

Determinación y Pruebas de los Requerimientos Mínimos Para Un Sistema De Data Link Para Aeronaves no Tripuladas

Medina-Pazmiño, Wilson¹; Jara-Olmedo, Aníbal²

¹Escuela Politécnica Nacional Proyecto EPN-FAE-UAV.

²Proyecto EPN-FAE-UAV.

Resumen: En este documento se realizan los cálculos de requerimientos mínimos en relación a frecuencia portadora, pérdidas de propagación, ganancia de antenas, sensibilidad de los equipos de comunicación, parámetros que permitirán configurar un equipo de data link que será implementado en un sistema aéreo no tripulado (UAS). Se analiza los distintos dispositivos que irán a bordo de la aeronave para determinar cuáles deben ser conectados al sistema Data Link, la distancia a la que debe llegar el enlace de datos, las condiciones de terreno en las que se realizarán los vuelos, los parámetros que afectarán las comunicaciones y las pruebas de campo realizadas para la aeronave.

Palabras clave: Data link, UAS, Frecuencia Portadora, Pérdidas, Alcance.

Determination and Test of Minimum Requirements for a Data Link Communication System for Unmanned Aerial Vehicles

Abstract: In this paper we perform the calculations of minimum requirements in relation with carrier frequency, loss propagation, gain antenna, sensitivity communication of equipment. These parameters allow to configure a system of DataLink to be implemented in an air unmanned system (UAS). The equipment is analyzed to develop the project and to determine which of these should be connected to Data Link system. Also is discussed the distance of coverage, the field conditions in which the operation is carried out, parameters affecting communications and flight tests.

Keywords: Data link, UAS, Carrier Frequency, Losses, Range.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del proyecto es, mediante un UAV, inspeccionar áreas y superficies de terreno la cuales deben ser observadas en detalle. Los acontecimientos que se produzcan durante el vuelo deben ser conocidos, en tiempo real, por el grupo operador que se encontrará ubicado en un punto remoto a varios kilómetros de distancia. El sistema debe ser autónomo en el cumplimiento de las tareas encargadas y además se debe monitorear el rendimiento de la aeronave (UAS). Para las pruebas del presente trabajo se hace referencia a los factores condicionantes en un sistema de comunicaciones inalámbricas previamente determinado. Se utiliza métodos y resultados de investigaciones previas que determinan las condiciones mínimas para tener señal de enlace tal como se detalla en (Medina-Pazmiño, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016). Se consideran los siguientes factores:

- Potencia de transmisión y recepción
- Calidad de conectores
- Longitud y calidad de cable coaxial
- Ganancia y tipos de antenas
- Distancia entre antenas
- Zona de Fresnel

- Condiciones de terreno y meteorología

Este documento analiza **los Equipos a bordo de la aeronave**, pues se deben considerar varios sistemas que permitirán realizar el vuelo de forma segura y autónoma. En la sección 3 se realiza un estudio de presupuesto de enlace de datos basados en el análisis de (Medina-Pazmiño, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016), determinando altura de antenas, condiciones de operación, máximo alcance de diseño y otros parámetros que afectan a las comunicaciones. Finalmente en la sección 4 y 5 se establece **Pruebas de funcionalidad y Resultados** finalizando en la sección 6 con **Conclusiones y análisis de resultados obtenidos**.

2. METODOLOGÍA

Equipos a bordo de la aeronave.

Los objetivos de proyecto son:

- ✓ Observación y reconocimiento
- ✓ Autonomía en el vuelo
- ✓ Monitoreo del rendimiento del sistema UAS

Observación y reconocimiento es realizado mediante uno o varios sensores de visión (sensores electro-ópticos), como lo mencionan (Austin, 2010) ("T-STAMP, Miniature UAV Payload, Gyro Stabilized Cameras", 2015), los mismos que permitirán tener imágenes de la zona en inspección.

Autonomía en el vuelo (Flickenger, 2006) corresponde a sistemas a bordo que permiten que la aeronave se mantenga en el aire de forma independiente en la navegación durante la realización de las tareas.

Monitoreo de equipos a bordo de la aeronave se refiere a la medición de las variables físicas que se presentan en los distintos sistemas que forman parte del UAS, esto abarca los sistemas de propulsión, combustible, energía, y cualquier otro sistema que se presente durante el desarrollo.

La Figura 1 muestra el planteamiento del proyecto en base a la tendencia del uso de dos vías de comunicación para el enlace de subida y enlace de bajada como lo estudia (Jain, & Templin, 2012).

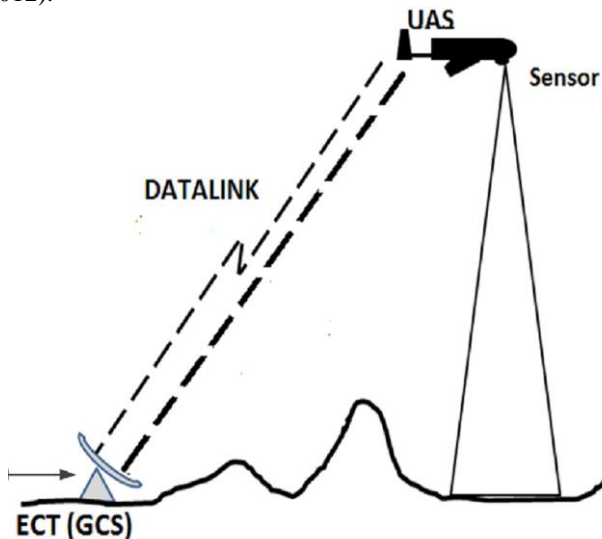


Figura 1. Representación macro del proyecto a desarrollar

El sistema que realiza las funciones de Data Link está en la capacidad de adquirir información que se genera en la aeronave, proveniente de cualquiera de los sistemas que van a bordo de la aeronave Figura 2, puede procesarla, empaquetarla y transmitirla a la estación que se encuentre en tierra y entregarla al destinatario final. El sistema de enlace de datos cuenta con entradas de interfaces de comunicaciones como RS-232, RS-485, Ethernet, RS422 y entradas de video.

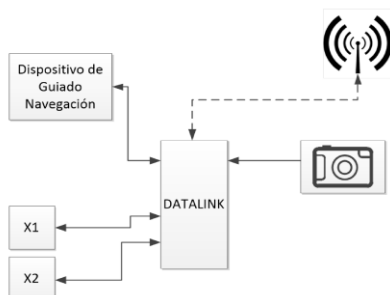


Figura 2. Estructura física del Sistema de Data Link a bordo de la aeronave

3. PARÁMETROS DE RADIO ENLACE

El sistema debe disponer como una interfaz de comunicación, la cual será el medio por el cual se transmitirá los datos y señales análogas y/o digitales que se produzcan en la aeronave. En el caso de ser necesario se realizará una red interna en la aeronave para poder obtener las señales de los distintos sistemas a instalarse.

Enlace

En esta sección se calcula el presupuesto de enlace partiendo de la siguiente relación.

$$\begin{aligned} \text{Señal recibida} = & \\ & + \text{Potencia Tx} \\ & - \text{Pérdida de cable Tx} \\ & + \text{Ganancia Tx} \\ & - \text{Pérdida de trayectoria por el espacio libre} \\ & + \text{Ganancia de Rx} \\ & - \text{pérdida de cable Rx} \end{aligned}$$

La prueba planeada establece como alcance máximo 150 Km de distancia desde el punto remoto hacia la estación terrena. A continuación se va a desarrollar el análisis necesario para establecer un radio enlace ente dos puntos tomando como referencia (Medina-Pazmiño, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016) y realizando modificaciones en ciertos parámetros para alcanzar una distancia superior a la ya anteriormente establecida en (Medina-Pazmiño, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016). Se plantea la altura a la que se debe poner las antenas, un presupuesto de enlace analizando el transmisor, el medio de transmisión y el receptor.

Alcance

La geometría de la tierra influye en la estimación del alcance de comunicación. La figura 3 muestra el horizonte de radio y el horizonte óptico parámetros a considerar en los cálculos del alcance.

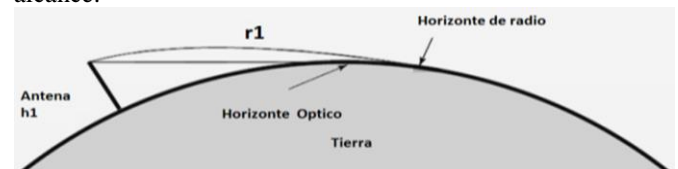


Figura 3. Horizonte óptico y de radio

Línea de vista: es el camino que existe entre una antena transmisora y la antena receptora pero libre de obstáculos Ecuación (1). Para el cálculo se debe considerar el efecto de la curvatura de la tierra. Considerando el factor de la curvatura de la tierra se aplica la Ecuación (2).

El horizonte óptico.

$$r1 = 3,57\sqrt{h1} \quad (1)$$

Dónde:

$r1 = \text{Km}$

$h1 = \text{m}$

Horizonte de radio

$$r1 = 3,57\sqrt{Kh1} \quad (2)$$

$r1 = \text{distancia del transmisor al horizonte (Km)}$

$h1 = \text{altura de la antena Transmisora (m)}$

$K \approx 4/3$ factor de atmosfera estándar (afectación curvatura de la tierra). El enlace es de ida y vuelta Figura 4 se realiza el cálculo completo con la Ecuación (3) mediante una suma algebraica. Con la ecuación (4) se realiza la suma algebraica de forma separada un término en sentido de ida y el otro término en el sentido de regreso de la señal de comunicaciones.

$$rt = r1 + r2 \quad (3)$$

$$rt = 3,57\sqrt{Kh1} + 3,57\sqrt{Kh2} \quad (4)$$

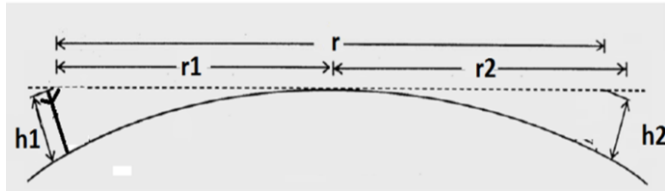


Figura 4. Alcance del radio enlace

Los cálculos realizados se los hace considerando un perfil relativamente plano. En la Tabla 1 se muestra los cálculos teóricos del alcance que se puede llegar a obtener, con la ubicación de las antenas a cierta altura.

Tabla 1. Alcance del radioenlace

r[Km]	h1[m]	h2[m]
46,28	1,5	100
63,36	1,5	200
76,46	1,5	300
87,51	1,5	400
97,25	1,5	500
106,04	1,5	600
114,14	1,5	700
121,67	1,5	800
128,74	1,5	900
135,43	1,5	1000
141,80	1,5	1100
147,88	1,5	1200
153,71	1,5	1300

Nótese que la altura de la antena 1 se mantiene fija pues es la antena receptora, la cual si bien es transportable se debe anclar en tierra, mientras que la antena 2 varía su altura al estar ubicada a bordo del UAV. Analizando la Tabla 1 se determina que para lograr tener el alcance propuesto para la presente prueba de 150 Km, el UAV debe estar a una altura de por lo menos 1.300 m sobre la estación terrena.

Pérdidas en el espacio libre.- Son las pérdidas que se dan mientras la señal viaja desde el transmisor hasta llegar al receptor Figura 5.



Figura 5. Medio de propagación

La ecuación (5) permite determinar la cantidad de energía que se pierde en el espacio.

$$Lfs = 32.45 + 20 \log(D[Km]) + 20 \log(f[MHz]) \quad (5)$$

Para la realización de los cálculos se toma la distancia que se obtiene del cálculo realizado en la Tabla 1, mientras que la frecuencia se establece en base a la tendencia de sistemas de Data Link existentes en la actualidad para UAS (Jain, & Templin, 2012) (Jain, Templin, & Sang Yin, 2011). Si bien es cierto que en el Ecuador está pendiente una regulación sobre frecuencias para sistemas UAS, se toma como referencia las existentes en el mercado internacional y en el plan nacional de frecuencias en el país. ("Plan nacional de Frecuencias Ecuador", 2012). Las frecuencias en análisis están ubicadas en la banda L y en la banda C valores establecidos en la Tabla 2. En la tabla 2 y en la Tabla 3 se muestran los cálculos de pérdidas que se pueden presentar en el enlace.

Tabla 2. Cálculos de las pérdidas en el espacio libre para frecuencias que se encuentran en la banda L

r[Km]	f[Band L] Mhrz	Lfs(1000) dB	Lfs(2000) dB
46,28	1000-2000	125,76	131,78
63,36	1000-2000	128,49	134,51
76,46	1000-2000	130,12	136,14
87,51	1000-2000	131,29	137,31
97,25	1000-2000	132,21	138,23
106,04	1000-2000	132,96	138,98
114,14	1000-2000	133,60	139,62
121,67	1000-2000	134,15	140,66
128,74	1000-2000	134,64	140,66
135,43	1000-2000	135,08	141,10
141,80	1000-2000	135,48	141,50
147,88	1000-2000	135,85	141,87
153,71	1000-2000	136,18	142,20

Tabla 3. Cálculos de las pérdidas en el espacio libre para frecuencias que se encuentran en la banda C

r[Km]	f[Band C] Mhrz	Lfs(1000) dB	Lfs(2000) dB
46,28	4000-5000	137,80	139,74
63,36	4000-5000	140,53	142,47
76,46	4000-5000	142,16	144,10
87,51	4000-5000	143,33	145,27
97,25	4000-5000	144,25	146,19
106,04	4000-5000	145,00	146,94
114,14	4000-5000	145,64	147,58
121,67	4000-5000	146,19	148,13
128,74	4000-5000	146,69	148,62
135,43	4000-5000	147,13	149,06
141,80	4000-5000	147,52	149,46
147,88	4000-5000	147,89	149,83
153,71	4000-5000	148,23	150,16

Para el cálculo de la Tabla 2 se tomó como referencia la banda L con los valores máximos y mínimos de 1.000 y 2.000 MHz

respectivamente, mientras que para la tabla 3 se tomó como referencia la banda C con los valores máximos y mínimos de 4.000 y 5.000 MHz respectivamente. La Figura 6 muestra la relación entre las pérdidas en el espacio libre y la distancia tanto en la banda L como en la banda C.

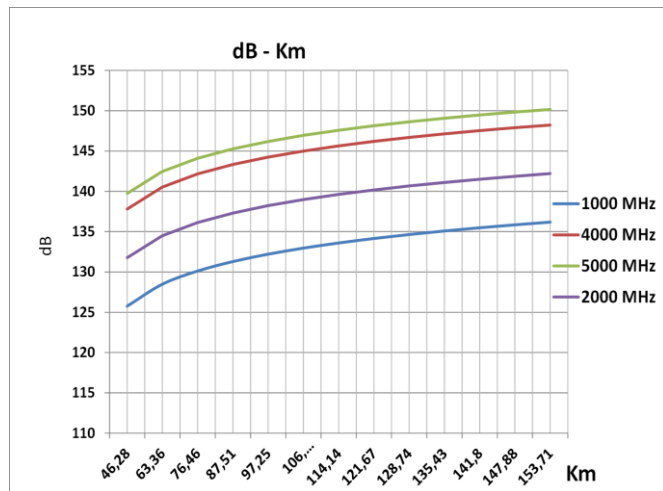


Figura 6. Pérdidas en el espacio libre en relación al alcance

Otro parámetro que influirá en el presupuesto de enlace que se lleva a cabo son las pérdidas por desvanecimiento (fading) de la señal. La Ecuación (6) permite calcular las pérdidas por desvanecimiento (Paul, 2014) (Tomasi, Mata Hernández, & González Pozo, 2003)

$$LD = 30 \log(D) + 10 \log(6ABf) - 70 - 10 \log(1 - R) \quad (6)$$

LD= Margen de desvanecimiento [dB]

D= Distancia [Km]

f= Frecuencia [GHz]

R= Confiabilidad en tanto por uno (es decir 99.99%=0.9999 de confiabilidad)

A= factor de Rugosidad puede tomar los valores: **4** sobre agua o sobre un terreno muy liso, **1** sobre terreno promedio, **0,25** sobre un terreno muy áspero y montañoso.

B=factor para convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual puede tomar los valores: **1** para pasar una disponibilidad anual a la peor base mensual, **0,5** para áreas calientes y húmedas, **0,25** para áreas continentales promedio y **0,125** para áreas muy secas y montañosas.

En la Tabla 4 se realizó cálculos de pérdidas por efecto de desvanecimiento. Para los valores límites de las bandas de frecuencia L y C y en relación a la máxima distancia que se pretende llegar.

Tabla 4. Cálculos de las pérdidas por desvanecimiento de señal

f(GHz)	D[Km]	A	B	R	LD[dB]
5	153,71	4	0,5	0,99	33,38
4	153,71	4	0,5	0,99	33,41
2	153,71	4	0,5	0,99	29,40
1	153,71	4	0,5	0,99	26,39

Con los datos teóricos de la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 se puede realizar una aproximación de un presupuesto de enlace calculando el **nivel de recepción de señal** (NRS).

Transmisor:

Potencia de transmisión [30,25 dBm]

Pérdidas en el cable [1,5 dB]

Ganancia de la antena [30 dBi]

El medio de propagación:

Pérdidas en la trayectoria [Tablas 1,2 y 3 dB]

Receptor:

- Ganancia de antena [10 dBi]
- Pérdidas en el cable [1,5 dB]
- Sensibilidad del receptor [X dBm] (este es el valor que se determinó en (Medina-Pazmiño, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016) como parámetro fundamental para la adquisición del sistema DataLink.

La suma algebraica de los parámetros descritos anteriormente Ecuación (7) da el valor de NRS, considerando un valor de margen de señal de 10 dB, siendo este valor el mínimo aceptado

$$NRS > (\text{sensibilidad del Rx} + \text{Margen}) \quad (7)$$

Con el cálculo del NRS (Nivel de recepción de señal) determinado en la Tabla 5 se obtendrá una referencia para seleccionar y configurar los equipos de comunicación. Esto permitirá determinar el valor mínimo de la sensibilidad del receptor del equipo requerido. Para los cálculos posteriores en la Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8 el análisis se enfoca en la máxima distancia pretendida en la prueba del sistema Datalink y con valores de frecuencia correspondientes a las bandas L y C debido a la tendencia de frecuencia portadora explicada anteriormente (Jain, Templin, & Sang Yin, 2011).

Tabla 5. Cálculos de la mínima sensibilidad de recepción para una frecuencia 1 GHz

Datos	Factores	Valor
Frecuencia [Ghz]	Potencia de Transmisión [dBm]	30
1	Ganancia Tx [dBi]	30
Alcance [Km]	Ganancia Rx [dBi]	10
153,71	Pérdidas Cable Conectores [dB]	3
	Pérdidas En La Trayectoria [dB]	-136.18
	NRS	-63.18
	Sensibilidad del Receptor [dBm]	-74
	Margen [dB]	10
	Σ	-64
	-63,18	-64

La mínima sensibilidad del receptor para la frecuencia de 1 GHz debe ser de -74 dBm. Con este valor teóricamente será posible establecer comunicación ente dos puntos distantes a 153,7 Km.

Tabla 6. Cálculos de la mínima sensibilidad de recepción para una frecuencia 2 GHz

Datos	Factores	Valor
Frecuencia [Ghz]	Potencia de Transmisión [dBm]	30
2	Ganancia Tx [dBi]	30
Alcance [Km]	Ganancia Rx [dBi]	10
153,71	Perdidas Cable Conectores [dB]	3
	Perdidas En La Trayectoria [dB]	-142,20
	NRS	-69,20
	Sensibilidad del Receptor [dBm]	-80
	Margen [dB]	10
	\sum	-70
	-69,20	-70

La mínima sensibilidad del receptor para la frecuencia de 2 GHz debe ser de -80 dBm.

Tabla 7. Cálculos de la mínima sensibilidad de recepción para una frecuencia 4 GHz.

Datos	Factores	Valor
Frecuencia [Ghz]	Potencia de Transmisión [dBm]	30
4	Ganancia Tx [dBi]	30
Alcance [Km]	Ganancia Rx [dBi]	10
153,71	Perdidas Cable Conectores [dB]	3
	Perdidas En La Trayectoria [dB]	-148,23
	NRS	-75,23
	Sensibilidad del Receptor [dBm]	-86
	Margen [dB]	10
	\sum	-76
	-75,23	-76

La mínima sensibilidad del receptor para la frecuencia de 4 GHz debe ser de -86 dBm.

Tabla 8. Cálculos de la mínima sensibilidad de recepción para una frecuencia 5 GHz

Datos	Factores	Valor
Frecuencia [Ghz]	Potencia de Transmisión [dBm]	30
5	Ganancia Tx [dBi]	30
Alcance [Km]	Ganancia Rx [dBi]	10
153,71	Perdidas Cable Conectores [dB]	3
	Perdidas En La Trayectoria [dB]	-150,16
	NRS	-77,16
	Sensibilidad del Receptor [dBm]	-88
	Margen [dB]	10
	\sum	-78
	-76,16	-78

La mínima sensibilidad del receptor para la frecuencia de 5 GHz debe ser de -88 dBm.

Otros parámetros importantes en el sistema Data Link son los relacionados con las antenas y la potencia de transmisión. Es necesario determinar el mínimo nivel de ganancia que pueden tener las antenas y el máximo nivel de potencia que el sistema podría irradiar. Para realizar este cálculo se utiliza la ecuación (8)

$$M = P_{tx} - L_{tx} + G_{tx} - L_e + G_{rx} - L_{rx} - S_{rx} \quad (8)$$

Margen [dB]

P_{tx} = Potencia de transmisión [dBm]

L_{tx} = Pérdidas en el cable de transmisión [dB]

G_{tx} = Ganancia antena transmisión [dBi]

L_e =Pérdidas en el espacio libre [dB]

G_{rx} =Ganancia antena Rx[dBi]

L_{rx} = Pérdidas en el cable de Rx [dB]

S_{rx} = Sensibilidad del receptor [dBm]

Utilizando la Ecuación (8) con el objetivo de tener un mínimo de 10 [dB], en la variable M[dB]. Se realiza los siguientes cálculos para los casos extremos, máximo alcance y frecuencia portadora más alta, donde se puede tener la mayor pérdida de la señal ("T-STAMP, Miniature UAV Payload, Gyro Stabilized Cameras", 2015) (Buettrich, 2007) (Morochó, & Ludeña, 2014).

Nota Si para los parámetros considerados extremos 5 GHz y 150 Km el cálculo del margen cumple el mínimo requerimiento, se establece que para frecuencias menores se obtendrán mejores resultados. Inicialmente se realiza los cálculos sin modificar ningún parámetro Tabla 9 para determinar los resultados preliminares.

Tabla 9. Determinación del margen mínimo de señal

Datos	Factores	Valor
Frecuencia [Ghz]	Potencia de Transmisión [dBm]	30
4	Ganancia Tx [dBi]	30
Alcance [Km]	Ganancia Rx [dBi]	10
153,71	Perdidas Cable Conectores [dB]	3
	Perdidas En La Trayectoria [dB]	-148,23
	NRS	-75,23
	Sensibilidad del Receptor [dBm]	-86
	Margen [dB]	10
	\sum	-76
	-75,23	-76

El margen tiene un valor inferior al requerido por lo se dispone de dos opciones, la primera es aumentar la ganancia de las antenas y la segunda aumentar la potencia de transmisión

Si se aumenta la ganancia de las antenas de forma excesiva se produce disminución del ancho del haz, que es la distancia angular entre los puntos de media potencia, es decir a mayor

ganancia de antena menor ancho de haz (IWANAMI, 2000). En el caso de estudio no es muy conveniente disponer de una antena de una ganancia muy alta ya que la nave estará en movimiento y para tener un buen enlace se requiere alinear la antena de la estación terrena con la aeronave, lo que se dificulta con un haz menor.

La otra opción es aumentar el nivel de la potencia de transmisión. Al momento en el territorio ecuatoriano no existe una normativa que regule la frecuencia, ancho de banda y potencias de transmisión para sistema UAS. Sin embargo en la Tabla 10 se realizara el cálculo estimado para tener un nivel apropiado de potencia de transmisión.

Tabla 10. Determinación del margen mínimo de señal en función del incremento de potencia de transmisión

Datos	Factores	Valor
Frecuencia [Ghz]	Potencia de Transmisión [dBm]	30,19
5	Ganancia Tx [dBi]	30
Alcance [Km]	Ganancia Rx [dBi]	10
153,71	Perdidas Cable Conectores [dB]	3
	Perdidas En La Trayectoria [dB]	-150,16
	Sensibilidad del Receptor [dBm]	-88
	Margen [dB]	10,02

Zona de Fresnel

Se define como Zona de Fresnel al volumen de espacio entre el emisor de una onda electromagnética y el receptor. Cuando las ondas viajan de un lugar a otro a través de espacio estas no lo hacen en línea recta si no que forma una elipse. En la Figura 7 se representa lo descrito anteriormente.

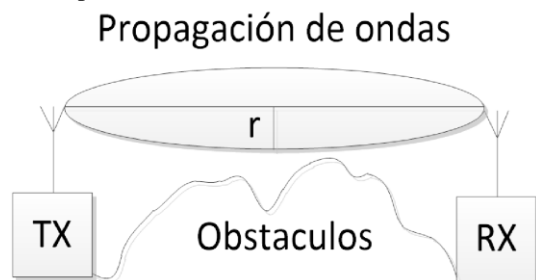


Figura 7. Forma de propagación de señal mediante el espacio libre

El objetivo es determinar la variable r [distancia] con la Ecuación (9) el valor determinado indicará cual debería ser la mínima separación en relación al obstáculo más alto en la trayectoria.

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{D}{4f}} \quad (9)$$

D Distancia entre los dos puntos a comunicar [Km]
 f frecuencia portadora de señal [GHz].

Los datos a utilizar para este cálculo son:

$$D = 153,71 \text{ Km.}$$

$$f = 5 \text{ GHz.}$$

Reemplazando en la Ecuación (9).

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{153,71 [\text{Km}]}{4 * (5 \text{ GHz})}}$$

$$r = 48,01 \text{ m}$$

En la práctica basta tener despejado el 60% de la primera Zona de Fresnel para establecer comunicación.

Con los datos obtenidos se puede establecer las condiciones mínimas de un sistema de comunicaciones, las mismas que servirán para determinar el sistema requerido a bordo de la aeronave.

Frecuencia portadora necesariamente menor a 5 GHz

Sensibilidad del receptor mínima -88 dBm.

Ganancia combinada de las antenas superior a 30 dBi .

Los cables y conectores que se ocupen deben ser de buena calidad con la finalidad de reducir las pérdidas por este efecto.

Configuración del sistema Data Link.

Con los parámetros descritos en los apartados anteriores se realiza la configuración del sistema Data Link de prueba en base al análisis realizado en (Medina-Pazmiño, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016) con los siguientes parámetros en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros del sistema de Data Link

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia de Transmisión	Watt	0.1 a 10
Perdidas en el cable de transmisión	dB	1
Ganancia Antena Tx	dBi	3
Pedidas de polarización	dB	1
Ganancia Antena Rx	dBi	27
Perdidas en el cable de Recepción	dBi	1
Bit Rate	Mbps	11
Máxima Perdida en la trayectoria	dB	152,16
Margen de desvanecimiento	dB	10
Frecuencia portadora	GHz	Desde 4,4
Umbral de sensibilidad	dBm	-97

La tabla 12 muestra los cálculos del margen para los parámetros del sistema.

Tabla 12. Cálculo del margen de la señal

Margen de Señal		
Factores	Unidad	Valor
Potencia de Transmisión	dBm	35,25
Ganancia Antena Tx	dB	27
Ganancia Antena Rx	dB	3
Perdidas en el cable de Recepción	dB	3
Sensibilidad del receptor	dBm	-97
Máxima Pérdida en la trayectoria	dB	-149,09
Margen	dB	10,16

Con los datos del equipamiento del sistema se determina que es factible alcanzar los objetivos planteados para el proyecto. Sin embargo también es notorio que se encuentra en el valor mínimo requerido. Una vez implementado el sistema será sometido a pruebas de funcionamiento, para llegar a obtener los mejores resultados.

4. PRUEBAS DE FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA DATALINK

En esta sección se analiza las pruebas de funcionalidad del sistema de Data Link. Ubicaciones e imágenes de la misión se espera obtener resultados como los muestra (Aguasca, 2014).

Datos de prueba a cumplir.

Altura de la aeronave 900m. (Sobre el nivel de la estación terrena) en el punto más distante

Datos del sistema Data Link.
Potencia de transmisión 35 dBm.

Datos Referenciales del medio ambiente.

- Viento 150 ° con una velocidad de 6 nudos
- Visibilidad superior a 10 Km
- Nubes dispersas a 600 y a 800 metros (SCT020, SCT026)
- Temperatura Ambiente 14 °C Temperatura Rocío 11°C
- Presión de la estación en referencia a nivel medio del mar Q1030.

La Figura 8 muestra el perfil que siguió la aeronave y la altura a la que se mantuvo durante la misión, y la representación del radio de la primera Zona de Fresnel.

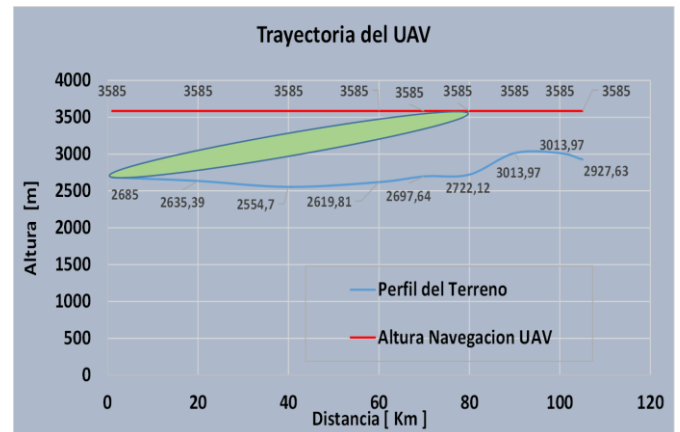


Figura 8. Representación del perfil del terreno, altura, radio de la primera Zona de Fresnel.

El principal problema que se puede tener es la afectación de la curvatura de la tierra. La altura de la antena que se encuentra en la estación terrena está a 1,5 metros del nivel de la tierra y la altura de esta antena no puede ser alterada durante la prueba de vuelo. La única alternativa es elevar el nivel de la aeronave y a largas distancia el ángulo de elevación de la antena de la estación terrena será afectado

Los datos del sistema data link son almacenados durante el período de prueba. En las siguientes figuras se ilustra los datos obtenidos en la prueba de funcionalidad del sistema DataLink.

5 RESULTADOS

Los datos que se registran son: Hora, Latitud, Longitud, Altura, Distancia, Velocidad, Intensidad de señal, Tasa de error binario (BER), Tasa de error de bloqueo (BLER). Los identificativos de color de los gráficos de resultados se identifican en la Figura 9.

Identificativos de color.

Downlink RSSI	Uplink RSSI	Range
Downlink BER	Uplink BER	
Downlink BLER	Uplink BLER	

Figura 9. Acotación de colores para los gráficos de señal

Intensidad de señal (RSSI).

En la Figura 10 se muestra la intensidad de señal de subida y la intensidad de señal de baja en relación a la distancia.

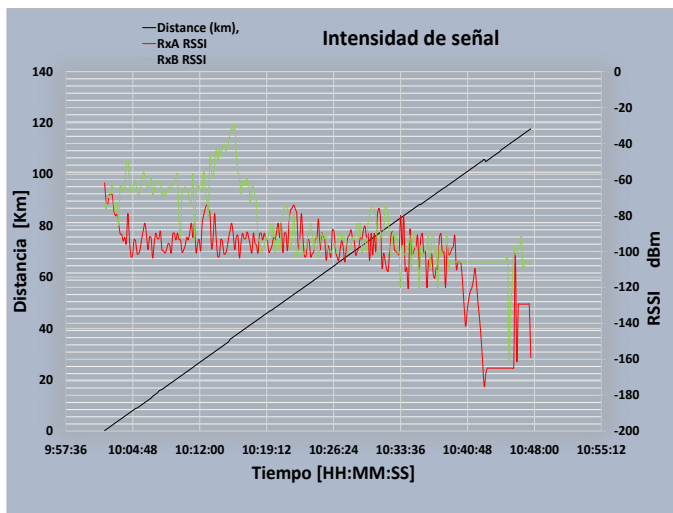


Figura 10. Intensidad de señal durante la prueba

Nota. El tener intensidad de señal en el receptor no garantiza tener calidad de señal.

Tasa de error binario (BER).

La Figura 11 indica la cuantificación de la presencia de errores durante la prueba. Tasa de error de bit es igual al número de errores de bit dividido por el número total de bits enviados. Como lo explican ("¿Qué es el BER (Bit Error Ratio) y el BERT (Bit Error Ratio probador)? | Noticias ultimas", 2014), (IWANAMI, 2000).

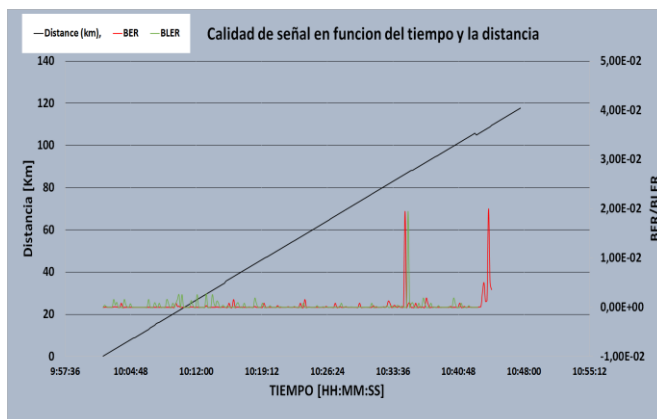


Figura 11. Tasa del BER en función de la distancia

Hasta los 53 Km tenemos un $BER = \frac{1}{100000}$ es decir un bit erróneo de cada 100000 transmitidos.

Desde los 53 Km hasta los 63 Km tenemos un $BER = \frac{1}{10000}$ un bit erróneo de cada 10000 transmitidos.

Desde los 63 Km hasta los 69 Km el BER se mejora en relación un bit erróneo de cada 100000 transmitidos.

A partir del Km 69 el BER decrece teniendo señal intermitente de comunicación.

La Figura 12 muestra la ruta que siguió la aeronave y los datos son mostrados sobre la plataforma de Google Earth.

Las tonalidades de la señal muestran:

- Verde: Calidad óptima
- Verde: Degradado pérdida razonable de la señal
- Naranja: Pérdida crítica de la señal
- Rojo: Pérdida total de señal

La figura 13 muestra las señales del sensor óptico a bordo de la aeronave con transmisión de video en tiempo real a través del sistema DataLink con las características determinadas en (Medina-Pazmino, Jara-Olmedo, & Valencia-Redrovan, 2016).

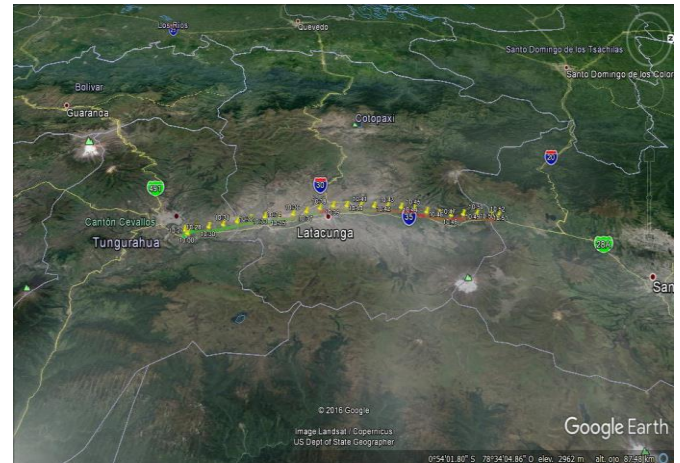


Figura 12. Ilustración gráfica de la prueba con el Data Link



Figura 13. Transmisión del video en tiempo real efectuado desde la aeronave mediante el Data Link

6. CONCLUSIONES

Los cálculos teóricos realizados permitieron delimitar la configuración óptima del sistema Data Link.

A través de las interfaces del sistema Data Link se puede administrar y monitorear los equipos que van a bordo de la aeronave.

Con la configuración adecuada del sistema Data Link fue posible cumplir con los objetivos del proyecto. Monitoreo de distancias remotas, se tiene interferencia en la Zona de Fresnel, afectación producida por el horizonte. El radio enlace se puede mejorar considerablemente si se ubica la antena en tierra a una altura superior a 1,5 m y la altura de la nave se incrementa.

REFERENCIAS

- Aguasca, A. (2014). Desarrollo de instrumentos y sistemas de teledetección por microondas de parámetros geofísicos embarcables en plataformas UAV (1st ed.). España: Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de: http://www.pcot.cat/web/pcotcontent/docs/jornades/20090522_UAV/PONENCIA_1.pdf. (Mayo, 2014).
- Antenas y Líneas de Transmisión. (2010) (3rd ed.). Obtenido de: http://www.eslared.org.ve/walc2012/material/track1/03-Antenas_y_Lineas_de_Transmision-es-v3.0-notes.pdf.
- Austin, R. (2010). Unmanned air systems (1st ed., pp. 01-24). Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley.
- Buettrich, S. (2007). Calculo de radio enlace (1st ed.). Obtenido de http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v02.pdf
- Flickenger, R. (2006). Redes Inalambricas en los paises en desarrollo (1st ed., pp. 15-16, 52-54, 96). UK: Limehouse Book.
- IWANAMI, Y. (2000). Analysis of BER on Sequence Estimation for Digital FM and GMSK with Limiter Discriminator Detection. The 3Rd International Symposium On Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC00), (3), 804-809.
- Jain, R., & Templin, F. (2012). Requirements, Challenges and Analysis of Alternatives for Wireless Datalinks for Unmanned Aircraft Systems. IEEE Journal On Selected Areas In Communications, 30(5), 852-860. <http://dx.doi.org/10.1109/jsac.2012.120602>
- Jain, R., Templin, F., & Sang Yin, K. (2011). Analysis of L-Band Digital Aeronautical Communication Systems: L-DACS1 and L-DACS2. Aerospace Conference, 2, 5-12. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/eff1/a2d99aeaffd87e86477c3da44d26b54fab23.pdf>.
- Medina-Pazmino, W., Jara-Olmedo, A., & Valencia-Redrovan, D. (2016). Analysis and determination of minimum requirements for a data link communication system for unmanned aerial vehicles-UAV's. 2016 IEEE Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). <http://dx.doi.org/10.1109/etcm.2016.7750816>
- Morocho, V., & Ludeña, J. (2014). PLANIFICACIÓN DE RADIOENLACES CON BASE EN T OPOGRAFÍA DIGITAL (1st ed.). Loja.
- Paul, C. (2015). Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd ed., pp. 32-85). A John Wiley & Sons, Inc. Publication.
- Plan nacional de Frecuencias Ecuador. (2012). Retrieved 1 October 2014, from en <http://www.arcotel.gob.ec/consulta-plan-nacional-de-frecuencias>.
- ¿Qué es el BER (Bit Error Ratio) y el BERT (Bit Error Ratio probador)? | Noticias ultimas. (2014). Noticias.in.rs. Retrieved 16 June 2014, from <http://www.noticias.in.rs/ultimas/%C2%BFque-es-el-ber-bit-error-ratio-y-el-bert-bit-error-ratio-probador/>
- Tomasi, W., Mata Hernández, G., & González Pozo, V. (2003). Sistemas de comunicaciones electrónicas (1st ed.). México [etc.]: Pearson Educación.
- STAMP, Miniature UAV Payload, Gyro Stabilized Cameras. (2015). Controp.com. Retrieved 20 April 2013, from <http://www.controp.com/item/t-stamp-payload/>.



Wilson Efraín Medina Pazmiño, Nació en Ambato-Ecuador el 15 de Agosto de 1981. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Técnica de Ambato en el año 2007. Obtuvo el título de Diplomado Superior en Redes Digitales Industriales en la Escuela Politécnica del Ejército (2011). Ha participado en el desarrollo de proyectos tecnológicos ejecutados entre la Escuela Politécnica Nacional y el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.



Lenin Aníbal Jara Olmedo, Oficial de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, nació en Ambato-Ecuador el 13 de diciembre de 1974. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Escuela Politécnica del Ejército en año 2004. Obtuvo su título de Master of Science in Communications Engineering en la Universidad de York, Inglaterra, en Octubre del 2010. Ha participado en el desarrollo de proyectos tecnológicos relacionados principalmente al área de aviónica, en el Centro de Ingeniería y Mantenimiento de Aviones Militares de la Dirección de la Industria Aeronáutica DIAF y en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.