.

Como resultado de la suma de ambas señales, el resultado es una señal que transporta la conexión Bluetooth degradada, lo que permite que el sistema de control del dron evalúe la llegada de señal como buena o mala y, sobre la base de una u otra, decida si la conexión con los periféricos puede mantenerse o si la interferencia debe considerarse como una causa de pérdida de las conexiones Bluetooth.

3.10.15. Filtro Salida Bluetooth

El filtro se encarga de limpiar y estabilizar la señal de los datos que se recibe en el enlace Bluetooth, antes de que esta misma señal sea procesada por el controlador del dron. Esto es especialmente relevante, pues las conexiones Bluetooth son muy vulnerables a las alteraciones provocadas por interferencias en la banda de 2.4 GHz, y por ello el determinado filtro utiliza algoritmos de suavizado o bien algoritmos de corrección de errores, para eliminar picos de ruido, paquetes fallidos o retardos inestables se presenta en la **Figura 24**.

El uso de tal elemento es fundamental para garantizar que la telemetría recibida o cualquier cambio de configuración que deba ser enviado a través de dispositivos externos para el control del dron no tenga errores que repercutan negativamente en la estabilidad del vuelo, permitiendo así que la señal circule hasta el sistema de control, de un modo limpio, predecible y de confianza.

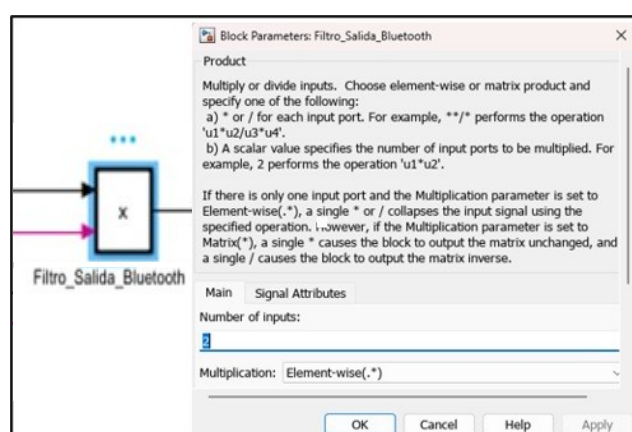


Figura 24. Filtro Salida Bluetooth

Es un bloque multiplicador (de dos entradas, configurado en modo element-wise) cuya funcionalidad lógica es muy sencilla: recibe por un puerto la señal de Bluetooth previamente procesada (que se ha mezclado con la interferencia en el bloque de suma) y por el otro puerto recibe la señal habilitante. Al multiplicar ambas señales el

bloque Filtro Salida Bluetooth se comporta como una puerta lógica: si la señal habilitante es igual a 1 entonces la señal Bluetooth que ha sido procesada pasa hacia el resto del sistema, en contraposición si la habilitación se encuentra en 0 entonces la salida quedará completamente anulada.

Es un bloque esencial para la integridad del sistema, garantiza que la información telemétrica de Bluetooth no sea transmitida al controlador del dron en caso de que se considere la comunicación entre dicho controlador y el módulo de Bluetooth desconectada o, incluso altamente perturbada por interferencias externas, de forma que el modelo pueda así reaccionar de una forma coherente ante las condiciones del entorno de simulación que están cambiando constantemente.

3.10.16. LoRa

Incorporar LoRa (Long range) a la simulación 3D del dron constituye el modelado de un enlace de comunicación a larga distancia y de bajo consumo de energía, orientado a operar en algunas condiciones en las cuales otras tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth se quedarían cortas. En el entorno de Simulink, se simula la transmisión de datos a larga distancia e incluso con obstáculos intermedios, dando prioridad a la correcta comunicación de mensajes críticos de telemetría y comandos de emergencia, en detrimento de la rapidez de transmisión de datos.

Esta tecnología, es de gran importancia para coberturas largas puede extender las capacidades del dron para garantizar que siempre dispondremos de un enlace de comunicación con la estación de control, aunque se encuentre a varios kilómetros de distancia, asegurando de esta forma la seguridad del sistema a partir de los constantes valores de estado operativo de que disponemos.

3.10.17. LoRa Enable y LoRa Signal

Los bloques denominados LoRa Enable y LoRa Signal, tal y como se muestra en la **Figura 25**, son los elementos que componen la infraestructura de control de los enlaces de comunicación de largo alcance en la simulación del modelo. El bloque LoRa Signal junto a su correspondiente LoRa Enable, continua su propia lógica, que ha sido la misma para los demás sistemas de comunicación del dron, de diseño modular.

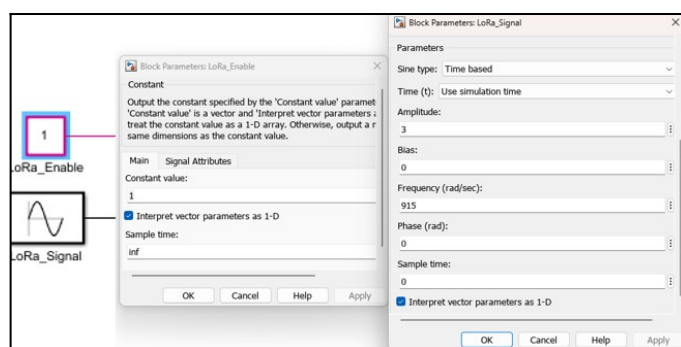


Figura 25. LoRa Enable y LoRa Signal.

El bloque LoRa Enable está definido como constante igual a 1, permitiendo el paso de la señal, y el bloque LoRa Signal genera con intención una onda senoidal que se ha diseñado para representar esta tecnología cumpliendo en la amplitud de 3 (la más alta de las señales y que podría reflejar mayor fuerza o robustez) con una frecuencia de 915 rad/s, en sintonía con las frecuencias de operación por debajo de los gigahercios para el protocolo de largo alcance.

3.10.18. LoRa Product

El bloque de LoRa Product proveedor de servicios de comunicación de largo alcance es, en definitiva, aquella unidad de procesado, que genera, concatena y gestiona la comunicación de largo alcance de la arquitectura del dron, tal y como se puede observar en la **Figura 26**.

El componente en términos generales recibe los paquetes de datos de telemetría o comandos de vuelo, y los transforma para poder ser enviados mediante protocolos de baja tasa de bits, asegurando, que, aunque la información es limitada, ésta se transmite con alta robustez y potencia de penetración. En definitiva, actuando como un núcleo de empaquetado y de modulación.

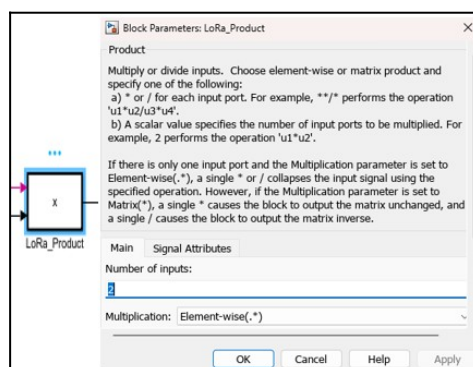


Figura 26. LoRa Product

Desarrollándose como un multiplicador de dos entradas en forma element-wise, el bloque realiza la siguiente operación: coge la señal de LoRa que ya ha sido mezclada con las fuentes de interferencias posibles a través de un bloque de suma anterior y la multiplica con la señal de habilitación (LoRa Enable). De tal manera se da poder al sistema para gestionar de forma dinámica la disponibilidad del enlace: si la señal de habilitación es 1, la información de LoRa va tal cual al resto del modelo; en caso de que sea 0, la salida del bloque es nula, "apagando" la comunicación de hecho. Esta estructura modular es también clave para realizar las pruebas de resiliencia y dispone una evaluación en tiempo real de cómo el dron gestiona la pérdida crítica de su enlace.

3.10.19. Interferencia LoRa

La Interferencia LoRa en la simulación se evidencia en la forma en cómo se modelan las interferencias del canal de radiofrecuencia de largo alcance, donde la señal se puede ver alterada por el ruido de fondo, por el estado atmosférico, o por la saturación

del espacio espectral en bandas de bajo frecuencia (433 MHz o 915 MHz), como se observa en la **Figura 27**. En contraste con otras tecnologías, el modelo de interferencia de LoRa se sitúa en el contexto de cómo la muy baja razón señal-ruido (SNR) y el Spreading Factor impactan directamente en la probabilidad de recepción exitosa de un paquete en distancias muy largas.

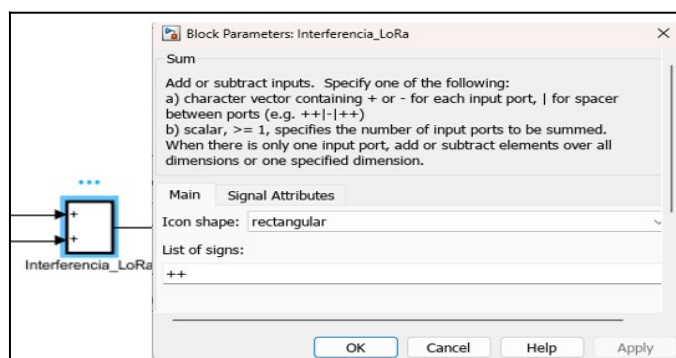


Figura 27. Interferencia LoRa.

En la construcción del bloque Interferencia LoRa se ha utilizado un sumador matemático con dos entradas que opera bajo la lógica ++. La misión del bloque Interferencia LoRa consiste en integrar el ruido electromagnético de los sistemas de jamming en la señal de comunicación LoRa, de manera que, tras la suma, el bloque se convierte en un generador de una señal de telemetría corrupta en la que los datos han sido mezclados con el ruido electromagnético para poder emular el efecto del entorno hostil sobre el protocolo LoRa.

Es un punto de encuentro en el que la información útil se contamina para verificar en qué condiciones de SNR el sistema de comunicación de un dron puede mantener la integridad de la información o donde la relación entre la señal y el ruido cae por debajo de las condiciones operativas.

3.10.20. Filtro Salida LoRa

El bloque Filtro Salida de LoRa es el que se encarga de realizar el tratamiento de la señal de radiofrecuencia obtenida para que la información, aunque la tasa de bits sea muy baja y todas las condiciones sean adversas, sea correcta y pueda ser utilizada por los controladores de vuelo, tal como se observa en la **Figura 28**.

Debido a la muy baja velocidad de transmisión de LoRa, el bloque Filtro Salida hace algo más que eliminar el ruido térmico y las interacciones que se puedan producir en la muy estrecha banda, sino que además se aplica el procesamiento de los datos y la corrección de errores (FEC - Forward Error Correction) para corregir la pérdida de paquetes en el largo trayecto.

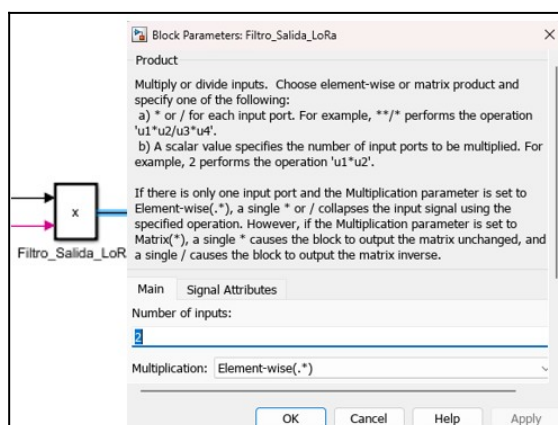


Figura 28. Filtro Salida LoRa.

El llamado bloque Filtro Salida LoRa tiene la función técnica de limitar el ancho de banda de la señal modulada para ser transmitida al canal y cumplir con las normativas de espectro.

Por su parte, el bloque Filtro Salida LoRa se comporta como un interruptor de seguridad y eso es porque se desconecta todo el canal de telemetría, totalmente, cuando a LoRa, o a la exitosa condición de la señal, se le llega a considerar inestable, o cuando el controlador de sistemas decide intrínsecamente cortar el enlace a propósito, para

evitar que el control de vuelos intente sacar información corrupta o nula durante toda la misión.

3.10.21. Código general de la integración de bloques

La conectividad de un dron bajo Simulink basado en una arquitectura modular que integra la mayoría de las tecnologías Wi-Fi, Bluetooth y LoRa es capaz de gestionar de una forma jerárquica diferentes frecuencias y amplitudes de cada protocolo para poder vigilar que la conectividad se ajusta a los requerimientos de la misión. Tal es el caso que el Wi-Fi se encarga de gestionar grandes volúmenes de datos a altas frecuencias, mientras que el Bluetooth se utilizará en condición de proximidad y LoRa en largas distancias a baja velocidad, todo esto se ha tenido que plantear de tal forma que el sistema debe comportarse como un árbitro que coordina estas señales filtradas. El diseño proporciona la base para que el controlador de vuelo llegue a tener información coherente y para que directamente se elija el canal más estable a la vez que el dron mantenga la operatividad mediante transiciones fluidas entre los protocolos en función de la distancia y la calidad de la señal disponible.

La **Figura 29**, muestra el tramo del código MATLAB que tiene como finalidad la creación dinámica de los cuatro sistemas de comunicación del dron dentro de Simulink, aplicando los correspondientes parámetros físicos simulados a cada uno.

```
crearBloqueSenal(modelo_nuevo, 'GPS', x, 60, '1', '1500', '1');  
crearBloqueSenal(modelo_nuevo, 'WiFi', x, 180, '2', '2400', '1');  
crearBloqueSenal(modelo_nuevo, 'Bluetooth', x, 300, '1.5', '2402', '1');  
crearBloqueSenal(modelo_nuevo, 'LoRa', x, 420, '3', '915', '1');
```

Figura 29. Código integración de tecnologías

El código genera la señal GPS definida con una amplitud base de 1 y una frecuencia de 1500 (es decir, la expresión matemática de la banda de satélite L1 de 1.5

GHz) que resulta imprescindible para conseguir su ubicación espacial. Después se integra la señal Wi-Fi con una amplitud de 2 y frecuencia de 2400 (la típica banda de 2.4 GHz) que simula el enlace de telemetría o de transmisión de vídeo por defecto.

A continuación, se reproduce el enlace Bluetooth, que se construye de acuerdo con una amplitud de 1.5 y una frecuencia de 2402 (el canal de inicio que se encuentra exactamente al principio del espectro de 2.4 GHz) que es útil para interconectar periféricos a corta distancia. Por último, se implementa la tecnología LoRa con la amplitud de transmisión más intensa (3) y una frecuencia de 915 (banda de 915 MHz) que refleja su capacidad de larga distancia y su resistencia a las interferencias.

3.10.22. Integración del panel de visualización de las tecnologías integradas

En términos generales, el módulo positivo en el que a partir de la información que fluye entre los módulos de Wi-Fi, Bluetooth y LoRa se reúne en un único módulo que muestra una imagen consolidada del estado de un vínculo en una forma y a un tiempo partes a partir de la forma unificada, la información recibida o la emisión y la relación con el estado en tiempos de la emisión del enlace por los módulos de comunicación, la siglas de intensidad RSSI, SNR y otros datos relativos a los diferentes filtros que perciben la señal.

3.10.23. Monitor de tecnologías

El Monitor de tecnologías como se muestra en la **Figura 30**, actúa como el supervisor central y sistema de decisión de la arquitectura de comunicación del dron, cuya principal función es evaluar continuamente la disponibilidad y calidad de los enlaces, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa de forma constante y, para ello, explora las señales procesadas por los filtros de salida correspondientes a determinar el protocolo que da la mejor conectividad en ese momento.

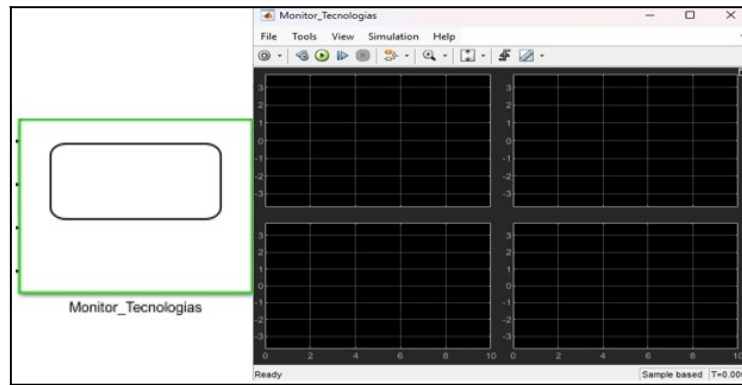


Figura 30. Monitor de tecnologías

El código que se muestra en la **Figura 31** lleva a cabo las cuatro tecnologías integradas necesarias para que todas ellas puedan observarse al mismo tiempo en un panel de monitoreo (scope). El bloque monitor de tecnologías es un subsistema de visualización hecho para ser una interfaz de supervisión centralizada de Simulink, capaz de recibir las cuatro señales de comunicación que se han configurado: GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, tras haber pasado por sus correspondientes etapas de procesamiento y filtrado.

```
add_block('simulink/Sinks/Scope', [modelo_nuevo '/Monitor_Tecnologias'], 'Position',[x+420 220 x+580 340]);
set_param([modelo_nuevo '/Monitor_Tecnologias'], 'NumInputPorts','4');
set_param([modelo_nuevo '/Monitor_Tecnologias'], 'SampleTime','0.015');

senales = {'GPS', 'WiFi', 'Bluetooth', 'LoRa'};
y_pos = [60, 180, 300, 420];

for i = 1:4
    nombre_senal = senales{i};
    bloque_suma = ['Interferencia_' nombre_senal];
    bloque_filtro = ['Filtro_Salida_' nombre_senal];

    add_block('simulink/Math Operations/Add', [modelo_nuevo '/' bloque_suma], 'Inputs', '++', 'Position', [x+200 y_pos(i) x+300 y_pos(i)]);
    add_block('simulink/Math Operations/Product', [modelo_nuevo '/' bloque_filtro], 'Inputs', '2', 'Position', [x+300 y_pos(i) x+400 y_pos(i)]);
end
```

Figura 31. Código integración de monitor de visualización.

Dentro del bloque, del tipo scope, hay cuatro ejes o paneles independientes que permiten que con la ejecución de la simulación se pueda visualizar qué información presenta la integridad y el estado de cada enlace al mismo tiempo; esto permite comparar la activación de los sistemas de interferencia (jammers) en cada una de las tecnologías y ver así, de forma visual, cuál de ellas se degrada o cuál se mantiene estable cuando se

cambia el estado de los bloques de habilitación correspondientes. Se trata de una herramienta de diagnóstico, dada la posibilidad de validar el comportamiento dinámico del dron, así como la respuesta de su sistema de control frente a la pérdida o recuperación de la conectividad en cada canal.

3.11. Integración de inhibidores de señales (jammers) en el diseño

Se llegó a integrar jammers o inhibidores de señal en el sistema constituyendo una mejor seguridad en los diversos enlaces de comunicación. Siendo así de esta manera, que estos bloques obtenidos de librerías sean una fuente que trabaje como un aspecto de entorno común.

3.11.1. Jammer de ruido blanco

El bloque jammer de ruido blanco tiene como objetivo simular una potencial amenaza de guerra electrónica, a fin de degradar o interrumpir la comunicación del dron tras inyectar señales de alta potencia en las bandas operativas (son capaces de provocar interferencias en aquellas bandas frecuenciales ubicadas entre 2.400 MHz, 2.402 y 2.480 MHz en la versión 2.4 del estándar Wi-Fi o Bluetooth o GFSK en LoRa que es la versión baja.). El dispositivo es capaz de generar una señal aleatoria de ancho de banda, con amplitud y densidad espectral capaces de sobreponerse a las señales legítimas, lo que provoca el aumento del ruido de fondo (piso de ruido) y la reducción de la relación señal-ruido del enlace (SNR).

3.11.2 Jammer Blanco Enable y Jammer Blanco Signal

Los bloques Jammer Blanco Enable y Jammer Blanco Signal (**Figura 32**) representan el bloque de activación y la fuente de perturbación del sistema de guerra en la simulación.

Ambos permiten validar que el dron reacciona rápidamente ante una interrupción repentina, y que el sistema mantiene cierto nivel de estabilidad operativa o bien que inicia una secuencia de emergencia antes de perder por completo la conexión.

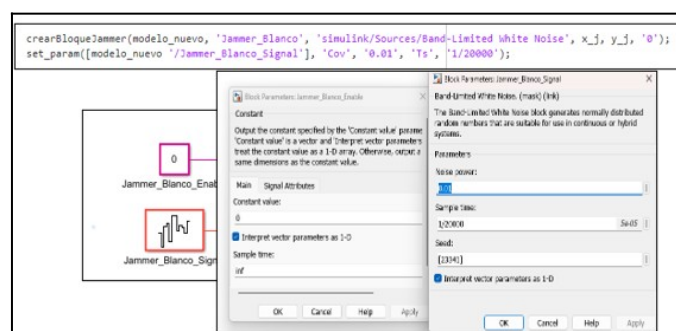


Figura 32. Jammer Blanco Enable y Jammer Blanco Signal.

En esta propuesta se desarrolló la lógica de la funcionalidad automatizada conocida como Jammer Blanco Enable - generador de ruido blanco y Jammer Blanco Signal - señal perturbadora de ruido blanco; empleado para realizar la interferencia de ruido blanco en la simulación. Esta se implementa mediante una propuesta establecida que genera programáticamente un bloque de constante que controla cuándo se activa, un bloque de ruido blanco limitado en banda que emula la señal de perturbación y un bloque producto que permite multiplicar ambas señales.

3.11.3. Jammer Blanco product y ZOH Blanco

Los bloques Jammer Blanco Product y ZOH Blanco (Zero-Order Hold) mostrados en la **Figura 33** se combinan para transformar una señal de ruido teórico, en el sentido que dicha señal ya no es una señal teórica, sino que se convierte en una perturbación que ya tenemos y que sólo nos falta procesar dentro del entorno de simulación que es Simulink.

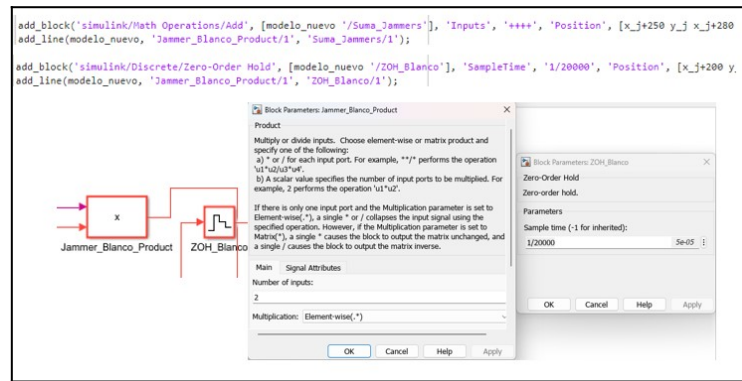


Figura 33. Jammer Blanco Product y ZOH Blanco

El bloque "Jammer Blanco Product" se configura como una puerta lógica, donde al multiplicar la señal de ruido por su habilitación, permitimos habilitar o deshabilitar la interferencia de forma dinámica. Por su parte el bloque ZOH Blanco (zero-order hold) realiza un proceso de muestreo-retención sobre la señal calculada.

3.11.4. Jammer de banda limitada

En su forma más general, el jammer de banda limitada es una herramienta de simulación que simula ataques de interferencia selectivos y dirigidos contra los sistemas de comunicaciones de un dron. A diferencia del ruido blanco (que será el exhaustivo análisis de todo el espectro, es decir, ruido blanco), el dispositivo se lleva la energía sólo a las frecuencias que maneja el dron (es decir, los puntos de acceso de serie Wi-Fi, tecnologías Bluetooth, etc.), obteniendo así un bloqueo mucho más eficiente y "quirúrgico".

En el diseño del sistema su función es testar la inteligencia del sistema de comunicaciones, es decir, testar si el dron es capaz de conocer que un canal concreto ha sido "anulado" por el ataque y si tiene la capacidad de reaccionar y actuar ante dicha pérdida de información, ya fuese saltando a una frecuencia libre, cambiando a una tecnología backup más robusta o activando protocolos de seguridad ante la pérdida de señal dirigida. En suma, es un escenario de amenaza más realista y técnico, el objetivo

del enemigo no es simplemente el ruido sino inutilizar los enlaces de mando y control del propio vehículo aéreo.

3.11.5. Jammer Banda Enable y Jammer Banda Signal

Los bloques de “Jammer Banda Enable y Jammer Banda Signal” como se muestra en la **Figura 34**, son el sistema que ejecuta las señales de ataque de interferencia selectiva que hemos visto en la simulación.

A su vez, estos bloques permiten comprobar la agilidad del sistema del dron, dado un canal de banda escasa, el controlador debe ser capaz de detectar la degradación en una banda determinada y poder saltarse el canal o conmutar la tecnología muy rápidamente antes de que se produzca la desconexión de la comunicación.

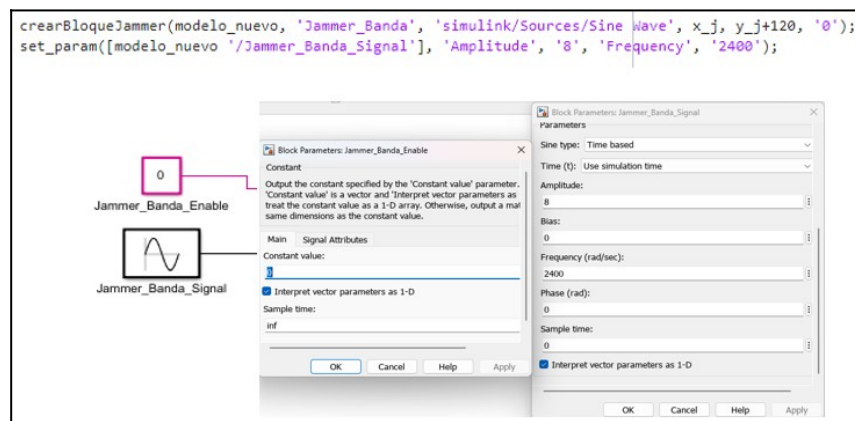


Figura 34. Jammer Banda Enable y Jammer Banda Signal

Los componentes “Jammer Banda Enable y Jammer Banda Signal” constituyen una función automatizada que emula una interferencia de Banda Estrecha en la parte del modelo en cuestión. El bloque de habilitación se comporta como una compuerta lógica controlada por una constante que activa o desactiva la interferencia; y el bloque de señal es capaz de generar una onda senoidal con frecuencia y amplitud definidas con la intención de simular un jamming, que tiene como objetivo aturdir las bandas utilizadas en radiofrecuencia, saturándolas. La señal generada pasa por un bloque de retención de

cero órdenes para su correcta discretización quedando finalmente integrada en el sistema de suma de interferencias, permitiendo evaluar la capacidad del dron para mantener la estabilidad de sus comunicaciones frente a interferencias electromagnéticas selectivas y de potencia considerable.

3.11.6. Jammer Banda Product y ZOH Banda

Los bloques Jammer Banda Product y ZOH Banda, como se muestra en la **Figura 35**, es decir, que aplican interferencia de forma controlada y compatible con la simulación en tiempo discreto, al sistema de comunicación en el dron.

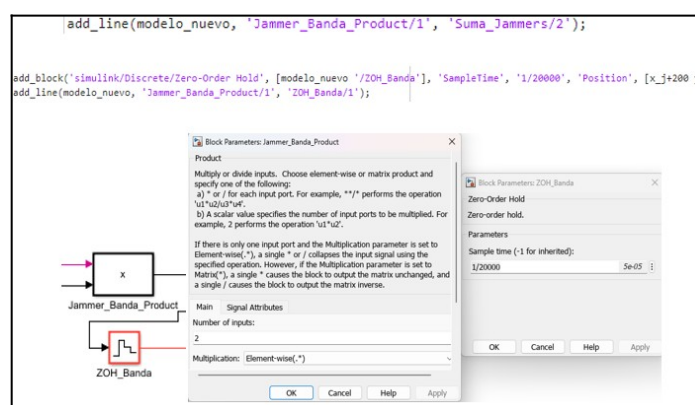


Figura 35. Jammer Banda Product y ZOH Banda

De manera conjunta, estos bloques dados por librerías nos permitieron implementar y ejecutar fuerza selectiva. De tal manera mientras se proporciona el proceso digital con la ayuda de ZOH Banda, el jammer solidifica la severidad del ataque que se va a ejecutar.

3.11.7. Jammer de ruido gaussiano

La representación introducida es la más exacta que se puede llegar a obtener para caracterizar la degradación por canal natural o intencionada. Esto es distinto al ruido blanco porque el modelo permite utilizar distribuciones de tipo gaussiana (o normal) para el ruido inducido.

3.11.8. Jammer Gauss Enable y Jammer Gauss Signal

Los bloques “Jammer Gauss Enable y Jammer Gauss Signal” son los que gestionan el control y la generación de la interferencia por ruido gaussiano que se encuentra implementado en la simulación. El primero de estos bloques actúa como un interruptor lógico que activa la alteración propuesta un cumplimiento de ciertas condiciones de misión y que permite analizar el comportamiento del dron en escenarios de ruido controlado estadísticamente. Mediante la combinación de estos bloques, es posible evaluar cómo el dron es capaz de gestionar las degradaciones de la relación señal-ruido y comprobar si los algoritmos de filtrado y los protocolos de comunicación tienen la robustez determinante para estabilizar un enlace de control antes de llegar hasta un punto óptimo de fallo como puede observarse en la **Figura 36**.

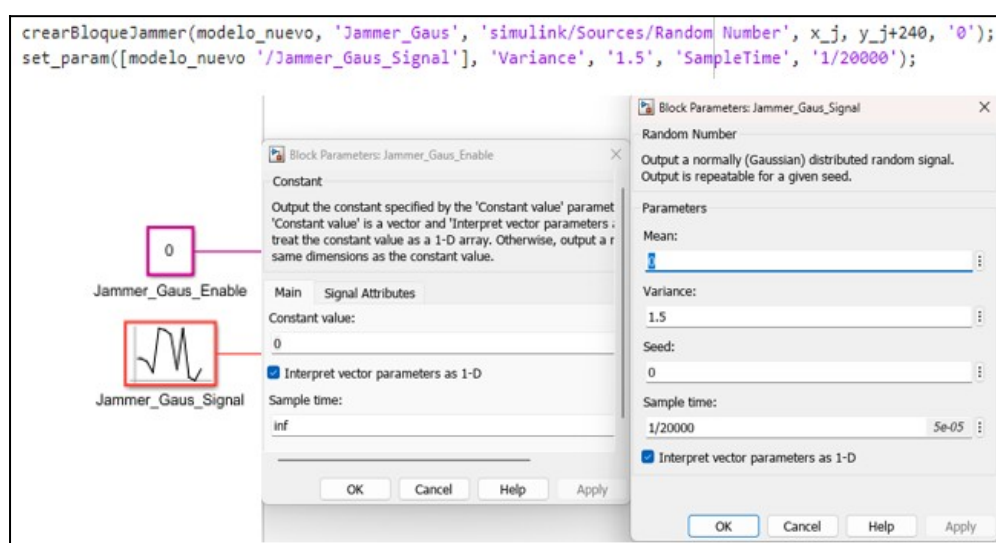


Figura 36. Jammer Gauss Enable y Jammer Gauss Signal

Estos componentes ya mencionados son una parte necesaria y fundamental en el diagrama general de esta simulación debido a que es usado en diversas ocasiones como esta para generar ruido con una distribución normal y esta pueda ser generada correctamente.

3.11.9. Jammer Gauss Product y ZOH Gaus

El entendimiento de los sistemas de interferencia electromagnética en el marco de lo que se denomina la arquitectura Jammer Gauss Product se basa en la utilización de modelos gaussianos para la caracterización de la señal de interferencia, tal como se puede ver en la **Figura 37**. Esto permite una buena caracterización de la densidad espectral de potencia del ruido que se genera y permite un estudio del rendimiento de la degradación de enlaces de comunicación.

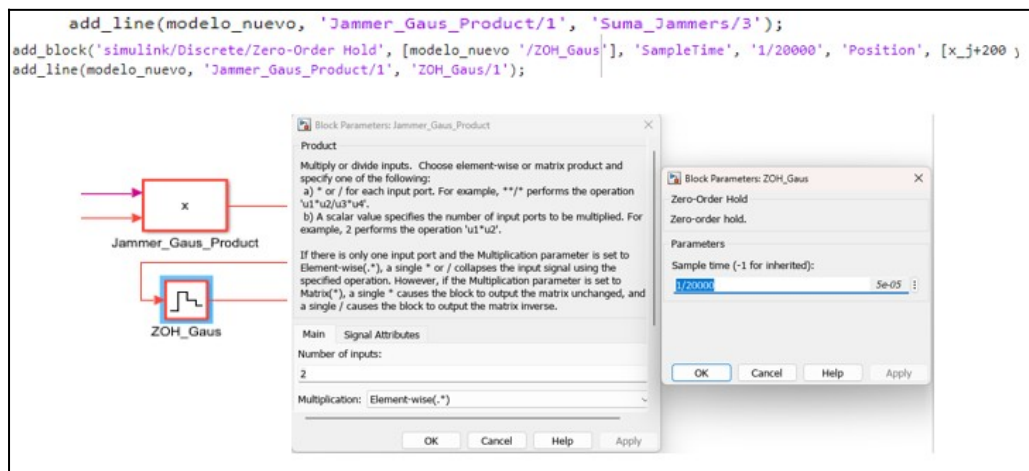


Figura 37. Jammer Gauss Product y ZOH Gaus

El bloque fabricante del Jammer Gauss Product y el bloque ZOH Gauss (Zero-Order Hold) juntos conforman la fase final para la preparación de la señal de interferencia gaussiana para su integración en el modelo.

El bloque Jammer Gauss Product actúa como una puerta lógica de multiplicación y asocia la señal de ruido gaussiano con su habilitador (enable) para permitir o negar el ataque de interferencia. Por su parte, el bloque ZOH Gauss realiza la discretización del tiempo por medio de un tiempo de muestreo fijo de 1/20000 segundos; una forma de asegurarse que el ruido gaussiano mantiene la coherencia de tiempo que el modelo exige al motor de simulación digital del dron, así como la manera de inyectar la perturbación

en el modelo para el análisis de la robustez de los enlaces bajo del tipo de ruido estadístico.

3.11.10. Jammer de ruido impulsivo

El jammer de ruido impulsivo constituye un procedimiento de interferencia, cuyo objetivo final es deteriorar los sistemas de comunicación como consecuencia de la emisión de ráfagas cortas, de alta potencia y de un periodo de duración muy limitado. Desde las características de los modelos que únicamente describen el ruido gaussiano, el jammer de ruido impulsivo se basa en una emisión del tipo esporádica, no continua, lo que permite mejorar la potencia del impacto en el receptor a partir de los periodos de silencio en la señal original o inducir errores de ráfaga en el proceso de decodificación.

El tipo de interrupción se caracteriza precisamente por el hecho de que puede permitir superar el umbral de detección en el receptor, como consecuencia de los momentos de actividad del jammer y por la posibilidad de provocar un gran deterioro en la tasa de error de bit cuando la unidad emisible activa no tiene una emisión constante de potencia extrema.

3.11.11. Jammer Imp Enable y Jammer Imp Signal

La integración de los parámetros “Jammer Imp Enable y Jammer Imp Signal” constituye el núcleo funcional para el despliegue dinámico de la interferencia por ruido impulsivo en entornos de simulación y operación de sistemas electrónicos.

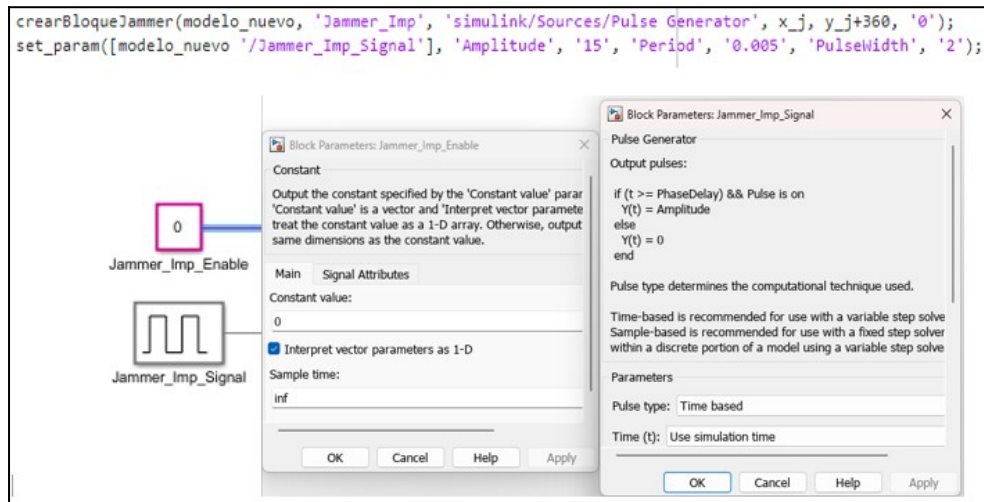


Figura 38. Jammer Imp Enable y Jammer Imp Signal

A diferencia de las señales de ruido continuo, esta interferencia pretende simular ataques tácticos de corta duración, como señales de pulso o de interferencia intermitente, cuya finalidad es afectar la recepción de los receptores del dron en momentos concretos de la misión. Esta señal tiene como objetivo ser procesada y superpuesta con la del sistema global, por lo que se convierte en una herramienta imprescindible para estudiar la respuesta del dron cuando se enfrenta a ataques de pulso que tienen como fin el llenar rápidamente el enlace de datos, prescindiendo de la transmisión incesante.

3.11.12. Jammer Imp Product y ZOH Imp

El despliegue técnico del “Jammer Imp Product y el bloque ZOH Imp” constituye la arquitectura fundamental para la síntesis y aplicación de interferencia impulsiva en entornos de comunicación digital.

El periodo de reconstrucción es muy importante porque el impacto que deja el pulso es el que percibe el receptor, las discontinuidades típicas de la señal impulsiva se preservan en la reconversión digital-analógica y la simulación de interferencia sobre los sistemas de sincronización y los decodificadores de canal se facilita.

La **figura 39**, muestra una estructura de bloques en un entorno de simulación como Simulink donde se establece el comportamiento de dos bloques.

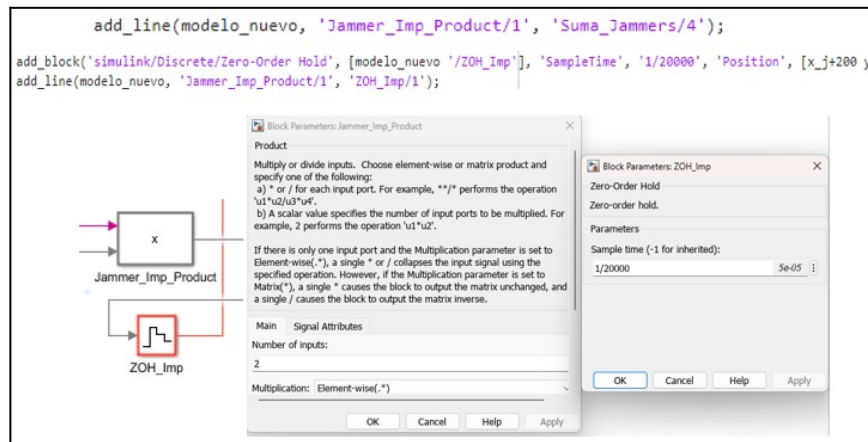


Figura 39. Jammer Imp Product y ZOH Imp.

El bloque llamado Jammer Imp Product está configurado para multiplicar con una multiplicación por elemento sus dos puertos de entrada, quiere decir que procesa las señales de forma directa y paralela.

Por otro lado, el bloque ZOH Imp, que es el correspondiente a un retentor de orden cero (Zero-Order Hold), se le asigna un tiempo de muestreo de 1/20000s, equivalente a 5e-05s, y se encarga de discretizar la señal de entrada manteniendo el valor constante en cada tiempo de muestreo hasta el tiempo siguiente.

3.11.13. Integración del panel de visualización de los inhibidores de señales

La integración del panel de visualización de los inhibidores de señales (jammers) resulta ser el interfaz de control y de monitorización fundamental para la operatividad y el análisis de la operación, de los sistemas de contramedidas electrónicas. De esta manera, podemos concentrar en el módulo un buen rendimiento gráfico ofreciendo una representación global de los elementos más importantes para conseguir ese objetivo, que son la potencia de emisión, la banda de frecuencia operativa, los ciclos de trabajo

de las señales impulsivas y las estadísticas sobre el éxito de la degradación de las comunicaciones del objetivo. Como representación del conjunto de esta información visual se facilita la toma de decisiones, de forma que los operadores puedan modificar la configuración de los jammers en relación con la respuesta de la propia interferencia o la detección de contramedidas por parte del sistema interferido, logrando un control preciso de la perturbación electromagnética y una visión clara de la degradación del enlace a datos.

3.11.14. Monitor jammers

El elemento monitor jammers actúa como el bloque central de diagnóstico y supervisión de la estructura del sistema de inhibición, encargado de la obtención, tratamiento y reporte en tiempo real de métricas sobre el comportamiento de los jammers desplegados.

El siguiente bloque como se ilustra en la **Figura 40**, muestra específicamente el panel donde se visualizarán cada uno de los inhibidores de señal con un color y su nomenclatura.



Figura 40. Monitor jammers

En la parte inferior están los parámetros operacionales que el ancho de banda de resolución (RBW) de aproximadamente 19.5 Hz e intervalo de actualización de muestras indican que se está llevando a cabo un seguimiento exhaustivo del espectro con muy buena resolución, aunque el sistema actualmente se encuentra en estado "Stopped" (detenido).

3.12. Diseño del control de funciones

3.12.1. Código y diseño

El diseño mostrado corresponde a la interfaz gráfica de usuario el cual ha sido concebido como un panel de control centralizado para el control y la monitorización de sistemas de radiofrecuencia para drones. Dicha interfaz gráfica de usuario se estructura coherentemente y de forma intuitiva empleando indicadores visuales de estado por medio luces de señalización a fin de garantizar una rápida identificación del estado de

funcionamiento de los diversos protocolos de comunicación, como GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, de una serie de contramedidas electrónicas de tipo jammers.

Lógicamente, el sistema no solamente permite monitorear, sino que también permite que el operador interactúa a través de botones de acción directa que permiten actuar sobre el prototipo del dron en un espacio tridimensional, pero también acceder a módulos de análisis de datos, lo que conlleva que sea asimismo una solución que permite supervisar los estados de monitorización y la interacción operativa en tiempo real.

El citado código mostrado de forma original como se muestra en la **Figura 41** es capaz de inicializar una ventana de control llamada "CONTROL DRON 3D & JAMMERS" después de haber definido claramente sus dimensiones y su posición, a la vez que enlaza la interfaz a la función control teclado para permitir así la interacción operativa por medio de acciones del teclado.

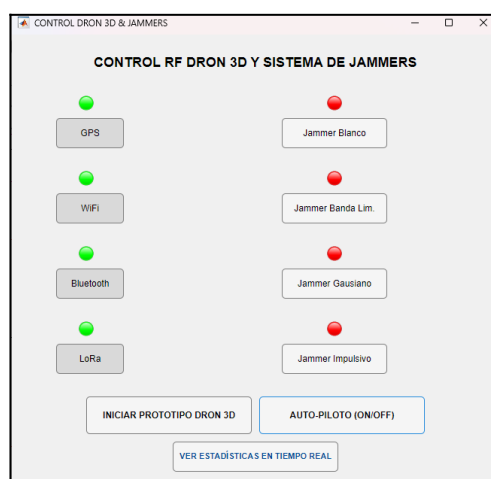


Figura 41. Diseño del control de funciones

Posterior a aquello, se emplea la siguiente codificación presentada en la **Figura 42**, es de la que se encarga de la creación y configuración estética del título principal dentro de la interfaz gráfica. El proceso inicia con la generación de un objeto de etiqueta de usuario mediante `ui-label(fig)`, al cual se le asigna el texto "CONTROL RF DRON

3D Y SISTEMA DE JAMMERS". Posteriormente, el diseño se personaliza estableciendo un tamaño de fuente de 18 puntos, aplicando un estilo de negrita y definiendo una posición y dimensiones específicas dentro de la ventana mediante las coordenadas [110 550 450 30].

```
%% CONTROL PRINCIPAL (INTERFAZ)
%% =====
fig = uifigure('Name','CONTROL DRON 3D & JAMMERS', 'Position',[100 100 650 600]);
fig.KeyPressFcn = @controlTeclado;
```

Figura 42. Interfaz principal

Siguiendo la estructura el código presentado en la **Figura 43**, configura la columna izquierda de la interfaz, la cual será la encargada de controlar y monitorizar las señales del dron a través de indicadores visuales y botones de estado. Para cada protocolo de red de comunicación (GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa) el sistema instala un componente uilamp que actuará de testigo visual del estado operativo iniciándolo en color verde. Por otro lado, se crean botones de estado (uibutton con propiedad 'state') que permitirán al usuario sustituir entre activar o desactivar cada señal, estableciendo la interacción a través de la propiedad ValueChangedFcn con la función cambiarEstado que actualizará tanto el estado de indicador como el parámetro de habilitación correspondiente (como 'GPS Enable' o 'Wi-Fi Enable').

```
%% TITULO
%% =====
titulo = uilabel(fig);
titulo.Text = 'CONTROL RF DRON 3D Y SISTEMA DE JAMMERS';
titulo.FontSize = 18;
titulo.FontWeight = 'bold';
titulo.Position = [110 550 450 30];
```

Figura 43. Título control

Asimismo, el código que aparece a la derecha en la **Figura 44**, constituye la parte de la interfaz destinada al control y supervisión del sistema de inhibidores

(jammers). Para cada uno de los tipos de inhibidores (blanco, banda limitada, gaussiano e impulsivo) se instala un componente uilamp, que visualmente sirve como testigo del estado, preconfigurado a color rojo. Así mismo se crean botones de estado (uibutton), que permiten al usuario activar/desactivar cada inhibidor, vinculando esta acción mediante ValueChangedFcn con la función cambiar estado, que modifica el indicador luminoso y el parámetro de habilitación correspondiente como por ejemplo 'Jammer Blanco Enable', 'Jammer Banda Enable', 'Jammer Gauss Enable' o 'Jammer Imp Enable'.

```
%% COLUMNA IZQUIERDA: SEÑALES DEL DRON
%% =====
gpsLamp = uilamp(fig, 'Position', [90 500 20 20], 'Color', 'green');
gpsBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'GPS', 'Value', true, 'Position', [60 450 90 40]);
gpsBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, gpsLamp, 'GPS_Enable');

wifiLamp = uilamp(fig, 'Position', [90 400 20 20], 'Color', 'green');
wifiBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'WiFi', 'Value', true, 'Position', [60 350 90 40]);
wifiBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, wifiLamp, 'WiFi_Enable');

btLamp = uilamp(fig, 'Position', [90 300 20 20], 'Color', 'green');
btBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'Bluetooth', 'Value', true, 'Position', [60 250 90 40]);
btBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, btLamp, 'Bluetooth_Enable');

loraLamp = uilamp(fig, 'Position', [90 200 20 20], 'Color', 'green');
loraBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'LoRa', 'Value', true, 'Position', [60 150 90 40]);
loraBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, loraLamp, 'LoRa_Enable');
```

Figura 44. Columna izquierda diseño

El código que se encuentra ilustrado en la **Figura 45**, ilustra cómo se definen los botones de acción de la interfaz, como botones disparadores de las funciones nucleares del sistema. Tal es el caso del primer botón "INICIAR PROTOTIPO DRON 3D" que se encuentra definido con un estilo de negrita y un tamaño de 14 puntos, se encuentra enlazado a la función iniciarDron() para el inicio de la ejecución, y del segundo botón de texto "VER ESTADISTICAS EN TIEMPO REAL" donde se encuentra personalizado en formato de color azul oscuro y tamaño de 11 puntos, encontrándose enlazado a la función mostrarVentanaEstadisticas(), con la finalidad de permitir el acceso a los datos analíticos del entorno.

<pre> %% COLUMNA DERECHA: SISTEMA DE JAMMERS %% ===== jamBlancoLamp = uilamp(fig, 'Position', [420 500 20 20], 'Color', 'red'); jamBlancoBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'Jammer Blanco', 'Value', false, 'Position', [360 450 140 40]); jamBlancoBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, jamBlancoLamp, 'Jammer_Blanco_Enable'); jamBandaLamp = uilamp(fig, 'Position', [420 400 20 20], 'Color', 'red'); jamBandaBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'Jammer Banda Lim.', 'Value', false, 'Position', [360 350 140 40]); jamBandaBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, jamBandaLamp, 'Jammer_Banda_Enable'); jamGausLamp = uilamp(fig, 'Position', [420 300 20 20], 'Color', 'red'); jamGausBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'Jammer Gausiano', 'Value', false, 'Position', [360 250 140 40]); jamGausBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, jamGausLamp, 'Jammer_Gaus_Enable'); jamImpLamp = uilamp(fig, 'Position', [420 200 20 20], 'Color', 'red'); jamImpBtn = uibutton(fig, 'state', 'Text', 'Jammer Impulsivo', 'Value', false, 'Position', [360 150 140 40]); jamImpBtn.ValueChangedFcn = @(src,event) cambiarEstado(src, jamImpLamp, 'Jammer_Imp_Enable'); </pre>	
--	--

Figura 45. Columna derecha diseño

La construcción del sistema de control fue realizada en MATLAB, utilizando una interfaz gráfica que canaliza la gestión de todos los componentes del modelo de simulación del dron. De esta manera, el usuario puede interactuar de un modo sencillo con el sistema de control, permitiendo encender y apagar las tecnologías inalámbricas integradas (GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa), así como las diferentes tipologías de jammers implementados para generar escenarios de interferencia controlados. Además, presenta indicadores visuales que indican en tiempo real el estado de cada tecnología y cada jammer, posibilitando una rápida verificación de su funcionamiento durante la ejecución del modelo de simulación. Por otro lado, el sistema de control incluye también funciones para lanzar automáticamente el modelo de Simulink, crear e incorporar los bloques de las tecnologías de comunicación y el sistema de interferencia, y también definir los parámetros de la simulación para ejecutar el modelo sin necesidad de configurar manualmente como se visualiza en la **Figura 46**. A su vez cuenta también con una ventana de estadísticas donde muestra el nivel de degradación de las tecnologías en función de los jammers seleccionados, además de gráficos y descripciones del comportamiento observado. Por último, el sistema de control también tiene el control del movimiento del dron.

```

%% BOTONES DE ACCIÓN
%% =====
runBtn = uibutton(fig,'push');
runBtn.Text = 'INICIAR PROTOTIPO DRON 3D';
runBtn.FontSize = 14;
runBtn.FontWeight = 'bold';
runBtn.Position = [215 70 220 50];
runBtn.ButtonPushedFcn = @(src,event) iniciarDron();

statsBtn = uibutton(fig,'push');
statsBtn.Text = 'VER ESTADÍSTICAS EN TIEMPO REAL';
statsBtn.FontSize = 11;
statsBtn.FontColor = [0 0.3 0.6];
statsBtn.FontWeight = 'bold';
statsBtn.Position = [215 20 220 40];
statsBtn.ButtonPushedFcn = @(src,event) mostrarVentanaEstadisticas();

```

Figura 46. Botones de acción

3.12.2. Lógica de interacción entre jammers y tecnologías inalámbricas

Cada tecnología inalámbrica llega a generar su propia señal, mientras que los jammers producen señales de interferencia con características específicas que posteriormente se combinan y se aplican a las comunicaciones del dron.

Mediante los diferentes bloques de suma, filtrado y control de habilitación, el modelo nos permite visualizar de manera representativa la degradación provocada por las interferencias sobre cada tecnología, reproduciendo distintos escenarios de operación de forma dinámica.

Esta lógica constituye el núcleo funcional de la simulación, permite analizar cómo las señales de interferencia modifican el comportamiento de las comunicaciones inalámbricas del dron y evaluar el nivel de afectación de cada tecnología frente a los diferentes tipos de jamming implementados. Código y bloques que permiten lógica de interacción entre jammers y tecnologías del dron.

3.12.3. Aplicación de la interferencia a cada tecnología

La efectividad de un sistema de interferencia para un dron es funcional al aplicar una lógica de interacción inteligente capaz de ir de un envío de fuerza a una intervención también inteligente y adaptativa. Esta lógica tiene que ver con el desarrollo de bloques de software capaces de captar la firma espectral del enlace de control o bien del sistema

de navegación del propio vehículo y de ir adaptándose en tiempo real a los parámetros más críticos (como la frecuencia, la modulación, la tasa de repetición de pulsos, etcétera).

Al introducir ciclos de retroalimentación que controlaban la degradación del enlace el sistema debía modificar dinámicamente sus modos de interferencia activa, o falsificación de señales, mejorando así la efectividad energética y a su vez reduciendo su propia detectabilidad electrónica al implementar contramedidas a medida de cada tecnología objetivo.

A continuación, se incluye el código implementando la aplicación de la interferencia a cada una de las tecnologías, tal y como se refleja en la **Figura 47**.

```
add_block('simulink/Math Operations/Add', [modelo_nuevo '/Suma_Jammers'], 'Inputs', '+++', 'Position', [x_j+250 y_j]);
add_line(modelo_nuevo, 'Jammer_Blanco_Product/1', 'Suma_Jammers/1');
add_line(modelo_nuevo, 'Jammer_Banda_Product/1', 'Suma_Jammers/2');
add_line(modelo_nuevo, 'Jammer_Gaus_Product/1', 'Suma_Jammers/3');
add_line(modelo_nuevo, 'Jammer_Imp_Product/1', 'Suma_Jammers/4');

add_block('simulink/Sinks/Scope', [modelo_nuevo '/Monitor_Tecnologias'], 'Position', [x+420 220 x+580 340]);
set_param([modelo_nuevo '/Monitor_Tecnologias'], 'NumInputPorts', '4');
set_param([modelo_nuevo '/Monitor_Tecnologias'], 'SampleTime', '0.015');

senales = {'GPS', 'WiFi', 'Bluetooth', 'LoRa'};
y_pos = [60, 180, 300, 420];

for i = 1:4
    nombre_senal = senales{i};
    bloque_suma = ['Interferencia_' nombre_senal];
    bloque_filtro = ['Filtro_Salida_' nombre_senal];
    add_block('simulink/Math Operations/Add', [modelo_nuevo '/' bloque_suma], 'Inputs', '++', 'Position', [x+200 y_pos{i}]);
    add_block('simulink/Math Operations/Product', [modelo_nuevo '/' bloque_filtro], 'Inputs', '2', 'Position', [x+300 y_pos{i}]);

    add_line(modelo_nuevo, [nombre_senal '_Product/1'], [bloque_suma '/1']);
    add_line(modelo_nuevo, 'Suma_Jammers/1', [bloque_suma '/2']);
    add_line(modelo_nuevo, [bloque_suma '/1'], [bloque_filtro '/1']);
    add_line(modelo_nuevo, [nombre_senal '_Enable/1'], [bloque_filtro '/2']);
    add_line(modelo_nuevo, [bloque_filtro '/1'], ['Monitor_Tecnologias/' num2str(i)]);
end

set_param(modelo_nuevo, 'StopTime', '10');
set_param(modelo_nuevo, 'SolverType', 'Variable-step');
set_param(modelo_nuevo, 'Solver', 'ode45');

Simulink.BlockDiagram.arrangeSystem(modelo_nuevo);
save_system(modelo_nuevo);

set_param(modelo_nuevo, 'SimulationCommand', 'start');
end
```

Figura 47. Código de aplicación de la interferencia a cada tecnología

La interacción entre los jammers y las tecnologías inalámbricas del dron se desarrolla mediante una lógica implementada en MATLAB/Simulink que permite

representar de forma dinámica el comportamiento de las comunicaciones bajo escenarios de interferencia controlados.

En primer lugar, el código genera las señales correspondientes a las tecnologías GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, las cuales representan los enlaces de comunicación utilizados por el dron durante la simulación. Paralelamente, se generan las señales asociadas a cada uno de los cuatro jammers implementados, correspondientes al ruido blanco, ruido de banda limitada, ruido gaussiano y ruido impulsivo, cuyas características son configuradas de acuerdo con el tipo de interferencia que se desea analizar.

3.12.4. Bloque de procesamiento de señales

El bloque de procesamiento de señales tal y como es representado en la **Figura 48**, es el "cerebro" analítico del sistema de interferencia; es la etapa clave en la que se convierte la información proveniente del medio electromagnético reconocido por el sistema en datos útiles. El bloque de procesamiento de señales tiene como misión primordial la recepción de la señal cruda de espectro, la atenuación del ruido ambiental, y el aislamiento de las firmas correspondientes a los protocolos de comunicación o de navegación con los cuales el dron está en funcionamiento. Mediante algoritmos de análisis espectral y técnicas de clasificación, el bloque de procesamiento de señales revela qué tecnología está utilizando el objetivo, lo que resulta básico para que el jammer sea capaz de determinar la técnica de ataque más adecuada, eligiendo entre ruido blanco, señales de engaño o la suplantación de paquetes.

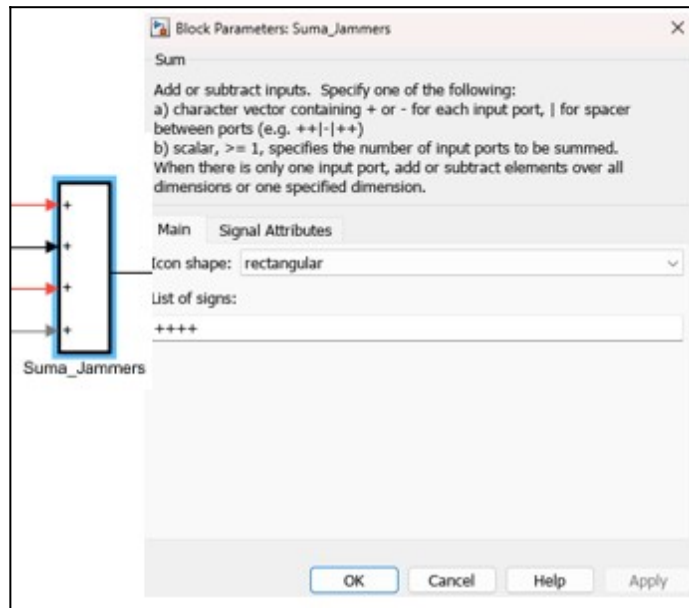


Figura 48. Bloque de procesamiento de señales

Dicha construcción, que se denomina "Suma Jammers", tiene un papel fundamental en el sistema de gestión de interferencias del dron, realiza la suma algebraica de todas las señales de ruido o de perturbación, las recibe por sus puertos de entrada (cuatro puertos). En la estructura de simulación, su función es la de reducir a una sola señal de salida la combinación de varias fuentes de interferencia y/o que pueden bien representar diferentes frecuencias o diferentes perfiles de ruido.

Así, la salida conformada por "Suma Jammers" es la que el propio controlador central de la gestión de interferencias del dron utiliza para procesar un único flujo de datos que ilustra el efecto combinado de todas las fuentes perturbadoras que puedan encontrarse en el entorno y, con ello, posibilitar una evaluación completa del rendimiento y la robustez del dron ante un entorno de interferencias complicado y superpuesto.

3.12.5. Procesamiento de datos de los jammers y señales integradas

La lógica que ha sido introducida consiste en un controlador de estados el cual establece la gestión del comando de conmutación de los protocolos de comunicación y

de las etapas de interferencia de forma única, tal y como se ilustra en la **Figura 49**. A partir de una estructura de polos globales, se realiza la sincronización entre los comandos de la interfaz y los parámetros que son ejecutables, de forma que logran llevar a cabo de forma planificada y correcta la ejecución en tiempo real de las contramedidas electrónicas.

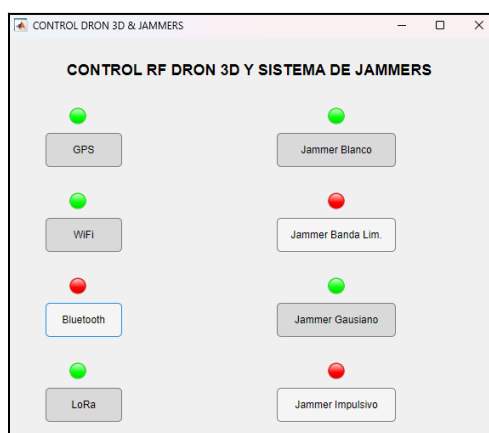


Figura 49. Procesamiento de datos del control hacia los jammers y señales integradas

El código presentado permite establecer la necesaria arquitectura lógica para llevar a cabo la gestión del estado operativo del sistema, mediante una única función de control (centralizada), tal como se muestra en la **Figura 50**. La función centralizada de control tiene como finalidad funcionar como una interfaz dinámica (o puente) entre la interacción del usuario (o de un sistema automatizado) y el comportamiento global de las variables que determinan tanto los protocolos de comunicación que han sido detectados (GPS, Wi-Fi, Bluetooth, LoRa) como las distintas formas de interferencia que posee el sistema (ruido blanco, banda estrecha, gaussiano e impulsivo). Al concentrar la gestión del estado operativo del sistema en una estructura de control genérica, el sistema tiene garantizada la consistencia del estado a tiempo real, de manera que se pueda realizar una respuesta rápida ante los cambios del entorno electromagnético.

```

%% CONTROL GENÉRICO DE ESTADOS (AHORA ACTUALIZA GLOBALES)
%% =====
function cambiarEstado(btn, lamp, blockName)
    global GPS_ON WIFI_ON BT_ON LORA_ON
    global JAM_BLANCO_ON JAM_BANDA_ON JAM_GAUS_ON JAM_IMP_ON

    estado = btn.Value;
    if estado == 1
        lamp.Color = 'green';
        valorStr = '1';
    else
        lamp.Color = 'red';
        valorStr = '0';
    end

    % Actualizar la variable global respectiva para las estadísticas
    switch blockName
    switch blockName
        case 'GPS_Enable'
            GPS_ON = estado;
        case 'WiFi_Enable'
            WIFI_ON = estado;
        case 'Bluetooth_Enable'
            BT_ON = estado;
        case 'LoRa_Enable'
            LORA_ON = estado;
        case 'Jammer_Blanco_Enable'
            JAM_BLANCO_ON = estado;
        case 'Jammer_Banda_Enable'
            JAM_BANDA_ON = estado;
        case 'Jammer_Gaus_Enable'
            JAM_GAUS_ON = estado;
        case 'Jammer_Imp_Enable'
            JAM_IMP_ON = estado;
    end
end

```

Figura 50. Control genérico de estados

El código incluido en el documento determina cómo será la infraestructura lógica que permitirá gestionar el estado de funcionamiento del sistema mediante una función única de gestión de control. Su finalidad consistirá en hacer las veces de un sistema de interfaz dinámica por la interacción del usuario (o la interacción de otro sistema automatizado) y entre el comportamiento fino del conjunto global de las variables de control que regulan tanto los protocolos de comunicación que han sido detectados (GPS-rtklib, Wi-Fi, Bluetooth to NMEA, LoRa-DHT), como los diferentes métodos de interferencia que se pueden representar a través de ruido blanco, banda estrecha, gaussiano e impulsivo.

3.12.6. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas

La administración de la variable de datos para la visualización de las estadísticas permite convertir las variables de estado operativas en indicadores de rendimientos claros y comprensibles, tal y como se refleja en la **Figura 51**. Esta fase realiza la recolección de información y el tratamiento de datos en tiempo real. La conversión de los estados binarios y de ejecución en métricas visuales permite dar cabida a un análisis inmediato de la eficacia de las medidas de contramedida y la evolución histórica de la actividad electromagnética.

```
% VENTANA DE ESTADÍSTICAS DINÁMICA
%% =====
function mostrarVentanaEstadisticas()
global GPS_ON WIFI_ON BT_ON LORA_ON
global JAM_BLANCO_ON JAM_BANDA_ON JAM_GAUS_ON JAM_IMP_ON

% Crear nueva ventana independiente
figStats = uifigure('Name','Resultados en Tiempo Real', 'Position',[760 100 850 700]);

% Título
lblTit = uilabel(figStats, 'Text', 'ANÁLISIS DE DEGRADACIÓN ACTUAL (%)', ...
    'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold', 'Position', [250 650 400 700]);

% --- MATRIZ BASE TEÓRICA ---
% Filas: GPS, WIFI, Bluetooth, LoRa
matrizBase = [
    15, 95, 85, 40;
    5, 100, 60, 30;
    8, 100, 70, 35;
    2, 10, 25, 15
];

nombresTec = {'GPS', 'WIFI', 'Bluetooth', 'LoRa'};
nombresJam = {'R. Blanco', 'R. Banda Lim', 'R. Gaussiano', 'R. Impulsivo'};

% --- FILTRADO DINÁMICO (Lee qué botones están en ON) ---
idxTec = logical([GPS_ON, WIFI_ON, BT_ON, LORA_ON]);
idxJam = logical([JAM_BLANCO_ON, JAM_BANDA_ON, JAM_GAUS_ON, JAM_IMP_ON]);

datosActivos = matrizBase(idxTec, idxJam);
tecActivas = nombresTec(idxTec);
jamActivos = nombresJam(idxJam);

% Casos especiales (Todo apagado)
if sum(idxJam) == 0
    datosActivos = zeros(sum(idxTec), 1);
    jamActivos = {'Sin Interferencia'};
end
if sum(idxTec) == 0
    datosActivos = zeros(1, max(1, sum(idxJam)));
    tecActivas = {'Ninguna'};
end

% --- TABLA DE DATOS DINÁMICA ---
uitable(figStats, 'Data', datosActivos, ...
    'RowName', tecActivas, 'ColumnName', jamActivos, ...
    'Position', [50 500 400 120]);
```

Figura 51. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas N°1

El fragmento de código también implementa un procedimiento para la visualización del efecto de las contramedidas electrónicas de forma automatizada, de tal

manera que genere una gráfica (gráfico de barras) dinámica en GUI, como se encuentra representado en la **Figura 52**. El código tiene por objetivo el procesado de los datos de degradación en tiempo real para crear el gráfico que relaciona las distintas tecnologías de comunicación detectadas con el nivel de interferencia recibido. Este, además de automatizar la gestión de las etiquetas de los ejes y de la leyenda de la gráfica, hace que la información relacionada con el módulo de interferencia que esté afectando a una determinada tecnología sea siempre correcta. Esto a su vez proporciona al operador una forma clara para la interpretación del éxito o grado de las operaciones electrónicas en curso.

```

uilabel(figStats, 'Text', '* Valores representan el % de pérdida actual', ...
    'FontSize', 10, 'Position', [50 470 450 20]);

% --- GRÁFICA DE BARRAS DINÁMICA ---
ax = uiaxes(figStats, 'Position', [480 430 350 220]);
if ~isempty(datosActivos)
    bar(ax, datosActivos);
end
ax.Title.String = 'Impacto de Jammers en Tecnologías Activas';
ax.YLabel.String = '% de Degradación';
ax.XTickLabel = tecActivas;
if sum(idxJam) > 0
    legend(ax, jamActivos, 'Location', 'northeastoutside');
end

% --- TEXTO EXPLICATIVO DINÁMICO ---
txtExplicacion = ('ANÁLISIS TÉCNICO DE LA PRUEBA ACTUAL:');

if sum(idxTec) == 0
    txtExplicacion(end+1) = 'El dron tiene todas sus tecnologías de comunicación apagadas.';
elseif sum(idxJam) == 0
    txtExplicacion(end+1) = 'ESTADO IDEAL: No hay ningún jammer interfiriendo en este momento. Todas las señales activas';
else
    if JAM_BLANCO_ON
        txtExplicacion(end+1) = '[+] RUIDO BLANCO: Altera el piso de ruido técnico general. La degradación es baja por';
    end
    if JAM_BANDA_ON
        txtExplicacion(end+1) = '[+] JAMMER BANDA LIMITADA (2.4 GHz): Genera un ataque dirigido. Si WiFi y/o Bluetooth';
    end
    if JAM_GAUS_ON
        txtExplicacion(end+1) = '[+] RUIDO GAUSIANO: Afecta gravemente a canales estrechos. Produce una degradación se';
    end
end

```

Figura 52. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas N°2

A través del bloque se ejecuta un motor de diagnóstico que convierte el estado del sistema en un informe textual en tiempo real que puede verse en la **Figura 53**. Y empleando estructuras condicionales, se evalúan por el código cuáles son las tecnologías y los jammers que están activos, construyendo un resumen que explica los efectos

técnicos que produce cada contramedida que se aplica. Esta herramienta permite que el operador entienda a la vez la lógica operativa y el efecto físico que la señal ejerce sobre el entorno de comunicaciones del dron.

```

end
if JAM_IMP_ON
    txtExplicacion(end+1) = '[+] RUIDO IMPULSIVO: Actúa mediante ráfagas de alta potencia y corta duración. No tum
end

if LORA_ON
    txtExplicacion(end+1) = '';
    txtExplicacion(end+1) = '>> RESILIENCIA LORA: Se observa matemáticamente que LoRa es la tecnología más robusta
end
end

uitextarea(figStats, 'Value', txtExplicacion, ...
    'Position', [50 30 750 380], 'FontSize', 13, 'Editable', 'off');
end

```

Figura 53. Procesamiento de datos para visualización de estadísticas N°3

Y como se muestra, la principal interfaz de control que organiza las funciones operativas del sistema a través de dos botones se diferencian de la siguiente manera: el primero activa el prototipo de dron 3D para la puesta en marcha del mismo y la segunda muestra el panel de estadística en tiempo real para observar el rendimiento y el efecto producido por las contramedidas, tal como se observa en la **Figura 54**. La arquitectura del interfaz que permite la navegación directa entre la ejecución de la simulación y el análisis de los resultados obtenidos durante la prueba.

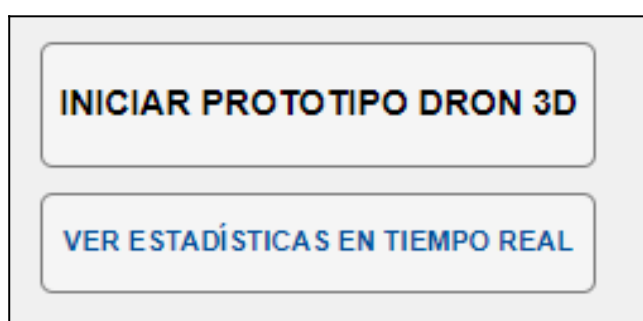


Figura 54. Botones de inicio y estadísticas

El sistema se encarga de procesar en tiempo real los estados de tecnologías y jammers a fin de analizar cómo se comportan en distintos estados de interferencia. El programa, a partir de matrices de degradación, es capaz de generar automáticamente

imágenes gráficas y diagnóstico técnico suficiente para que el usuario pueda comparar el efecto de cada contramedida, de forma que el usuario pueda tener una adecuada comparación en base a una evaluación del desempeño de las comunicaciones del dron en ese entorno simulado.

3.13. Pruebas y simulación

3.13.1. Prueba 1: Simulación del dron volando

En esta primera sección se presenta la primera fase de validación experimental mediante la simulación en un entorno tridimensional de un dron en vuelo. Esta prueba inicial permite verificar la estabilidad del modelo cinemático y la correcta integración de los componentes de navegación en un escenario virtual controlado antes de aplicar las contramedidas electrónicas como se muestra en la **Figura 55**.

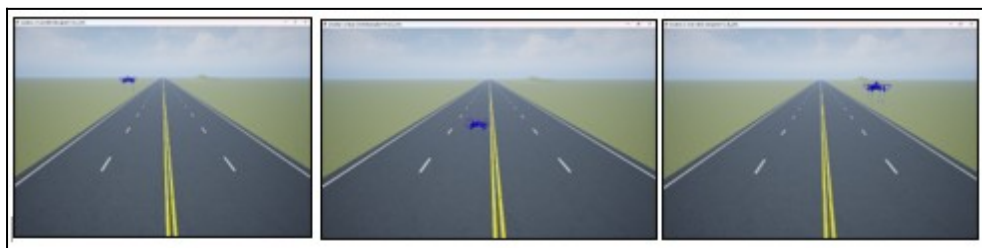


Figura 55. Simulación del dron volando

El dron es simulado correctamente en el entorno MATLAB/Simulink permitiendo representar el comportamiento del cuadricóptero en un ambiente tridimensional controlado, de manera que en la ejecución el modelo es capaz de responder a las condiciones iniciales fijadas y actualizar de forma continua su posición y orientación de las variables de control que se tienen en la simulación.

A su vez, la combinación del modelo tridimensional, de los bloques de control y de los elementos en mejor comunicación dotan de estabilidad al funcionamiento del

dron, de manera que se debe decir que el sistema permite realizar las pruebas adecuadamente.

De esta manera la simulación es capaz de reproducir el comportamiento del sistema de forma correcta, con lo que se tiene una plataforma funcional para el análisis de las tecnologías inalámbricas y de las diferentes circunstancias de interferencia implementadas en el proyecto.

3.13.2. Prueba 2: Tecnologías inalámbricas integradas en el dron

Como conclusión, la etapa de validación de las tecnologías inalámbricas implementadas en el dron como se muestra en la **Figura 56**, se orienta hacia la caracterización de las señales operativas de las tecnologías del dron. A través de la prueba de validación, lograremos verificar que los específicos protocolos de navegación y control como GPS (1500 MHz), Bluetooth (2402 MHz), Wi-Fi (2400 MHz) y LoRa (915 MHz) efectivamente se emiten y se reciben.

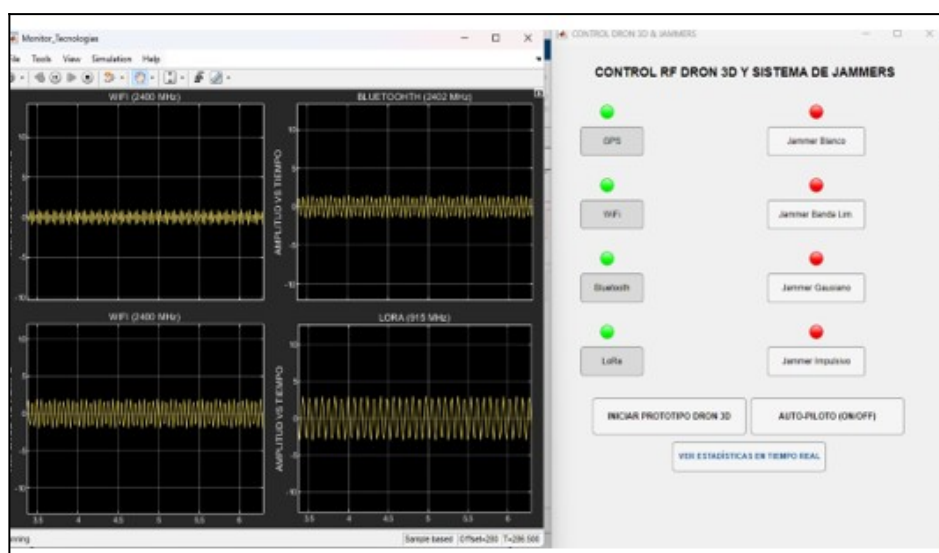


Figura 56. Tecnologías inalámbricas integradas en el dron

La conexión de las tecnologías inalámbricas del vehículo aéreo no tripulado se llevó a cabo con éxito. El correcto funcionamiento presentado tuvo como base el

monitor de tecnologías incorporado en Simulink. En la ejecución de la simulación se observó que las cuatro señales, correspondientes a GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, eran generadas y visualizadas de forma simultánea. Cada una de las señales conservó la frecuencia de operación establecida en su correspondiente bloque de configuración del modelo.

La monitorización de las tecnologías inalámbricas, y la percepción del comportamiento autónomo de cada una de ellas, así como el efecto que éstas producen en el conjunto del modelo, fue lo que permitió observar que las señales eran emitidas sin ningún tipo de interferencia y que conservaban su amplitud y su frecuencia en todo momento durante la ejecución de la simulación. Esto hace que se pueda evidenciar que las tecnologías inalámbricas están correctamente integradas en el modelo del dron y que el sistema de comunicación opera de forma adecuada sin incidencias en condiciones normales. Todo esto nos proporciona una base fiable para poder evaluar posteriormente el efecto de los distintos tipos de jammers en las comunicaciones inalámbricas (tema que será expuesto en el siguiente).

3.13.3. Prueba 3: Inhibidores de señales (jammers)

Esta sección hace referencia a la validación experimental de los inhibidores de señales, la cual se evalúa en función de la capacidad de eliminar los enlaces de comunicación del dron para que se vaya utilizando las distintas técnicas de interferencia. Esta vez se procederá a la prueba funcional e introducción activa de varios tipos de jammers, en concreto cuatro: blanco, limitado en banda, gaussiano e impulsivo, todo ello a través del panel de control y el monitor de espectro tal como se describe en la **Figura 57**.

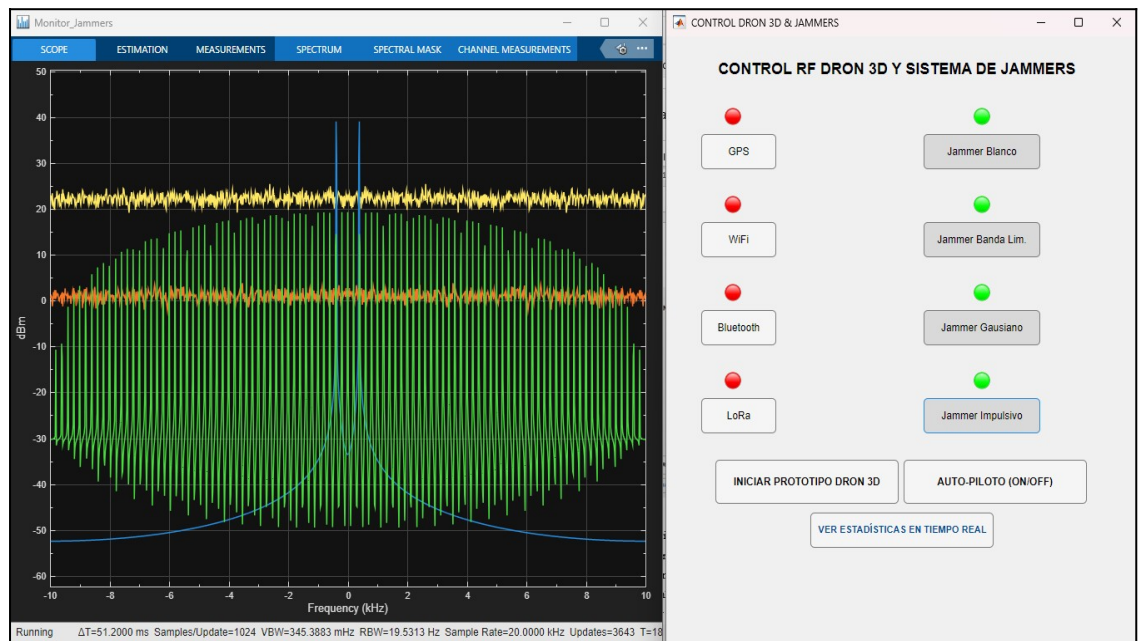


Figura 57. Inhibidores de señales (jammers)

La activación de los jammers ha sido correctamente implementada y verificada mediante el monitor de análisis del modelo de Simulink. En el proceso de simulación, los cuatro jammers: ruido blanco, ruido de banda limitada, ruido gaussiano y ruido impulsivo han proporcionado su señal de interferencia según los parámetros que se habían predefinido en la etapa del sistema. Por tanto, se observó el comportamiento de cada tipo de jammer de forma individual o combinada.

Las señales de interferencia han sido visualizadas adecuadamente, evidenciando que el modelo responde a la activación o desactivación de cada jammer desde la interfaz de control del sistema de generación de interferencias que el modelo Simulink proporciona, es decir, el modelo evidentemente responde como se esperaba. Por la estabilización del sistema cristalizan los resultados que confirman el funcionamiento de las diferentes señales de interferencia, obteniendo un entorno de simulación válido que permite estudiar el efecto de cada tipo de jammer en las tecnologías inalámbricas integradas en el dron como estaba previsto en las diferentes pruebas experimentales.

3.13.4. Jammer de ruido blanco frente a tecnologías integradas

En esta sección ahora se realiza el análisis experimental del jammer de ruido blanco frente a las tecnologías inalámbricas integradas del dron, como se observa en la **Figura 58**. Esta prueba evalúa el impacto de la elevación del piso de ruido térmico sobre los enlaces de comunicación, permitiendo observar en tiempo real cómo la señal de interferencia de banda ancha degrada la relación señal-ruido de los protocolos GPS, Bluetooth, Wi-Fi y LoRa.

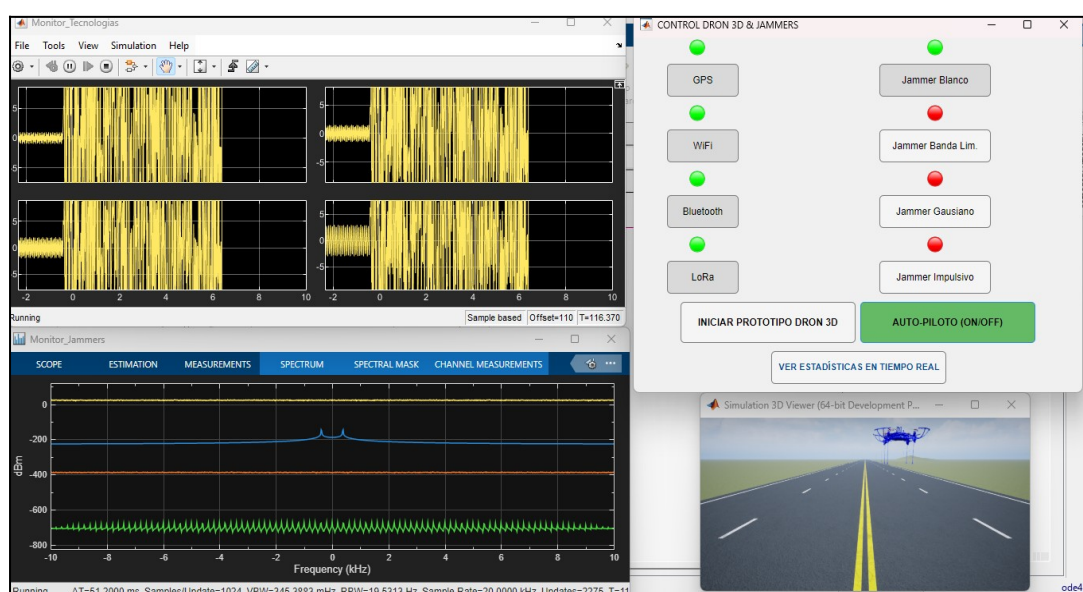


Figura 58. Jammer de ruido blanco frente a tecnologías integradas

Lo que se experimenta durante la simulación es que el ruido blanco actúa como una interferencia no selectiva de grado amplio, es decir, que está igual a lo largo de todo el espectro del rango de frecuencias. El ruido blanco introduce una interferencia continua dentro del entorno estocástico de comunicación del dron, de igual forma que afecta al canal de forma simultánea a la del resto de aplicaciones de tecnologías inalámbricas que coexisten. Entonces, el ruido blanco desencadena un escenario en el que la señal útil y la interferencia coexisten de forma continua dentro del sistema de comunicación analizado, de manera que modifica el comportamiento normal de las

transmisiones formando una situación donde se viven comunicaciones con ruido blanco generalizado dentro de la simulación.

3.13.5. Jammer de banda limitada frente a tecnologías integradas

En esta sección se centra en el análisis experimental de la eficacia del jammer de banda limitada sobre las tecnologías de comunicación del dron.

A lo largo de la simulación, tal como se muestra en la **Figura 59**, el jammer de banda limitada produce una interferencia que se sitúa concentradamente en una franja concreta del espectro de frecuencias, la cual, directamente se interpone sobre las señales inalámbricas del dron que operan en dicho espacio.



Figura 59. Jammer de banda limitada frente a tecnologías integradas

La interferencia provoca, por su parte, una alteración localizada en el canal de comunicación que está exclusivamente asociada a las bandas espectrales con las que se da la coincidencia de las tecnologías en uso.

3.13.6. Jammer de ruido gaussiano frente a tecnologías integradas

En esta parte se puede ver el análisis experimental del jammer de ruidos relacionados con el dron de tecnologías integradas, cuya información puede ser observada en la **Figura 60**, la mencionada prueba es responsable del comportamiento de enlaces sujetos a ruido de gauss simula un ruido de fondo complejo y variable, poniendo a prueba la capacidad de filtrado y de corrección de errores de los protocolos de comunicación. Esta forma de indagar permite, a su vez, evaluar de qué forma se deterioran las señales de GPS y/o Bluetooth y/o Wi-Fi y/o LoRa bajo un entorno ruidoso aleatorio realista, proporciona una métrica de lo crítica que resulta ser la etapa de la robustez operativa del sistema en entornos electromagnéticos adversos.

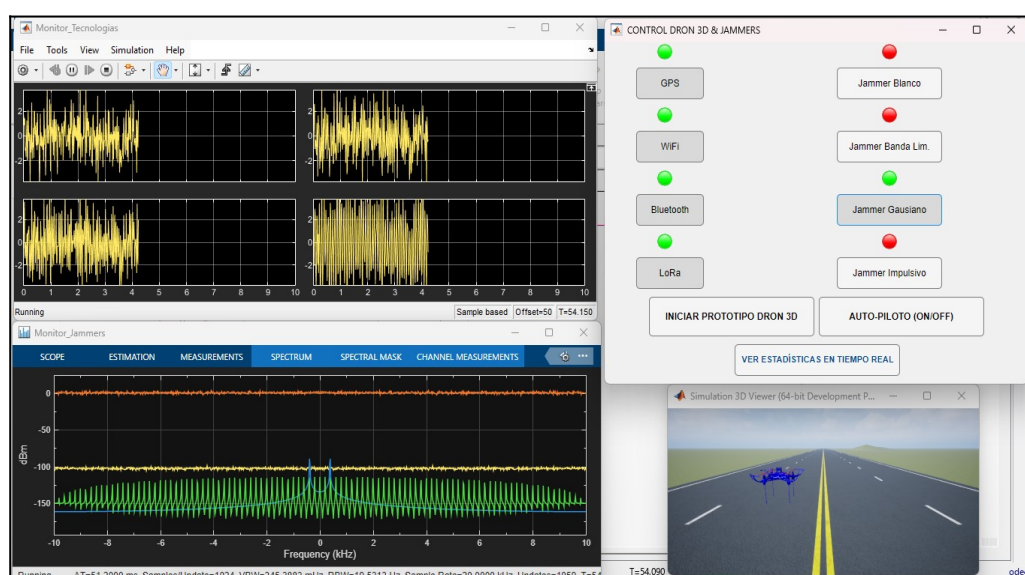


Figura 60. Jammer de ruido gaussiano frente a tecnologías integradas

Durante la simulación visualizamos el inhibidor de ruido gaussiano provocando otra interferencia aleatoria espectral, la cual se añade a las señales de los sistemas de transmisión de las tecnologías inalámbricas.

3.13.7. Jammer de ruido impulsivo frente a tecnologías integradas

En el apartado se presenta el análisis experimental del jammer de ruido impulsivo y el impacto perturbador que tiene sobre las distintas tecnologías inalámbricas que utiliza un dron se observa en la **Figura 61**. A diferencia de la interferencia continua, el tipo de interferencia se caracteriza por períodos breves y discontinuos de ráfagas de alta potencia, lo que permite observar cuán inferiores son los protocolos (GPS, Bluetooth, Wi-Fi y LoRa) ante ataques de interferencia discontinua, o bien cuáles son más resistentes. El estudio profundo es importante porque nos permite comprender qué hace el sistema ante interferencias con carácter transitorio, que son las más difíciles de eliminar considerando su carácter errático y repentino.

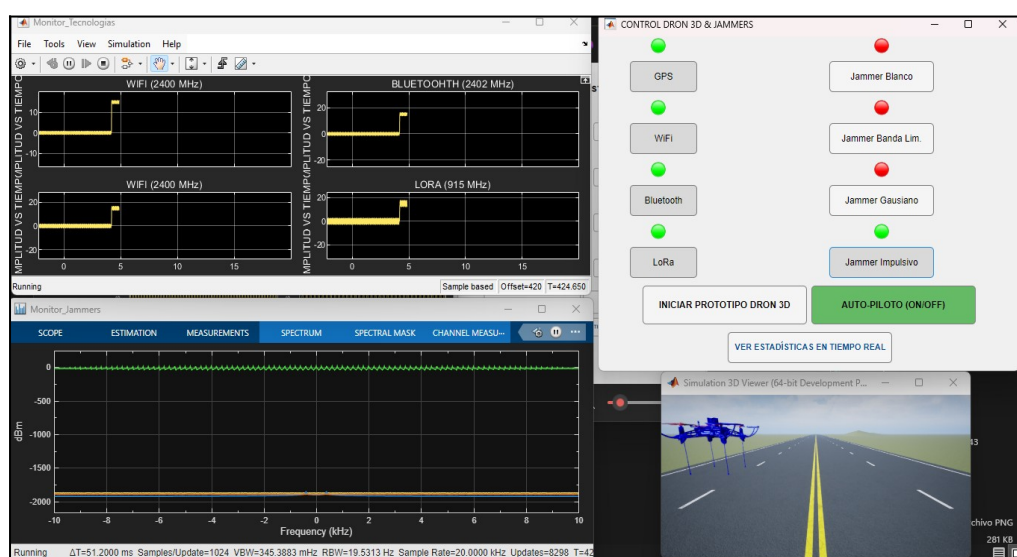


Figura 61. Jammer de ruido impulsivo frente a tecnologías integradas

Se aprecia que el jammer de ruido impulsivo introduce una señal con interferencia que puede ser identificada mediante la emisión intermitente de pulsos de corta duración junto al tiempo de simulación. A su vez, los pulsos del jammer son producidos con carácter intermitente dentro de la comunicación inalámbrica empleada en el dron, sobreponiéndose temporalmente a las señales de dichas tecnologías inalámbricas.

A diferencia de la interferencia continua, el jammer hace que las interferencias instantáneas se produzcan en momentos concretos, creando un espacio virtual donde las comunicaciones se están realizando en presencia de ráfagas de interferencia. De esta manera, el modelo es capaz de representar un entorno donde las tecnologías inalámbricas forman parte de un proceso de comunicación al mismo tiempo que se introducen impulsos de ruido a lo largo del tiempo de simulación, sin poder anticipar el efecto o desempeño de las interferencias producidas a partir de la configuración de interferencias con el tipo de jammer.

En el modelo simulado no se determinarán las características o efectos del mismo, por lo que únicamente se contempla lo que va ocurriendo ante situaciones de interferencia de ruido impulsivo.

3.13.8. Todos los jammers activos frente a tecnologías integradas

En esta sección se desarrolla la validación experimental en el caso de la saturación máxima, donde todos los módulos de interferencia se encuentran activos al mismo tiempo contra las tecnologías de comunicación del dron. La prueba cumbre permite ver cómo se puede llegar a paralizar la combinación de los enlaces GPS, Bluetooth, Wi-Fi y LoRa cuando se infringe un entorno electromagnético hostil y muy denso. Gracias a la superposición de las diferentes técnicas de jamming se obtiene una medida extrema de la resiliencia del sistema, visibilizando cómo la suma de ruido de diferentes naturalezas desestabiliza de forma radical la posibilidad de comunicación y se pone a prueba los mecanismos de tolerancia de fallos del dron bajo un contexto de interferencia electromagnética extrema.

Durante la simulación se observa en la **Figura 62**, un escenario en el que los cuatro jammers, ruido blanco, ruido de banda limitada, ruido gaussiano y ruido

impulsivo, estas permanecen activos de manera simultánea, generando un entorno de interferencia complejo sobre las tecnologías inalámbricas integradas en el dron.



Figura 62. Todos los jammers activos frente a tecnologías integradas

Visualizando en el entorno, las señales inalámbricas están trabajando de acuerdo con su influencia de interferencias impulsivas, reproduciendo simuladamente un entorno donde diferentes jammers actúan al mismo tiempo.

3.13.9. Parámetros de simulación

En la **Tabla 6**, se detallan los parámetros fundamentales configurados para el entorno de simulación, los cuales sirven como base técnica para el análisis del sistema.

Tabla 6. Parámetros de Simulación

Parámetro	Valor	Descripción
Entorno de simulación	MATLAB/Simulink	Plataforma utilizada para el

		desarrollo del modelo.
Tiempo de simulación	Inf	Duración total de cada escenario de simulación.
RPM	35	Velocidad inicial del dron durante la simulación.
Frecuencia GPS	1500	Frecuencia de operación de la señal GPS L1.
Frecuencia Wi-Fi	2400	Banda de operación de la comunicación Wi-Fi.
Frecuencia Bluetooth	2.402	Banda de operación de Bluetooth.
Frecuencia LoRa	915	Frecuencia de operación del sistema LoRa.
Tipos de jammer	Ruido blanco, ruido gaussiano, banda limitada, ruido impulsivo	Interferencias electromagnéticas evaluadas durante las simulaciones.
Herramientas de análisis	Scope, Spectrum Analyzer, Time Scope	Bloques utilizados para la visualización y análisis de las señales generadas.

Se presentaron los principales parámetros considerados durante el desarrollo de las simulaciones en MATLAB/Simulink. En ella se especifican el entorno de simulación, el tiempo de ejecución, las tecnologías de comunicación implementadas en el dron virtual, las frecuencias de operación de cada sistema inalámbrico, los tipos de

jammers empleados para generar la interferencia electromagnética y las herramientas utilizadas para el monitoreo y análisis de las señales.

Estos parámetros establecen las condiciones bajo las cuales se realizaron los diferentes escenarios de simulación y el posterior análisis del desempeño del dron virtual.

CAPÍTULO IV

4.1. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones elaboradas en MATLAB junto con el entorno de Simulink se evaluó el efecto de la interferencia electromagnética generada por diferentes tipos de jammers sobre el desempeño de un dron virtual. Las pruebas fueron realizadas bajo condiciones controladas, permitiendo analizar el comportamiento de las tecnologías de comunicación integradas en el sistema, tales como GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, frente a distintos escenarios de interferencia.

Los resultados se muestran mediante gráficas, señales y parámetros obtenidos durante las simulaciones, los cuales permiten identificar las variaciones producidas en el funcionamiento del sistema ante la presencia de cada tipo de jammer. Asimismo, se realiza un análisis comparativo de los diferentes escenarios evaluados con el propósito de determinar el impacto de la interferencia electromagnética sobre el desempeño del dron virtual y el comportamiento de sus enlaces de comunicación.

4.1.1. Resultados de interacción entre jammer de ruido y tecnologías del dron

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos a raíz de la interacción del jammer de ruido blanco con las diferentes tecnologías inalámbricas del dron como se observa en la **Figura 63**; a través de la monitorización en tiempo real se irá recogiendo la respuesta del sistema al aumento del piso de ruido térmico, pudiendo así visualizar y cuantificar la degradación del rendimiento de los enlaces de comunicación GPS, Bluetooth, Wi-Fi y LoRa, el cual sirve como apoyo empírico para testear la vulnerabilidad del dron frente a la interferencia de banda ancha y poder contrastar la efectividad de los modelos de simulación sobre los que se ha trabajado.

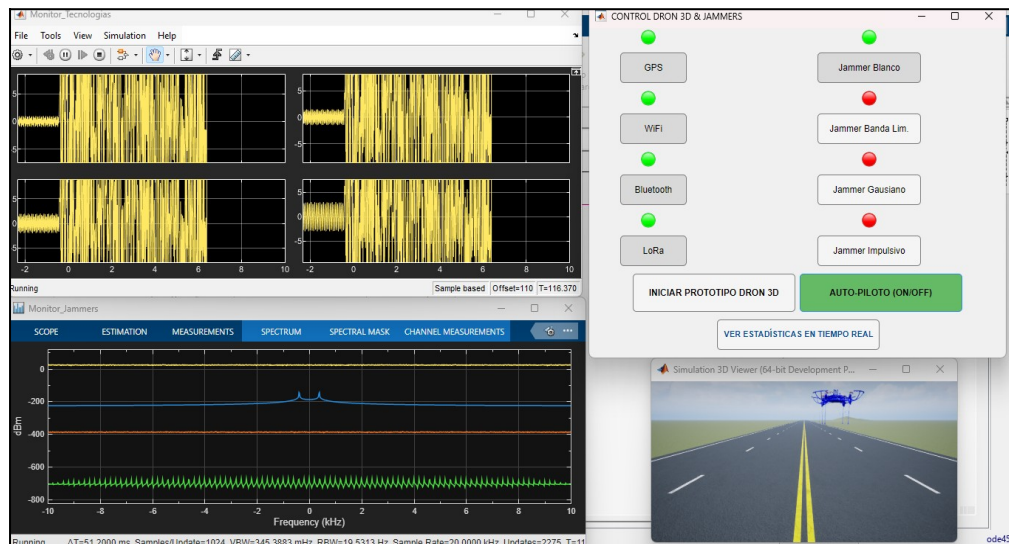


Figura 63. Jammer de ruido blanco y tecnologías del dron

4.1.2. Resultados estadísticos presentados en el software

La activación en la simulación del jammer de ruido blanco da lugar a una degradación generalizada en todos los enlaces que posee el dron al aumentar el piso de ruido del sistema por encima de los niveles por los cuales se reciben las señales honestas. Al ser ruido blanco, la señal tiene un espectro de banda ancha que inunda las bandas de GPS, Wi-Fi, Bluetooth y LoRa, por lo cual se produce inmediatamente una pérdida abrupta de la relación señal-ruido requerida para la demodulación.

Esa interacción en la simulación toma la forma de saturar las señales en el receptor, por lo cual el sistema entra en estados de fallo o en comportamiento errático al provocar que la plataforma aérea quede inoperante, por la falta de mando y la falta de referencia posicional en la **Figura 64**.

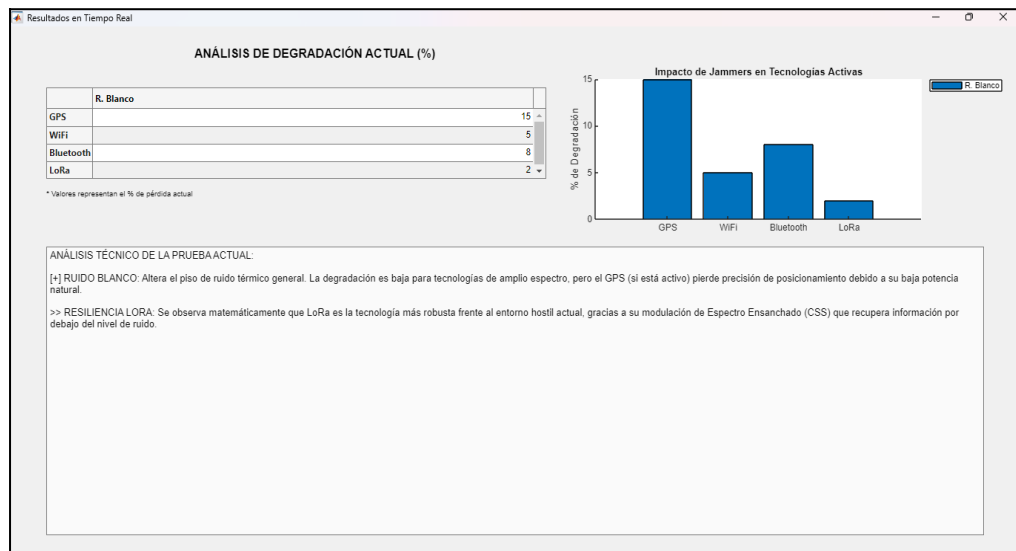


Figura 64. Resultados estadísticos presentados en el software

Los resultados anteriores obtenidos directamente de la simulación proporcionan una estimación técnica precisa de la vulnerabilidad relativa de cada tecnología al bloqueo causado por el ruido blanco. El sistema concluye que el GPS es la tecnología más vulnerable para experimentar una degradación del 15% porque la señal llega al dron a un poder extremadamente bajo y es fácilmente interrumpida por el ruido blanco. Al mismo tiempo tecnologías como el Wi-Fi y el Bluetooth están relativamente menos afectadas tienen una degradación del 5% y del 8%, como resultado de su capacidad para manejar niveles de poder y de ancho de banda más altos y así proporcionar una mejor resistencia al bloqueo genérico. La conclusión más importante del informe es la validación de la alta resistencia de LoRa debido a que solo tiene una degradación del 2%. Técnicamente esto es posible gracias al uso de la técnica de modulación de espectro difundido (espectro de ruido) la cual permite extraer la información de la señal incluso por debajo del nivel de ruido térmico y así asegura la estabilidad del canal de comunicación a pesar de la presencia del bloqueador.

4.1.3. Jammer de banda limitada y tecnologías del dron

Esta parte se ocupa del análisis de los resultados alcanzados durante el trabajo del jammer y las tecnologías inalámbricas utilizadas en el dron. En contraste con las pruebas de banda ancha esta parte considerará la capacidad del sistema para estimar la influencia del jammer selectivo que pone todo el esfuerzo en frecuencias específicas. Como se observa en la **Figura 65**, el analizador de espectro permite visualizar el efecto de dicha interferencia en los protocolos de comunicación GPS, Bluetooth, Wi-Fi y LoRa.



Figura 65. Jammer de banda limitada y tecnologías del dron

La activación de un bloqueo de banda limitada dirige todo el poder del bloqueo a un estrecho y bien definido rango de frecuencias creando un pico de energía que será significativamente más alto comparado con la cantidad de ruido térmico. Se diferenciará del enfoque del ruido blanco en que sirve como una herramienta de bloqueo selectivo y satura un determinado canal de comunicación, lo que resulta en la anulación de la relación señal-ruido en esta banda específica. Desde una perspectiva táctica resulta ser más eficiente al conocer la frecuencia operativa del dron, se puede causar el máximo

daño a un solo enlace y hacerlo imposible de demodular la señal a esa frecuencia. Cuando se trata de la efectividad del sistema el método no influye de igual manera en todas las tecnologías, sino que resulta ser más eficiente.

4.1.4. Resultados estadísticos presentados en el software

En esta sección la **Figura 66**, representa los resultados estadísticos del software tras aplicar un jammer de banda limitada. El informe técnico detalla cómo, al concentrar la potencia en frecuencias específicas, el sistema logra una saturación total (100% de pérdida) en los enlaces de Wi-Fi y Bluetooth, mientras que el GPS experimenta una degradación severa.

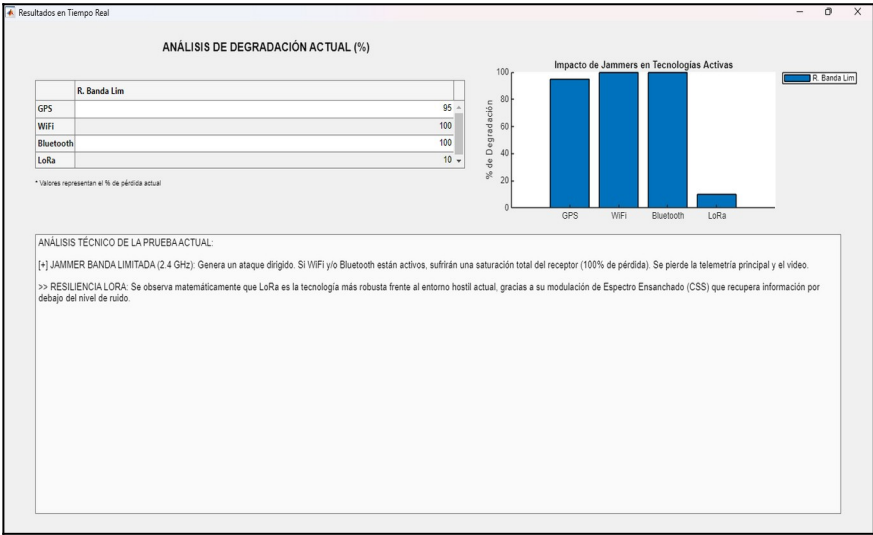


Figura 66. Resultados estadísticos presentados en el software.

Se confirma con los resultados del experimento que el jammer de banda limitada es muy efectivo en su funcionamiento cuando el objetivo es interrumpir ciertas frecuencias (por ejemplo, la banda de 2.4 GHz). Según la simulación la tasa de degradación de Wi-Fi y Bluetooth es del 100% lo cual corresponde a una saturación total del receptor con esa frecuencia y significa una desconexión instantánea del control remoto, la telemetría y el enlace de video haciendo al dron literalmente "sordo" y "ciego". La interrupción del GPS alcanza un nivel significativo de 95% de degradación.

Esto es causado por interferencia armónica o por la proximidad del espectro que afecta la posición del dron.

La característica más llamativa del ensayo sigue siendo la discrepancia del impacto en LoRa la degradación es solo del 10%. Desde la perspectiva de un análisis técnico del programa la robustez de LoRa se basa en la tecnología de modulación de difusión espectral. A diferencia de las señales de Wi-Fi o Bluetooth que pueden ser fácilmente bloqueadas por un ataque de jamming de alta potencia y ancho de banda estrecho, la señal de LoRa utiliza difusión espectral y una tecnología de procesamiento especial que permite la extracción de los bits de datos incluso de una señal que está muy por debajo del umbral de ruido del jammer

El sistema demuestra que los enlaces de alta velocidad de datos son extremadamente vulnerables al jamming poderoso mientras que los protocolos de baja velocidad son capaces de funcionar en un ambiente donde cualquier otra comunicación está absolutamente interrumpida.

4.1.5. Jammer de ruido gaussiano y tecnologías del dron

En contraste con la interferencia de banda limitada donde la perturbación es de naturaleza determinista el ruido gaussiano produce una perturbación aleatoria distribuida de acuerdo con una cierta ley a través de todo el espectro como se muestra en la **Figura 67**.

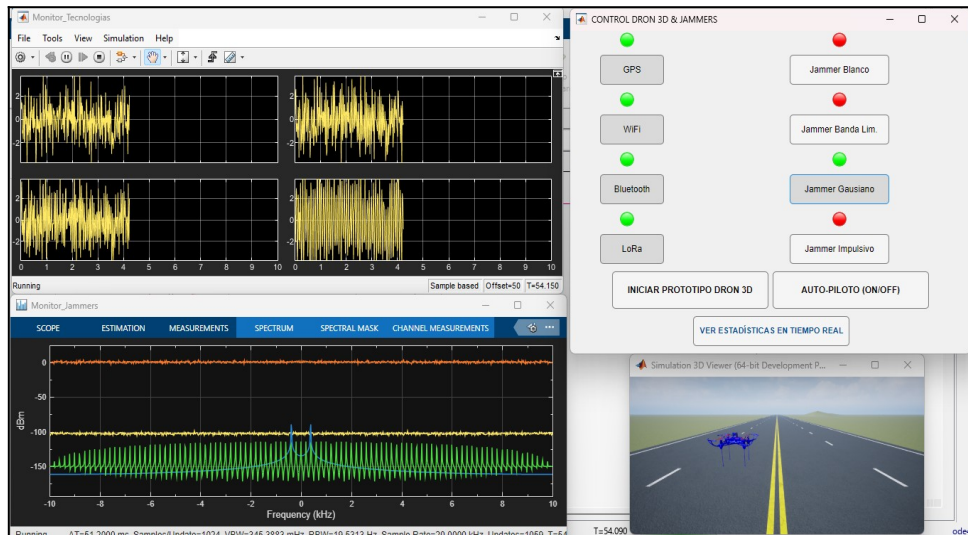


Figura 67. Jammer de ruido gaussiano y tecnologías del dron

Aquí se muestra la representación de la activación del jammer gaussiano. Mientras que el ruido blanco (el cual cubre todas las frecuencias por igual) y el jammer de banda limitada (el cual es un tono) presentan características específicas, el ruido gaussiano se define como tener una distribución de amplitud con una curva en forma de campana (distribución de gauss), cubriendo un ancho de banda específico, pero siendo aleatorio.

Desde la ventana inferior del espectro se puede ver como la señal (línea naranja) crea un aumento del nivel de ruido dentro de un área específica del espectro, con picos los cuales son menos afilados en comparación con el jammer de banda limitada pero más densos que el ruido blanco común. El problema con el tipo de interferencia se debe a que es bastante eficaz porque se comporta como el ruido térmico natural del propio receptor siendo difícil de distinguir y filtrar. En resumen, mientras el jammer de banda limitada intenta ahogar una frecuencia el jammer gaussiano intenta ocultar la señal. Por lo tanto, el sistema de dron tendrá problemas para entender la diferencia entre la información válida y el ruido el cual es una manera muy sutil de socavar la estabilidad de la conexión.

4.1.6. Resultados estadísticos presentados en el software

En esta parte proporcionaremos los resultados del análisis estadístico bajo la influencia de un generador de ruido de jammer gaussiano, mostrando una alta vulnerabilidad de las conexiones GPS, Wi-Fi y Bluetooth ante el mencionado ruido aleatorio. Sin embargo, en contraste a esto el sistema de prueba demuestra la eficiencia de la tecnología LoRa continúa funcionando debido a su modulación de espectro ancho (CSS).

Los resultados obtenidos para el generador de ruido gaussiano demuestran un caso intermedio cuando el daño ocurre con mucha severidad, lo cual se puede observar en la imagen presentada en la **Figura 68**. El sistema arroja un resultado de 85% de degradación para el GPS y esto es especialmente importante porque sin la referencia de posicionamiento global el dron tendrá que depender únicamente de los sistemas inerciales (acelerómetros y giroscopios) los cuales experimentan un desvío y una acumulación de errores.

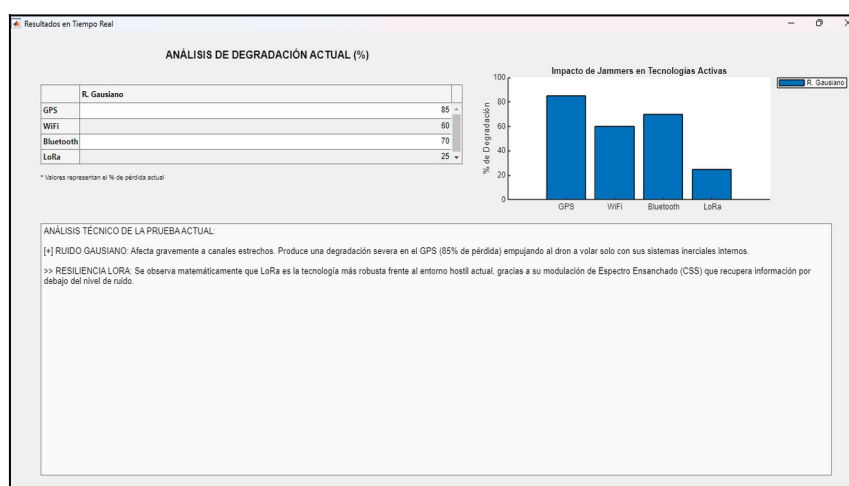


Figura 68. Resultados estadísticos presentados en el software

Como siempre el análisis técnico demuestra la superioridad de LoRa en estas condiciones. La degradación de tan solo un 25% muestra la confiabilidad de esta

tecnología capaz de establecer un enlace de telemetría cuando todas las demás tecnologías han fallado. Debe destacarse que lo crucial aquí es el uso del procesamiento de señales mediante el esparcimiento de espectro de banda ancha (CSS). Esto significa el esparcimiento de la información en una banda ancha de frecuencias seguido de la aplicación del algoritmo de correlación al lado del receptor, lo cual permite el filtrado de ruido gaussiano y la obtención de la información original aun cuando la potencia de la interferencia sea significativamente superior a la útil.

4.1.7. Jammer de ruido impulsivo y tecnologías del dron

Aquí realizamos el análisis del experimento del generador de ruido de chispas. El ruido de chispas se diferencia de otros tipos de ruidos en lugar de interferir continuamente ocurre en ráfagas discretas de alta intensidad.

El inicio del emisor impulsivo genera pulsos de niveles de energía elevados los cuales comprometen la integridad de la comunicación a través de la corrupción de bits esenciales de datos y no un bloqueo continuo cuyo objetivo es saturar el canal permanentemente. Según el diagrama espectral esta forma de bloqueo se caracteriza por pulsos de frecuencias que cubren todo el ancho de banda y por lo tanto es muy dañina para los protocolos de comunicación donde la velocidad es importante y dependen de la secuencia y el orden de los bits como se muestra en la **Figura 69**.



Figura 69. Resultados de interacción entre jammer y tecnologías del dron.

4.1.8. Resultados estadísticos presentados en el software

En esta sección se presenta el análisis estadístico del impacto del ruido impulsivo, el cual provoca una degradación moderada traducida en una pérdida de paquetes del 30-40% y una latencia severa en el control del dron.

Los resultados del ataque de interferencia impulsiva en la simulación demuestran tener un comportamiento completamente distinto al de los anteriores, con una degradación del 15% al 40% presentada en la **Figura 70**. En vez de bloquear completamente la comunicación entre el emisor y el receptor como los métodos anteriores el tipo de interferencia degrada la integridad de los paquetes de datos debido a las ráfagas de alta potencia intermitentes de las señales, lo cual resulta operativamente en un "retraso" o una latencia significativa de los comandos de control.

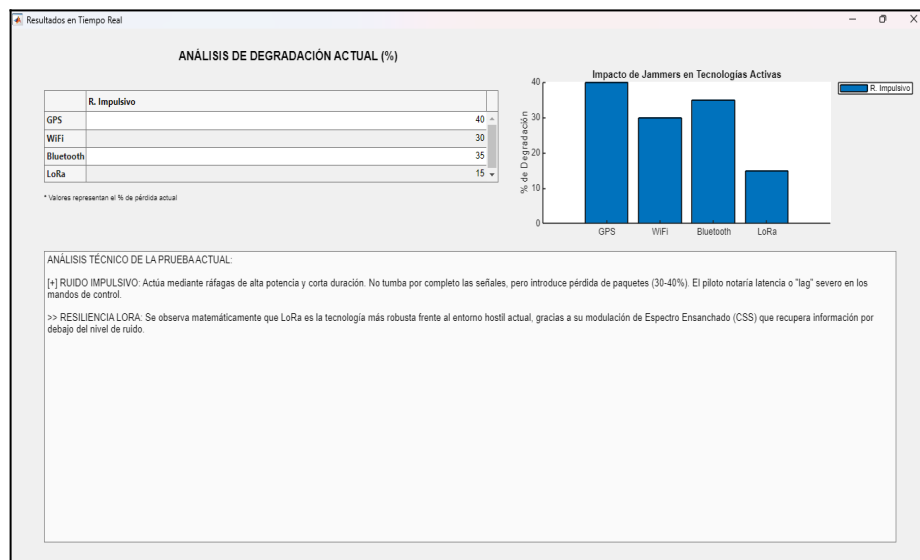


Figura 70. Resultados estadísticos presentados en el software

El análisis de la resistencia a la interferencia del programa nuevamente demuestra la superioridad de la tecnología LoRa en comparación con las demás utilizadas para la comunicación mostrando una degradación mínima del 15%. Esto se

puede explicar por el hecho de que la modulación de banda LoRa (CSS) y las capacidades de procesamiento hacen posible la reconstrucción del paquete de información aun cuando los datos de él hayan sido parcialmente borrados por el impulso, a diferencia de los convencionales Wi-Fi y Bluetooth que no pueden cumplir con esta tarea sin perder la mayor parte de la información.

Al comparar todas las técnicas de interferencia probadas, se puede deducir que el interferidor de banda limitada resultó ser el más destructivo para el rendimiento del dron debido a la capacidad total de bloquear la señal (100% en enlaces críticos) pero el impulsivo es el más complicado de usar debido a la generación de la inestabilidad y las latencias en los comandos. El análisis de los resultados demuestra que LoRa proporciona la mejor protección contra las interferencias de cualquier tipo debido a su arquitectura de espectro de banda ancha.

4.1.9. Jammers y tecnologías del dron

Esta parte analiza el caso de estudio de la saturación al activar simultáneamente todos los generadores de interferencia en los sistemas de comunicación del dron. El análisis del estrés electromagnético evalúa el límite del rendimiento del sistema en caso de una situación de guerra electrónica completa, ayudando a determinar qué protocolos pueden tener un mínimo de resistencia cuando son expuestos a una combinación de ruido como se muestra en la **Figura 71**.



Figura 71. Resultados de interacción entre todos los jammers y tecnologías del dron.

De inmediato el encendido de todos los jammers muestra el escenario más extremo en cuanto a la interferencia electromagnética donde el ambiente se satura con la superposición de ruido blanco, señales de banda estrecha, ruido gaussiano y pulsos de impulso. Así la combinación anula las capacidades de comunicación en términos del aumento del nivel de ruido y la fragmentación de la integridad de los datos en todas las frecuencias causando un colapso total de las conexiones a través de los protocolos Wi-Fi y Bluetooth, así como del sistema de navegación GPS debido a la falta de posición.

Por lo tanto, las pruebas actuales demuestran que en el caso de un ataque masivo multi vectorial la única forma de asegurar la supervivencia del dron es el uso de un protocolo de baja velocidad con alta resistencia espectral.

4.1.10. Resultados estadísticos presentados en el software

En esta sección se presenta la comparativa estadística definitiva del desempeño de las tecnologías del dron bajo los distintos perfiles de interferencia analizados.

La comparación exhaustiva entre los cuatro tipos de técnicas de interferencia demuestra que el jammer de ancho de banda limitado representa el tipo más peligroso de interferencia para el funcionamiento del dron logra una saturación completa en las

comunicaciones de alta velocidad y un bloqueo casi completo del GPS, inhabilitando al dron para realizar sus misiones primarias como se ilustra en la **Figura 72**.

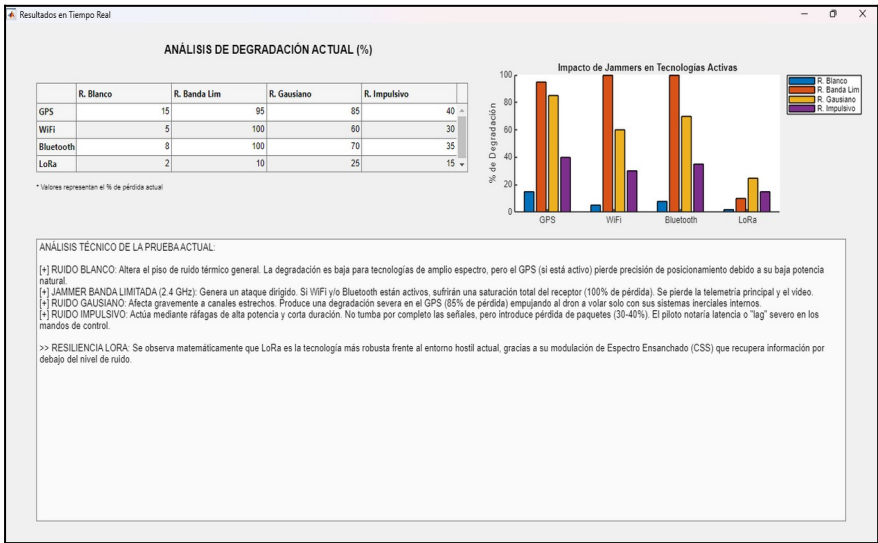


Figura 72. Resultados estadísticos presentados en el software.

Por otro lado, los jammers gaussianos e impulsivos representan tipos de interferencia de degradación progresiva que deterioran la calidad de la señal forzando al dron a realizar operaciones en situaciones inciertas, operaciones retrasadas o depender de los sistemas de navegación inercial los cuales probablemente generen errores acumulativos.

No obstante, los resultados constantemente demuestran la superioridad de la tecnología LoRa cuya modulación de espectro de banda ancha (CSS) asegura una alta confiabilidad de la comunicación incluso en el ambiente espectral más peligroso. Por lo tanto, el éxito de la misión de un dron en dicho ambiente no depende de la inmunidad sino más bien de la redundancia al combinar técnicas de comunicación de telemetría de baja velocidad con la máxima resistencia al jammer.

4.1.11. Comparación de los cuatro jammers

En la **Tabla 7**, se muestra la comparativa definitiva sobre el desempeño de las tecnologías basadas en los escenarios de interferencia discutidos, dando la oportunidad de evaluar la resiliencia del sistema en su conjunto. El siguiente resumen técnico empírico muestra que, en condiciones de ruido blanco, banda limitada, ruido gaussiano e impulsivo la tecnología LoRa sobresale sobre todos los demás protocolos en cuanto a la confiabilidad, tiene un grado considerablemente menor de degradación que el GPS, Wi-Fi y Bluetooth.

Tabla 7. Comparativa de degradación por tecnología

Comparativa de degradación por tecnología (%)				
Tecnología	Ruido blanco	Banda limitada	Ruido gaussiano	Ruido impulsivo
(1500 MHz)	15	95	85	40
Wi-Fi (2400 MHz)	5	100	60	30
Bluetooth (2402 MHz)	8	100	70	35
LoRa (915 MHz)	2	10	25	15

La comparación demuestra que el jammer de banda limitada es la amenaza más peligrosa e importante para las tecnologías de drones convencionales en cuanto a la destrucción total de los sistemas de comunicación al 100% en los canales Wi-Fi y Bluetooth, como resultado de la concentración de toda la energía de jammer en la frecuencia de operación. Sin embargo, en el caso de los jammer gaussianos e impulsivos el nivel del efecto destructivo es intermedio en el cual el gaussiano es más peligroso para la precisión del GPS y el impulsivo el más complejo para la estabilidad del control a través de la

introducción de periodos de latencia.

Como se puede ver la tecnología LoRa es la más resistente al ataque entre otras, teniendo los niveles mínimos de pérdida incluso en las peores condiciones. Así esta diferencia demuestra el hecho de que el éxito del ataque está determinado por la influencia directa del jammer sobre el ancho de banda del canal correspondiente; sin embargo, la resistencia del canal de comunicación contra las amenazas sólo es posible a través de la utilización de los protocolos de espectro de banda ancha.

CONCLUSIONES

Se ha establecido un modelo teórico y matemático necesario para transmitir, recibir muestras y visualizar el nivel de energía en el sistema.

Se ha creado un modelo matemático para evaluar la degradación de la comunicación usando parámetros como potencia recibida, SNR y BER.

Se ha diseñado una arquitectura modular en MATLAB/Simulink para integrar la señal, las interferencias y el equipo virtual.

Se ha implementado una interfaz para la tecnología, generadores de interferencias, control del estado de vuelo y visualización de resultados.

Se ha parametrizado el entorno de simulación para evaluar diferentes situaciones de interferencia en el enlace de comunicación.

Se ha verificado que el aumento de las interferencias electromagnéticas afecta negativamente la calidad y el desempeño del enlace de comunicación.

RECOMENDACIONES

Implementar enlaces de telemetría redundantes basados en LoRa: Dado que la modulación de espectro extendido (CSS) ha sido confirmada como la tecnología más resistente contra todos los dispositivos de interferencia es importante utilizar el CSS como canal de seguridad de la comunicación para transmitir datos críticos de telemetría los cuales ayudarán a recuperar el dron en caso de que los enlaces principales (Wi-Fi/Bluetooth) están interferidos.

Implementar sistemas de navegación inercial de alta precisión (IMU): Dado que el GPS es extremadamente vulnerable contra los jammers de ancho de banda limitado y los jammers gaussianos es necesario equipar al dron con sensores inerciales sofisticados y algoritmos de filtrado (por ejemplo, los filtros de kalman) que le proporcionen al dron la capacidad de estimar su posición usando el cálculo de la posición por deducción durante un periodo de tiempo extendido.

Desarrollar protocolos de salto de frecuencia: Para contrarrestar el impacto de la interferencia en los enlaces Wi-Fi/Bluetooth en caso de una pérdida del 100% de los canales debido a la interferencia de ancho de banda limitado es necesario implementar en el sistema de control las técnicas de espectro extendido de salto de frecuencia las cuales requerirán que el interferidor cubra un ancho de banda significativamente más amplio y reduzca la efectividad de la interferencia.

Implementar filtros de supresión de ruido e interferencia en la entrada: Para contrarrestar la inestabilidad y la latencia causada por el interferidor impulsivo se recomienda implementar filtros de preselección en los receptores RF y algoritmos de corrección de errores más sofisticados los cuales reconstruirán los paquetes de datos destruidos por impulsos de alta energía.

REFERENCIAS

- [1] Data Alliance, «Drones: las tecnologías inalámbricas que permiten la operación y el control,» 06 03 2026. [En línea]. Available: <https://www.data-alliance.net/es/drones-las-tecnolog%C3%ADas-inal%C3%A1mbricas-que-permiten-la-operaci%C3%B3n-y-el-control>. [Último acceso: 05 2026].
- [2] J. S. S. y. G. T. Y. Zidane, «Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study,» 10 12 2024. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/12/743>. [Último acceso: 05 2026].
- [3] Federal Communications Commission (FCC), «Jammer Enforcement: Laws, Regulations and Legal Constraints on Interference Devices,» 20 04 2020. [En línea]. Available: <https://www.fcc.gov/general/jammer-enforcement>. [Último acceso: 05 2026].
- [4] IEEE, «"Document 10461115",» Diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10461115>. [Último acceso: 06 2026].
- [5] K. Z. C. S. C. L. S. L. y. B. W. X. Tang, «Graph Attention Network-Driven Hierarchical Learning for Anti-Jamming UAV Communications,» 14 octubre 2025. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11203882>. [Último acceso: 05 2026].
- [6] o. G. P. y. M. Salehi, Digital Communications, Tallinn: McGraw-Hill

Higher Education, 2019.

- [7] IEEE., «"IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking",» 08 marzo 2026. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=7511293>. [Último acceso: 2026].
- [8] Analog Devices Inc., «How Error Vector Magnitude (EVM) Measurement Improves Your System-Level Performance,» 1 04 2021. [En línea]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/how-evm-measurement-improves-system-level-performance.html>. [Último acceso: 06 2026].
- [9] «Studies on Novel Anti-jamming Technique of Unmanned,» p. 8, 26 diciembre 2021.
- [10] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT / ITU), «Spectrum Monitoring and Interference Management,» 12 11 2022. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/spectrum/Pages/spectrum-monitoring.aspx>. [Último acceso: 06 2026].
- [11] Dirección General de Aviación Civil., «Inducción al uso de drones en el Ecuador,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.aviacioncivil.gob.ec/inducccion-al-uso-de-drones-en-el-ecuador/>. [Último acceso: 05 2026].
- [12] IEEE, «ieeexplore.ieee.org,» 08 marzo 2024. [En línea]. Available:

- <https://ieeexplore.ieee.org/document/10461115>. [Último acceso: 06 2026].
- [13] IEEE, «Comunicación UAV contra interferencias inteligentes: un enfoque de juego Stackelberg con aprendizaje por refuerzo federado,» 04 diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10461115>.
- [14] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)., «"Blog Entry 1553849310660 - Blog Copernicus",» marzo 2019. [En línea]. Available: inta.es/INTA/eu/blogs/copernicus/BlogEntry_1553849310660. [Último acceso: 05 2026].
- [15] EGUTZ., «"GT2 Dron cuadricóptero",» 2026. [En línea]. Available: https://egutz.com/tienda/inicio/26-GT2_Dron_cuadricoptero.html. [Último acceso: 15 06 2026].
- [16] JSHTEEA / Walmart México, «2.4GHz FPV RC Drone 3D Flip 4 Canales Drone Plegable Altitude Hold,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.walmart.com.mx/ip/2-4ghz-fpv-rc-drone-3d-flip-4-canales-drone-plegable-altitude-hold-para-principiantes-jshteea-el-nuevo/00487167780296>.
- [17] Dronecode Foundation / PX4 Autopilot, «Basic Concepts: Flight Controller and ESC Architecture in UAVs,» 15 01 2024. [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/getting_started/px4_basic_concepts.html. [Último acceso: 06 2026].
- [18] MBS Direct / MBS Books., «MBS Books,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.mbsbooks.com/>. [Último acceso: 2026].
- [19] TechTarget, «What is Wireless Communications? Definition and

- Overview,» 15 04 2023. [En línea]. Available:
<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/wireless>. [Último acceso: 06 2026].
- [20] Keysight Technologies, «RF Fundamentals: Modulation, Frequency Conversion, and Signal Transmission,» 14 02 2023. [En línea]. Available:
<https://www.keysight.com/us/en/solutions/wireless-communications/rf-fundamentals.html>. [Último acceso: 06 2026].
- [21] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT / ITU-R), «Technical and Operational Characteristics of Wireless Access Systems in Unlicensed ISM Bands,» 10 10 2023. [En línea]. Available:
<https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/fms/Pages/ISM.aspx>. [Último acceso: 06 2026].
- [22] ArduPilot Dev Team, «Telemetry and Command Data Links for Unmanned Aerial Vehicles,» 18 02 2024. [En línea]. Available:
<https://ardupilot.org/copter/docs/common-telemetry-landingpage.html>. [Último acceso: 06 2026].
- [23] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT), «Uso del espectro radioeléctrico en bandas ISM y tecnologías sin licencia,» 10 05 2022. [En línea]. Available: <https://www.coit.es/publicaciones/tecnologia/bandas-ism-24-ghz-regulacion-y-usos>. [Último acceso: 06 2026].
- [24] Agencia Nacional del Espectro (ANE), «Análisis técnico del comportamiento de enlaces radioeléctricos en UAVs sobre bandas de uso libre de 2.4 GHz,» 14 11 2023. [En línea]. Available:
<https://www.ane.gov.co/publicaciones/tecnica/enlaces-uav-bandas-ism-2.4ghz>.

[Último acceso: 06 2026].

- [25] C. A. R. y. M. E. Jiménez, «Modelado y evaluación del desempeño de enlaces inalámbricos en UAVs frente a interferencias electromagnéticas en MATLAB/Simulink,» 2023 03 15. [En línea]. Available: <https://riai.isa.upv.es/article/view/uav-wireless-emi-matlab-simulation>. [Último acceso: 06 2026].
- [26] Wi-Fi (IEEE 802.11), «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,"» 11 2020. [En línea]. Available: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-certified-6>. [Último acceso: 05 2026].
- [27] U.-A. C. C. w. Deep, «arxiv.org,» 26 abril 2019. [En línea]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1805.06628>.
- [28] Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), «Arquitectura de la tecnología Bluetooth y mecanismo FHSS en la banda ISM de 2.4 GHz,» 12 07 2023. [En línea]. Available: <https://www.bluetooth.com/es/learn-about-bluetooth/tech-overview/fhss-architecture>. [Último acceso: 06 2026].
- [29] Agencia Espacial Europea (ESA), «Fundamentos de navegación por satélite: Arquitectura GNSS, GPS y principios de trilateración,» 20 05 2023. [En línea]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Fundamentals. [Último acceso: 06 2026].
- [30] Semtech Corporation, «AN1200.22: LoRa Modulation Basics,» 03 2021. [En línea]. Available:

- <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect>. [Último acceso: 2026].
- [31] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), «Análisis de vulnerabilidad por interferencia electromagnética (EMI) y jamming en enlaces radioeléctricos de VANTs,» 18 10 2023. [En línea]. Available: <https://www.inta.es/publicaciones/tecnologia/vulnerabilidad-emi-jamming-uav-rf>. [Último acceso: 06 2026].
- [32] Newhaven Display, «Interferencia Electromagnética (EMI) / EMI (Electromagnetic Interference),» 02 2023. [En línea]. Available: <https://newhavendisplay.com/es/blog/emi-electromagnetic-interference/>. [Último acceso: 2026].
- [33] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), «Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM),» ETSI Standards, 09 2022. [En línea]. Available: <https://www.google.com/search?q=https://www.etsi.org/technologies/electromagnetic-compatibility>. [Último acceso: 05 2026].
- [34] Asociación Española de Normalización (AENOR), «Principios de Compatibilidad Electromagnética (CEM): Normalización, límites de emisión e inmunidad en sistemas de telecomunicación,» 22 01 2024. [En línea]. Available: <https://www.aenor.com/normas-y-publicaciones/tecnologia/compatibilidad-electromagnetica-cem-normativa>. [Último acceso: 06 2026].
- [35] Matan, «¿Qué es la interferencia electromagnética (EMI)?,» 11 junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/es/que-es->

la-interferencia-electromagnetica-emi/. [Último acceso: 06 2026].

- [36] Goldsmith, A., «Wireless Communications. Cambridge University Press.,» 2019.
- [37] Universidad Politécnica de Madrid (UPM) – Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, «Caracterización de fuentes de ruido electromagnético y modelado de canales AWGN en radiocomunicaciones,» 18 06 2023. [En línea]. Available: <https://ocw.upm.es/departamentos/ssrr/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones/ruido-awgn-caracterizacion>. [Último acceso: 06 2026].
- [38] Universidad Politécnica de Valencia (UPV) – Departamento de Comunicaciones, «Evaluación del impacto del ruido térmico y la interferencia por jamming en la BER y EVM de receptores digitales,» 25 09 2023. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/telecomunicaciones-ber-evm-jamming>. [Último acceso: 06 2026].
- [39] Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) – Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, «Análisis de la relación SINR, BER y EVM en presencia de técnicas de jamming e interferencia intencionada,» 14 11 2023. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/jamming-sinr-ber-evm-telecom>. [Último acceso: 06 2026].
- [40] Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA), «RF Jamming Mitigation Guide,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.google.com/search?q=https://www.cisa.gov/resources-tools/resources/rf-jamming-mitigation>. [Último acceso: 20 06 2026].

- [41] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT - UPM), «Técnicas de inhibición de radiofrecuencia (Jamming): Análisis comparativo de Single-Tone, Sweep Jamming y Banda Ancha,» 08 02 2024. [En línea]. Available: <https://www.etsit.upm.es/catedra-ge/tecnicas-jamming-sweep-broadband-analisis>. [Último acceso: 06 2026].
- [42] VodaSafe, «VodaSafe Official Site, "Dispositivo móvil de bloqueo de alta potencia de 90 W con radio de cobertura de 100 m,"» 05 2026. [En línea]. Available: <https://es.vodasafe.com/products/dispositivo-m%C3%B3vil-de-bloque-de-alta-potencia-de-90-w-con-radio-de-cobertura-de-100-m-286>. [Último acceso: 05 2026].
- [43] Alasartech Security, «Medium Power Desktop Jammer,» 06 2026. [En línea]. Available: <https://es.alasartech-security.com/signal-jammer/medium-power-desktop-jammer/>. [Último acceso: 2026].
- [44] Instituto Universitario Militar de Las Fuerzas Armadas / Departamento de Telecomunicaciones, «Caracterización técnica de inhibidores de radiofrecuencia: Barrage Jamming y su impacto en sistemas radiocontrolados,» 05 04 2024. [En línea]. Available: <https://www.publicaciones-defensa.es/telecomunicaciones/barrage-jamming-analisis-espectral-e-impacto>. [Último acceso: 06 2026].
- [45] Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), «Arquitectura de enlaces radioeléctricos en UAVs y vulnerabilidad frente a entornos radioeléctricos severos,» 12 05 2024. [En línea]. Available: <https://www.cdti.es/publicaciones/telecomunicaciones/uav-enlaces-rf->

vulnerabilidad-ruido. [Último acceso: 06 2026].

- [46] IEEE Sección España – Sociedad de Comunicaciones, «Efectos de la interferencia electromagnética en la degradación del margen de enlace y la cobertura en comunicaciones inalámbricas,» 10 10 2023. [En línea]. Available: <https://ieee.es/publicaciones/comunicaciones/emi-degradacion-margen-enlace-cobertura>. [Último acceso: 06 2026].
- [47] T. S. Rappaport, «Comunicaciones inalámbricas: Principios y práctica (2.^a ed.),» Capítulo 3: Modelado de propagación en espacio libre y canales de radiofrecuencia, Pearson Educación / Prentice Hall, 2020.
- [48] C. O. d. I. d. T. (COIT), «Modelado del canal de propagación radioeléctrica en presencia de interferencias intencionadas y ruido térmico,» 17 11 2023. [En línea]. Available: <https://www.coit.es/publicaciones/bit/modelado-canal-propagacion-jamming>. [Último acceso: 06 2026].
- [49] GeeksforGeeks, «Wireless Communications,» 17 10 2025. [En línea]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/wireless-communication-set-1/>. [Último acceso: 20 06 2026].
- [50] IEEE Communications Society (ComSoc), «Definición y formulación matemática de la relación SINR y su impacto en la capacidad del canal inalámbrico,» 2024. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/telecom-sinr-formulation-impact>.
- [51] Modelado numérico de la SINR y degradación de la BER en enlaces de radiocomunicación sometidos a interferencia intencionada, «Modelado

- numérico de la SINR y degradación de la BER en enlaces de radiocomunicación sometidos a interferencia intencionada,» 04 02 2024. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-sinr-ber-degradation-uav>. [Último acceso: 06 2026].
- [52] R. & Schwarz, «EVM Measurements on Digital Transmitters,» 2024. [En línea]. Available: https://www.google.com/search?q=https://www.rohde-schwarz.com/applications/evm-measurements-application-note_56280-15324.html. [Último acceso: 2026].
- [53] Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) – Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, «Caracterización de la calidad de modulación mediante la Magnitud del Error Vectorial (EVM) en entornos con interferencia y ruido,» 18 10 2023. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/evm-constelacion-interferencia>. [Último acceso: 06 2026].
- [54] Universidad de Sevilla – Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, «Análisis e indicadores cuantitativos de degradación de la señal en canales de comunicación inalámbrica,» 15 03 2024. [En línea]. Available: <https://idus.us.es/handle/11441/degradacion-senal-canal-inalambrico-snr-ber-evm>.
- [55] MathWorks, «Communications Toolbox: Modelado y simulación de sistemas de comunicación y procesamiento de señales en Simulink,» 15 01 2024. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/comms/ug/wireless-communications->

simulation-with-simulink.html. [Último acceso: 2026].

- [56] V. a. n. t. p. u. civil., «Barrientos, A., Colorado, J., del Cerro, J., Martínez, A., Rossi, C., Sanz, D., & Valente, J.,» 2007. [En línea]. Available: <https://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>.
- [57] «impact.ornl.gov,» 24 marzo 2019. [En línea]. Available: <https://impact.ornl.gov/en/publications/the-effect-of-electronic-jammers-on-gps-signals/>.
- [58] Óscar Reinoso García, Luis Miguel Jiménez García, Luis Payá Castelló, Arturo Gil Aparicio, Adrián Peidró Vidal, de *MATLAB: conceptos básicos y descripción gráfica*, 2018, p. 116.
- [59] A. C. J. d. C. J. M. A. R. C. S. D. & V. J. Barrientos, «webdiis,» 2007. [En línea]. Available: <https://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>.
- [60] M. Gervais, L. Philippe Lebel y J. Sebastien Plante, «ieeexplore,» ieeexplore, 2024.
- [61] la.mathworks.com, «Simscape Electrical Documentation.,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/simscape/>.
- [62] «MathWorks,» 01 enero 2025. [En línea]. Available: <https://imaginaformacion.com/tutoriales/que-es-matlab>.
- [63] John G. Proakis, McGraw-Hill, Digital Communications, 5th edition, 2008.
- [64] Paul, C. R., «Introducción a la compatibilidad electromagnética,»

<https://doi.org/10.1002/0471758159.ch1>, 2019.

- [65] Goldsmith, A., 2005. [En línea]. Available: <https://www.cambridge.org/highereducation/books/wireless-communications/AA60B0544B0619E629A9B6FF98B17161#overview>.
- [66] M. Gonzales, «Quadróptero Vs Hexacóptero:», Filmora, 23 03 2026. [En línea]. Available: <https://filmora.wondershare.com/drones/best-hexacopter-drones.html>. [Último acceso: 06 2026].
- [67] soloingenieria.org, «Dron cuadricóptero: Más potencia, control y precisión,» 02 2026. [En línea]. Available: <https://www.soloingenieria.org/ingenieria-aeroespacial/dron-cuadricoptero/>. [Último acceso: 06 2026].
- [68] R. Sargeant, «Verification and validation of simulation models,» 2013. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>. [Último acceso: 05 2026].
- [69] Deingenierias.com, «Qué es Matlab y para qué sirve | Características, aplicaciones y funciones,» 19 06 2026. [En línea]. Available: <https://deingenierias.com/software/matlab/>. [Último acceso: 06 2026].
- [70] S. S. A. M. H. S. A. C. L. R. H. P. M. A. Armghan et al. (Debido a que el artículo cuenta con más de 6 autores: Ammar Armghan, «DownLink amplified loss function module for 5G air to terrestrial communication networks,» 17 septiembre 2025. [En línea]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12443324/table/pone.0332303.t002>

/. [Último acceso: 06 2026].

- [71] F. Cano, «¿Qué son los jammers? Todo lo que debes saber,» 07 abril 2025. [En línea]. Available: <https://www.ubiqo.net/otra/jammers/>. [Último acceso: 2026].
- [72] ARCOTEL (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones)., «Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec>. [Último acceso: 2026].
- [73] R. Keim, «The Nyquist–Shannon Theorem: Understanding Sampled Systems,» 06 mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/nyquist-shannon-theorem-understanding-sampled-systems/>. [Último acceso: 2026].
- [74] A. F., Interviewee, *Análisis de un método anti-interferencia basado en aprendizaje profundo para la comunicación con UAV*. [Entrevista]. 26 junio 2024.
- [75] Enerted Ingeniería., «"Interferencia Electromagnética: ¿Qué es y cómo afecta el cableado estructurado?"», 15 octubre 2024. [En línea]. Available: <https://enertedingenieria.com.co/interferencia-electromagnetica/>. [Último acceso: 06 2026].
- [76] A. y. S. G. F. A. M. Nayeem, «zenodo,» 11 junio 2025. [En línea]. Available: <https://zenodo.org/records/15641058>. [Último acceso: 2026].
- [77] Colaboradores de Wikipedia, «"Cuadricóptero",» 09 febrero 2026. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?>

title=Especial:Citar&page=Cuadric%C3%B3ptero&id=171972380&wpFormI
dentifier=titleform. [Último acceso: 2026].

- [78] G. F. y. T. Asir, «"Jamming of Spread Spectrum",» junio 2012. [En línea]. Available: <https://hal.science/hal-00728587v1>. [Último acceso: 05 2026].
- [79] W. Castle., «"Banda ISM de 2.4 GHz",» 29 noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://wraycastle.com/es/blogs/knowledge-base/2-4-ghz-ism>. [Último acceso: 2026].
- [80] C. R. Paul, «"Introduction to Electromagnetic Compatibility",» 16 abril 2010. [En línea]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470664797?msocid=2de9233e5ce76826175234ad5dfc6922>. [Último acceso: 2026].
- [81] J. M. N. Díaz, «"Capítulo 3: Fundamentos teóricos y marco conceptual",» 07 2024. [En línea]. Available: https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/nocedal_d_jm/capitulo3.pdf. [Último acceso: 06 2026].
- [82] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL)., «"Plan Nacional de Frecuencias (PNF V.6.0)",» 14 07 2021. [En línea]. Available: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf. [Último acceso: 04 2026].
- [83] R. G. Sargent, «Verification and validation of simulation models»,

Journal of Simulation, vol. 7, nº 1, pp. 12 - 24, 2013.

- [84] A. Walton, «Jamming (Interferencia Intencionada): Una Seria Amenaza para Redes y Dispositivos Inalámbricos,» 30 junio 2025. [En línea]. Available: <https://ccnadesdecero.es/jamming-interferencia-intencionada/>. [Último acceso: 2026].
- [85] DIJI, «DJI released its new Spreading Wings S1000 octocopter drone,» DJI Newsroom, 02 febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.dji.com/newsroom/news/dji-released-its-new-spreading-wings-s1000-octocopter-platform>. [Último acceso: 04 2026].
- [86] Com-Power Corporation, «Why EMI/EMC Testing is Necessary,» 10 02 2023. [En línea]. Available: <https://www.com-power.com/blog/why-emi-emc-testing-necessary>. [Último acceso: 05 2026].