



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Análisis de confiabilidad de los componentes electrónicos de las terminales de una red VSAT banda Ku de un proveedor de servicios de telecomunicaciones

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero en Electrónica

AUTOR

Hugo Ivan TICONA GREGORIO

ASESOR

Mg. Carlos Alberto SOTELO LOPEZ

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ticona, H. (2023). *Análisis de confiabilidad de los componentes electrónicos de las terminales de una red VSAT banda Ku de un proveedor de servicios de telecomunicaciones*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Hugo Ivan Ticona Gregorio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10740959
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-7967-3210
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Sotelo Lopez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07017259
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8960-6567
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Oscar Armando Casimiro Pariasca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06592392
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Juan Francisco Tisza Contreras
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08596442

Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Juan Antonio Apesteguia Infantes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10423762
Datos de investigación	
Línea de investigación	Sistemas Satelitales
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Level 3 Perú País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Surco Calle: Av. Manuel Olguín N° 395 Latitud: -12.12518 Longitud: -77.02372
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2019-2020
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Robótica, Control automático https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.02 Ingeniería médica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.06.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL Nº 065/FIEE-EPIE/2023

Los suscritos Miembros del Jurado, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Electrónica de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha, bajo La Presidencia del **ING. OSCAR ARMANDO CASIMIRO PARIASCA**, integrado por el **MG. JUAN FRANCISCO TISZA CONTRERAS**, el **MG. JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES** y Miembro Asesor el **MG. CARLOS ALBERTO SOTELO LOPEZ**.

Después de escuchar la Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional del **Bach. HUGO IVAN TICONA GREGORIO** con código N° 963857 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **ANALISIS DE CONFIABILIDAD DE LOS COMPONENTES ELECTRONICOS DE LAS TERMINALES DE UNA RED VSAT BANDA KU DE UN PROVEEDOR DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió aprobar otorgándole el calificativo de **dieciséis (16)**.

Ciudad Universitaria, 20 de mayo del 2023

ING. OSCAR ARMANDO CASIMIRO PARIASCA

Presidente de Jurado

MG. JUAN FRANCISCO TISZA CONTRERAS

Miembro Jurado

MG. JUAN ANTONIO APESTEGUIA INFANTES

Miembro de Jurado

MG. CARLOS ALBERTO SOTELO LOPEZ

Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRONICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica.
2. Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.
3. Emisor del Informe el Director de la Escuela Profesional de Electrónica.
4. Operador del programa informático de similitudes: **Rejis Renato Paredes Peñafiel**
5. Documento evaluado: Trabajo de Suficiencia Profesional para título de (pregrado)
ANALISIS DE CONFIABILIDAD DE LOS COMPONENTES ELECTRONICOS DE LAS TERMINALES DE UNA RED VSAT BANDA KU DE UN PROVEEDOR DE SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES.
6. Autor de la tesis: **HUGO IVAN TICONA GREGORIO**
Fecha de aplicación de recepción del documento: 17-01-2023
7. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 17-01-2023
8. Software utilizado: Turnitin.
9. Configuración del programa detector de similitudes:
 - Excluye citas.
 - Excluye bibliografía.
 - Excluye cadenas menores de 40 palabras
10. Porcentaje de similitudes según programa detector: Cuatro por ciento – 4%
11. Fuentes originales de las similitudes encontradas.

1. Hdl.handle.net	3% Fuente de Internet
2. Repositorio.unsa.edu.pe	1% Fuente de Internet
3. Dokumen.pub	1% Fuente de Internet
4. Idoc.pub	<1% Fuente de Internet

12. Observaciones: Ninguna.
 13. Calificación de originalidad.
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones.
 14. Fecha del informe: 29 de mayo del 2023.
- Atentamente,



Mg. Rejis Renato Paredes Peñafiel
Director de la Escuela Profesional de Electrónica

RESUMEN

El presente informe de Trabajo de Suficiencia Profesional, titulado “Análisis de Confiabilidad de los componentes electrónicos de las terminales de un sistema VSAT banda Ku en un proveedor de servicios de telecomunicaciones”, contiene el resultado de aplicar Ingeniería de Confiabilidad a los componentes electrónicos de un sistema VSAT banda Ku, a fin de determinar si los componentes electrónicos que fueron empleados en el proyecto, pueden ser reutilizados en otros proyectos o deberían ser enviados a scrap.

El sistema satelital VSAT banda Ku de aplicación, está compuesto por 1500 terminales cada una de las cuales posee idénticos componentes electrónicos, dichas terminales entraron en producción al mismo tiempo, como parte de un proyecto para interconectar oficinas ubicadas en zonas rurales del territorio peruano.

Para realizar el estudio se tomó una muestra no probabilística de 500 estaciones satelitales, sobre las que se recopiló información histórica de averías. Los componentes electrónicos analizados de forma independiente fueron dos: la IDU (Indoor Unit), BUC (Block Up converter). El objetivo del estudio fue de encontrar los modelos matemáticos que permitan calcular el valor de la confiabilidad para cada uno de los componentes al cabo de 5 años en que se cumple el tiempo de vida del proyecto.

Palabras clave: VSAT, Banda Ku, Weibull, Confiabilidad, Satelital.

ABSTRACT

This Professional Sufficiency Work report which was entitled "Reliability Analysis of the electronic components of the terminals of a Ku band VSAT system in a telecommunications service provider", contains the result of applying Reliability Engineering to the electronic components of a Ku band VSAT system, the goal was to determine if the electronic components that were used in the project could be reused in other similar projects or should be sent to scrap.

The VSAT Ku band application satellite system is made up of 1500 terminals, one important thing to be remarked is that each of which has identical electronic components: IDU, BUC. Also, these terminals went into production at the same time, as part of a project to interconnect offices located in rural areas of the Peruvian territory.

To carry out the study, a non-probabilistic sample of 500 satellite stations was taken on which historical information on failures was collected. The electronic components analyzed independently were two: the IDU (Indoor Unit) and BUC (Block Up converter). The objective of the study was to find the mathematical models that allow calculating the value of reliability for each of the components after 5 years in which the project's lifetime is fulfilled.

Key words: VSAT, Ku-Band, Weibull, Reliability, Satellite

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
INDICE DE CONTENIDOS.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE TABLAS.....	viii
I. INTRODUCCION	1
II. INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	3
2.1. Institución donde se desarrolló la actividad	3
2.2. Periodo de duración de la actividad	3
2.3. Finalidad y objetivos de la entidad	3
2.3.1 Finalidad	3
2.3.2 Objetivos	4
2.4. Razón social.	4
2.5. Dirección postal.....	4
2.6. Correo electrónico de la persona a cargo	4
III. DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	5
3.1. Organización de la actividad	5
3.2. Finalidad y Objetivos de la actividad	6
3.2.1 Finalidad	6
3.2.2 Objetivo Principal	6
3.2.3 Objetivos específicos	6

3.3.	Problemática	6
3.3.1	Problema general.....	6
3.3.2	Problemas específicos	6
3.3.3	Justificación e importancia de la actividad	7
	Justificación Práctica	7
	Justificación Teórica	7
3.4.	Metodología	7
3.3.4	Bases teóricas.	8
3.3.5	Marco conceptual.....	9
3.3.6	Sistema de Comunicación Electrónica.....	10
	Ancho de Banda (BW)	11
3.3.7	Comunicaciones Satelitales	11
	Sistema de comunicación satelital:.....	13
3.3.8	Satélite	14
	Subsistemas de un satélite	14
	Tipos de satélites	15
3.3.9	Sistema Satelital VSAT	16
	Característica del Flujo de información.....	17
	Calidad y capacidad requerida del enlace	18
	Retardo de Transmisión.....	18
	Partes de un sistema VSAT	18
3.3.10	Conceptos básicos de Probabilidad y Estadística.....	20
3.3.11	Ingeniería de Confiabilidad	22
	Escuela de Confiabilidad basada en el análisis probabilístico del tiempo para la falla	23
3.3.12	Función de Distribución de Weibull	25
	Cálculo de Confiabilidad en Sistemas.....	26
3.5.	Presentación de resultados.....	28
3.3.13	Sistema VSAT Banda Ku de Aplicación	28

Satélite Eutelsat 115W B	29
Terminal VSAT	31
Información de fallas de los dispositivos electrónicos componentes de la muestra	33
3.3.14 Identificación de la Función de distribución.....	35
3.3.15 Cálculo de los Parámetros de la distribución Weibull	37
3.3.16 Modelos de Confiabilidad para los componentes estudiados	39
3.3.17 Predicciones	39
3.3.18 Evaluación Económica.....	40
IV. CONCLUSIONES	43
V. RECOMENDACIONES	44
VI. BIBLIOGRAFIA	45

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un sistema de comunicación electrónica. Fuente: elaboración propia	10
Figura 2. Elementos de un sistema de comunicación satelital.	13
Figura 3. Sistema VSAT en Configuración en Estrella. Fuente: Elaboración del autor.....	17
Figura 4. Sistema VSAT en Configuración malla	17
Figura 5. Componentes de una terminal VSAT o estación remota. Fuente: Maral (2003).....	19
Figura 6. Componentes Hub VSAT. Fuente: Maral (2003)	20
Figura 7. Sistema en serie. Fuente: Smith (2017).....	27
Figura 8. Sistema en Paralelo Fuente: Smith (2017)	28
Figura 9. Sistema Satelital VSAT Banda Ku de aplicación. Fuente: Elaboración del autor	29
Figura 10. Zona de Cobertura Satélite Eutelsat 115 W B, Banda C.....	30
Figura 11. Eutelsat 8 115 W B, Zona 1 Banda Ku.....	30
Figura 12. Eutelsat 115 W B – Zona 2 Banda Ku. 2387048d52b2.....	30
Figura 13 Eutelsat 115 W B, Zona 4 Banda Ku	31
Figura 14. Diagrama de Bloques – Componentes Electrónicos de la terminal VSAT	31
Figura 15. IDU Satellite Router Evolution X100 . Fuente: Datasheet Fabricante Idirect	32
Figura 16. 3W Universal Ku Band BUC Fuente: Datasheet Fabricante Idirect	32
Figura 17. Ku Band Universal PLL LNB.....	33
Figura 18. Estadística de falla por tipo de dispositivo.....	33
Figura 19. Análisis de Confiabilidad con datos censurados por la derecha ..	36
Figura 20. Prueba de ajuste de bondad datos de fallas de las IDUs.....	37

Figura 21 Prueba de ajuste de bondad de los datos de fallas de las BUCs,	37
Figura 22 Parámetros de Weibull - IDUs.....	38
Figura 23 Parámetros de Weibull - BUCs	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información de Fallas de IDUs	34
Tabla 2. Información de Falla de las BUCs	35
Tabla 3. Resumen de parámetros de Forma y Escala para los tres componentes electrónicos	39
Tabla 4. Modelos de Confiabilidad para las IDUs y BUCs de las terminales VSAT	39
Tabla 5. Confiabilidad al término del quinto año de los componentes electrónicos	40
Tabla 6. Cronograma de desinstalación terminales VSAT	40
Tabla 7. Costo unitario de Instalación y Desinstalación de la Terminal VSAT	40
Tabla 8. Pronóstico de utilización de las terminales recuperadas	40
Tabla 9. Flujo de Caja – Proyecto de Desinstalación	41
Tabla 10. VAN y TIR del Proyecto	42

I. INTRODUCCION

LEVEL 3 PERU S.A provee servicios de comunicaciones dirigidos al sector empresarial. Para conectar las oficinas de sus clientes, emplea medios de transmisión guiados como la fibra óptica y no guiados como la radio y el satélite. La comunicación satelital se caracteriza por usar satélites artificiales puestos en órbita con el fin de reflejar hacia la Tierra, las señales de comunicaciones que le son enviadas por las estaciones terrestres, permitiendo así la comunicación entre ellas. Robertazzi (2017) afirma que hay cerca de 3600 satélites en la órbita terrestre, de los cuales 1000 están operativos y se usan para brindar servicios de comunicaciones, conectividad para usuarios móviles, navegación, predicción del tiempo e investigación.

La red satelital VSAT banda Ku objeto de estudio, es el resultado de un proyecto para conectar la oficina central de un cliente de LEVEL 3 PERU S.A con 1500 oficinas, localizadas en zonas rurales del Perú. Las estaciones terrestres o terminales VSAT fueron implementadas con equipamiento nuevo e idéntico, además de poseer el mismo perfil de configuración en el HUB VSAT, con lo cual todas tienen el mismo ancho de banda en los enlaces de subida (Up link) y de bajada (Down Link). Según Pratt y Allnutt (2020) los sistemas VSAT usan estaciones terrestres con pequeñas antenas y amplificadores por debajo de 5 watts.

El sistema de comunicaciones de una terminal VSAT del proyecto se compone de tres dispositivos electrónicos que permiten la comunicación satelital: el Satélite Router X1-Ku/C (IDU), el BUC y el Low Noise Amplifier (LNB). Dichos componentes dentro del plan de mantenimiento son considerados no reparables, dado que, si el personal técnico de campo determina que alguno de ellos se encuentra averiado, procede a reemplazarlo de forma inmediata sin buscar su reparación en el momento.

El estudio sobre el LNB no está incluido en el siguiente trabajo. El alcance

del proyecto contempló la instalación de los equipos de comunicaciones y la gestión de la operación y mantenimiento de estos durante el tiempo de duración del proyecto. La instalación del sistema eléctrico y de aire acondicionado quedó bajo responsabilidad de la administración de cada oficina donde se instaló una remota. Las oficinas remotas estaban ubicadas en zonas rurales del Perú, principalmente en la región Sierra.

Dado el contexto descrito en los dos párrafos previos y que la desinstalación de las terminales estaba prevista al término de al año 5, se determinó que era conveniente realizar un análisis de confiabilidad de los componentes de las terminales VSAT:

- Satellite Router X1-Ku/C
- BUCs

El análisis de Confiabilidad no incluyó al Low Noise block (LNB) o bloque de amplificación de bajo ruido, dado que se decidió realizarlo por separado.

El resultado del estudio permitirá determinar cuantitativamente el nivel de confiabilidad de los componentes del sistema aprovechando la información histórica de las fallas de los componentes y de dicha manera aportar a la toma de decisiones de la gerencia respecto al futuro de dichos componentes. Las fallas ocurren de forma aleatoria, por ello la ingeniería de confiabilidad usa conocimiento de la teoría de probabilidades y la estadística con el fin de cuantificar la incertidumbre, el análisis de confiabilidad también es conocido como análisis de supervivencia.

II. INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1. Institución donde se desarrolló la actividad

Level 3 Perú S.A

2.2. Periodo de duración de la actividad.

Agosto 2020 – febrero 2021

2.3. Finalidad y objetivos de la entidad.

A continuación, se menciona la finalidad y objetivos que Level 3 Perú busca con la aplicación de la ingeniería de Confiabilidad a la red satelital VSAT objeto de estudio.

2.3.1 Finalidad

Proveer servicios de telecomunicaciones y tecnología al sector corporativo y público.

2.3.2 Objetivos

- Calcular el valor de confiabilidad de las IDUs.
- Calcular el valor de la confiabilidad de las BUC.

2.4. Razón social.

Level 3 Perú S.A

2.5. Dirección postal.

15023

2.6. Correo electrónico de la persona a cargo.

julio.arcila@level3.com

III. DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD

3.1. Organización de la actividad.

Las siguientes actividades fueron ejecutadas a fin de cumplir con los objetivos trazados:

- Se tomó una muestra no probabilística de 500 terminales VSAT, a las cuales se hizo seguimiento de las averías que presentaron en cualquiera de sus componentes electrónicos.
- Se extrajo información sobre las averías en los componentes de las terminales escogidas para el estudio. Periodo: 1ero de junio 2017 al 01 marzo 2020
- Organización de la información en Tablas y procesamiento en EXCEL.
- Con ayuda de Minitab, se identificó que la función de distribución paramétrica de Weibull de 2 parámetros es a la que mejor se ajustaban los datos de las averías de las IDUs y BUC.
- Usando MINITAB se calculó los parámetros de la distribución Weibull para cada uno de los 3 componentes electrónicos.
- Se planteó las ecuaciones matemáticas de los modelos de confiabilidad para los 3 componentes electrónicos.
- Haciendo uso de los modelos encontrados, se hizo el cálculo de la Confiabilidad para cada uno de los componentes.

3.2. Finalidad y Objetivos de la actividad.

3.2.1 Finalidad

Contribuir a la toma de decisión respecto a si las IDUs y BUCs empleados en el sistema VSAT banda Ku deberían ser reutilizados o descartados.

3.2.2 Objetivo Principal

Realizar el Análisis de Confiabilidad a los componentes electrónicos de la red VSAT banda Ku

3.2.3 Objetivos específicos

- Hallar el modelo matemático de confiabilidad de las IDUs.
- Hallar el modelo matemático de confiabilidad de las BUCs.
- Calcular el valor de Confiabilidad al 5to año de operación del sistema electrónico de las terminales VSAT: IDUs, BUC.

3.3. Problemática.

3.3.1 Problema general

¿De qué manera se podría realizar el Análisis de Confiabilidad a los componentes electrónicos de la red VSAT banda KU?

3.3.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el modelo matemático de confiabilidad de las IDUs?

- ¿Cuál es el modelo matemático de confiabilidad de las BUCs?
- ¿Cuánto es el valor de confiabilidad para cada uno de los componentes electrónicos de la red VSAT banda Ku?

3.3.3 Justificación e importancia de la actividad

Justificación Práctica

El presente proyecto permitirá aprovechar la información estadística existente en las bases de Datos de Level 3 Perú y usarla para apoyar la toma de decisiones.

Justificación Teórica

Representa una oportunidad para aplicar conocimientos de Ingeniería de Confiabilidad al sector de telecomunicaciones.

3.4. Metodología

A fin de completar los objetivos se siguió la siguiente metodología:

1. Elección de las 500 estaciones satelitales que conformarán la muestra del estudio.
2. Recolección del histórico de averías de la IDU y BUC de cada una de las terminales que componen la muestra de estudio, tomando como fecha de inicio 1ero de junio 2017 al 1ero de marzo 2020.
3. Organización de la información de averías en tablas de EXCEL.
4. Identificación de la distribución a la cual se ajustan los datos de las averías.
5. Cálculo de los parámetros de la función de distribución a fin de obtener las ecuaciones para cada uno de los tres componentes de las terminales VSAT banda Ku.
6. Redacción de las fórmulas de Confiabilidad para cada uno de los dispositivos.

7. Cálculo del valor de confiabilidad para el año 5 para cada uno de los dispositivos.

3.3.4 Bases teóricas.

Ramírez (2014) en su tesis “Análisis de datos de falla” para optar por el grado de Magister en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Manizales de Colombia, plantea como problema identificar el procedimiento más eficiente y adecuado que permita hacer pronósticos futuros de un sistema en base a su historial de fallas. Como hipótesis plantea que la distribución de Weibull se adapta muy bien a la mayoría de los problemas de confiabilidad en ingeniería Eléctrica. Concluye que el estudio de la confiabilidad es relevante en sistemas eléctricos y electrónicos y mecánicos, también concluye los cálculos se topan con problemas de faltas de datos confiable y seguros, finalmente afirma que Weibull es una distribución que permite evaluar todos los periodos de vida operativa de un sistema. Aporte: el estudio presenta un marco teórico en detalle sobre análisis de confiabilidad sobre componentes no reparables.

Paredes, C. (2012), en su tesis “Pronóstico de fallas e implementación plan de gestión Confiabilidad de repuestos críticos en la minería de Hierro. Chile” para obtener el título de Ingeniero Civil Industrial de la Universidad Austral de Chile. Plantea como objetivo definir una política de gestión de repuestos críticos y estrategias de mantenimiento para maximizar la disponibilidad de los equipos físicos y como uno de sus objetivos específicos se propone calcular la confiabilidad de unos equipos a partir de parámetros estadísticos. Para el cálculo de los índices de mantenibilidad y confiabilidad aplica la distribución de Weibull, una de sus conclusiones es que los resultados de los cálculos hacen recomendable una política de mantenimiento correctivo, así como validan algunas prácticas empíricas. Aporte: Provee un ejemplo de aplicación del análisis de confiabilidad aplicado a la industria minera, así como el marco teórico sobre el tema.

Villanueva (2017) en su tesis “Gestión del mantenimiento basado en la

confiabilidad de las redes del subsistema de distribución eléctrico 22.9/13.2KV de San Gabán – Ollachea” para optar por el grado de Magister Scientiae en Ingeniería Mecánica Eléctrico mención en gestión de operación y mantenimiento de sistemas eléctricos en la Universidad Nacional del Altiplano, plantea como problema que los costos asociados a fallas en las redes eléctricas de media tensión se incrementan a falta de un sistema de gestión preventivo eficiente por lo que se propone diseñar un modelo de gestión del mantenimiento que considere la criticidad de los elementos y componentes del sistema.

Rosado (2017) en su tesis “Evaluación de métodos para determinar la confiabilidad mediante la distribución Weibull: Caso Planta San Antonio” para obtener el grado de maestro en Ciencias Ingenierías de Mantenimiento con mención en Gerencia de Mantenimiento de la Universidad San Agustín de Arequipa, plantea que el mantenimiento en muchas organizaciones se ejecuta sin analizar las averías ni aprovechar los datos históricos acumulados. Propone evaluar varios métodos e identificar el más conveniente para calcular la confiabilidad mediante la distribución de Weibull llegando a la conclusión que de las 7 alternativas evaluadas MATLAB es la mejor opción, resalta la replicabilidad del método debido a que, una vez escrito el código, podrá ser utilizado en otras aplicaciones. Respecto a la prueba de ajuste de bondad para encontrar la distribución de probabilidad a la que mejor se ajustan los datos de fallas documenta prolijamente como utilizar los métodos de Kolmogórov-Smirnov, Chi cuadrado y Anderson Darling.

3.3.5 Marco conceptual.

Las comunicaciones electrónicas, se realizan a través de señales que son enviadas y recibidas por equipos electrónicos que conforman un sistema de comunicación. Sobre las señales, Oppenheim y Verghese (2016) afirman que son funciones matemáticas de una o más variables, que pueden ser continuas o discretas, las variables continuas se representan por $x(t)$ mientras que las discretas mediante el uso de corchetes, $x[n]$. Por otro lado,

Frenzel (2016), señala que un sistema de comunicación electrónica está compuesto por un ente transmisor, un canal de comunicación y un receptor y que el mensaje es referido como información. Para poder llevar a una comunicación electrónica se requiere de un sistema que trabaje de manera conjunta bajo protocolos previamente establecidos.

3.3.6 Sistema de Comunicación Electrónica

Es una agrupación de componentes que trabajan de forma conjunta, los sistemas pueden variar en complejidad. Oppenheim y Verghese (2016) afirman que un sistema se compone de elementos de software y hardware y que de acuerdo con su complejidad pueden tener incluso subsistemas. Para trasladar la información del transmisor al receptor, las comunicaciones electrónicas emplean un canal el cual provee un ancho de banda determinado para transmitir la información, lo que se denomina ancho de banda y una frecuencia de operación, la máxima tasa que se puede transmitir por un canal se denomina Capacidad. En la Figura 1, se puede apreciar los componentes de un sistema de comunicación electrónica.

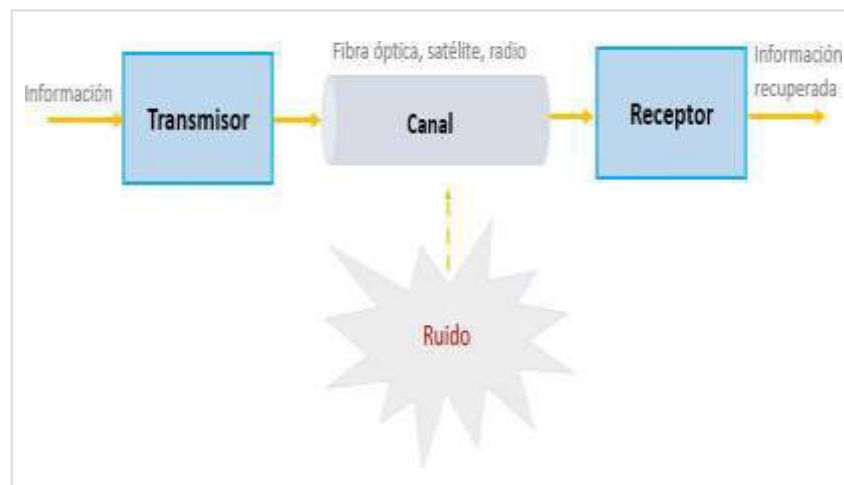


Figura 1. Componentes de un sistema de comunicación electrónica.

Fuente: elaboración propia

Ancho de Banda (BW)

Para Frenzel (2016), una señal de información ocupa una parte del espectro electromagnético, y a ese espacio ocupado, se denomina ancho de banda, por lo que numéricamente su cálculo se da entre la diferencia de los valores de la frecuencia más alta y baja, lo cual se encuentra expresado en la siguiente formula:

$$BW = f_2 - f_1$$

Por otro lado, para Alencar y Da Rocha (2020), el ancho de banda de un canal tiene relación directa con la tasa a la cual puede ser enviada una señal a través del canal mientras que la frecuencia de Operación se relaciona con la frecuencia a la que se modula la portadora, también afirman que la capacidad del canal es el límite superior al cual se puede transmitir por un canal manteniendo las condiciones de calidad.

- **Ruido**

El ruido, representa un gran problema con el que tienen que lidiar las comunicaciones electrónicas en la etapa de recepción. El ruido, es cualquier señal no deseada que se junta a la señal de información ocasionándole una degradación, la cual puede tener distintos niveles de intensidad, en el peor escenario interrumpe la comunicación de forma total, debido a la imposibilidad de regenerar la señal en el receptor. Frenzel (2016), define el ruido como cualquier causal que degrada la información transmitida y se mide usando la relación Signal-to-Noise ratio (SNR). Por otro lado, Roddy y Coolen (2014) acerca del ruido que afecta a un canal, señalan que son distorsiones eléctricas que causan interferencia y tienen diversas maneras de presentarse y de afectar a los sistemas de recepción.

3.3.7 Comunicaciones Satelitales

Las comunicaciones satelitales, son un tipo de comunicaciones electrónicas en el que las señales electromagnéticas viajan por el espacio libre, es decir

usan un medio de transmisión no guiado. De acuerdo con Beard y Stallings (2015) una señal electromagnética es una función del tiempo que también puede ser expresada como función de la frecuencia, mientras que el medio de transmisión lo definen como la ruta física que existe entre transmisor y receptor, el cual puede ser de 2 tipos: medio guiado cuando la onda viaja de un medio sólido y no guiado, cuando la onda viaja por la atmosfera o el espacio exterior.

Un sistema de comunicación satelital permite la comunicación electrónica entre 2 puntos distantes ubicados sobre la superficie terrestre y que se encuentren dentro del footprint o área de cobertura del satélite que les da servicio. El sistema usa un dispositivo puesto en órbita llamado satélite, el cual actúa como repetidor, enviando la señal de vuelta a la Tierra para que la reciba la estación satelital destino. Según la tecnología del satélite, la señal puede pasar por un proceso de regeneración previo a ser retransmitida a la estación terrestre destino. Se denomina Footprint del satélite a su área cobertura.

Cabe mencionar que el footprint o pisada del satélite, forma un área de forma irregular ya que depende de las condiciones ambientales de cada lugar, lo que implica que el nivel de recepción en zonas conformante del footprint serán de intensidad variable, en casos extremos puede haber zonas en las cuales se necesite mejorar el nivel de ganancia de la señal instalando platos satelitales más grandes.

Los sistemas de comunicación satelital deben lidiar con el hecho de que las señales recibidas tienen altos niveles de atenuación y una gran cantidad de errores debido al extenso recorrido que hace la señal para subir y bajar. A diferencia de un sistema de comunicación por microondas que ve limitado su alcance por la curvatura terrestre y la topología del lugar, un sistema satelital no es afectado por dichos factores, ya que mientras las estaciones terrenas estén dentro del footprint del satélite, no hay inconvenientes para que establezcan comunicación y desde el punto de vista de costos, el costo de transmisión es independiente de los lugares donde estén emplazadas las estaciones terrenas.

Sistema de comunicación satelital:

Está conformado por las estaciones terrestres y el satélite, ver Figura 2. Entre satélite y las estaciones terrenas hay 2 enlaces, el ascendente (up link) y el descendente (Down link), ambos cumplen funciones distintas ya que mientras uno sirve para subir información al satélite, el otro sirve para bajarla.

- **Satélite:**

Es un repetidor de gran capacidad que se encuentra orbitando alrededor de la Tierra, para el caso de los satélites Geoestacionarios se encuentra a orbitando a 36000 Km aproximadamente de altitud siguiendo de la línea Ecuatorial.

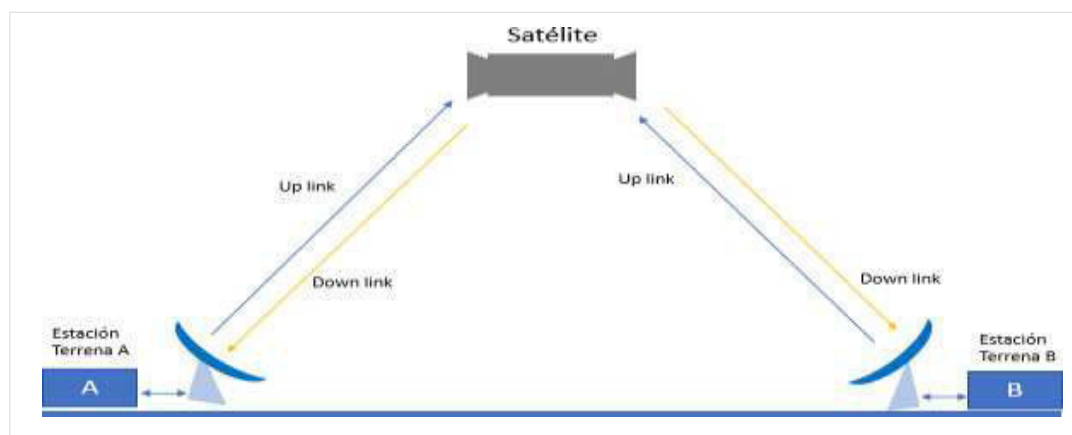


Figura 2. Elementos de un sistema de comunicación satelital.

Fuente: Elaboración del autor

- **Estaciones terrestres:**

Son estaciones que transmiten o reciben la señal Satélite. Cuando transmiten usan el enlace Up Link el cual sirve para enviar señal al satélite, antes del envío, esta señal es acondicionada en frecuencia y potencia para que pueda viajar desde la estación hacia el satélite. El enlace Down link es usado por el satélite para enviar la señal de vuelta a la Tierra. De acuerdo con Maini y Agrawal (2014) las estaciones terrestres principalmente se encuentran en la superficie, aunque también pueden estar localizadas en el mar o suspendidas en el aire.

3.3.8 Satélite

Un satélite forma parte del segmento espacial de un sistema de comunicaciones satelitales y pueden ser definidos como complejos dispositivos de comunicaciones cuya finalidad es recibir la señal que llega por el enlace Up Link de la estación terrestre transmisora y devolverla hacia la estación terrestre receptora mediante el enlace de Down Link. Dependiendo de la tecnología del satélite, el satélite puede ser pasivo, si sólo recibe y retransmite o activo si previamente a la retransmisión, somete a la señal recibida a un proceso de regeneración. Además de ser complejo, un satélite también es un dispositivo costoso, según Pratt y Allnutt (2020) un satélite Geoestacionario tiene rango de costo de USS\$ 100M to USS\$ 500M, por otro lado, indican que un satélite es diseñado para operar entre 10 a 15 años, tiempo en el cual el propietario del satélite debe recuperar su inversión.

Subsistemas de un satélite:

El satélite posee un conjunto de subsistemas que le permiten cumplir su función dentro del sistema de comunicación satelital. De acuerdo con Pratt y Allnut (2020), los principales subsistemas que conforman un satélite son los que a continuación se listan:

- Sistema de Control de localización y orbita

Encargado de volver a colocar al satélite en su órbita correcta cuando es sacado de ella por algún factor externo. Está conformado por motores y sistemas eléctricos de propulsión.

- Telemetría, Seguimiento, control y monitoreo

Permite enviar señales a la estación terrestre, dichas señales contienen información relacionada al estado del satélite. Una parte de este sistema está en el satélite y otra en la estación terrestre de control en que se encuentra el sistema de tracking y provee información sobre la elevación y azimut del satélite.

- Sistema de energía

La energía que energiza el satélite proviene de celdas solares, dependiendo del tamaño del satélite pueden proveer desde 1W de energía DC hasta 20 KW.

- Subsistema de Comunicaciones

Como volumen el subsistema de comunicaciones ocupa una pequeña parte del total del satélite, usualmente se compone de varias unidades de varios receptores y transmisores denominados en conjunto como transponders, esta palabra deriva de los términos transmisor y respondedor. Sobre los Transponder, Pratt y Allnut (2020) afirman que “in 2018 a large GEO satellite could weigh 6000 Kg, generate 16 Kw of energy and carry 72 transponders.

- Antenas del Satélite

Compuesto por antenas que trabajan en diversas frecuencias, se encargan de producir los haces de cobertura del satélite. Algunos satélites pueden brindar más de un haz de cobertura e incluso trabajar en más de una banda de frecuencia, por ello las antenas tendrán diversos diseños. De acuerdo con Dybdal, R. (2009), las antenas en los sistemas de comunicaciones satelitales usan tecnología muy variadas, la elección dependerá de las frecuencias de operación y los requerimientos del proyecto. Dicha diversidad desfavorece la elaboración de un estándar único de diseño.

Tipos de satélites

Olorunfunmi (2014) indica que existen 4 tipos de satélites de acuerdo con la órbita en la que fueron instalados para prestar servicios:

- Satélite Geoestacionario (GEO): Estos satélites siguen una órbita circular en la línea ecuatorial con cero excentricidad e inclinación, el satélite mantiene una posición fija relativa a la tierra. Proveen Servicios Fijos satelitales en banda C y Ku.

- Satélite de Órbita Elíptica Alta (HEO): Siguen orbitas elípticas

aproximadamente de 18000 a 35 000 km sobre la superficie terrestre, no necesariamente sobre la línea ecuatorial. Brindan servicios en países con muy altas latitudes norte y sur.

- **Satélite de Órbita Elíptica Media (MEO):** Siguen orbita circulares entre 8000 a 18000 Km sobre la superficie de la Tierra, no necesariamente sobre el ecuador. Implican mayor delay y más altos valores de potencia que los satélites de órbita baja (LEO) a cambio de ello requieren menos satélites para brindar la misma área de cobertura.
- **Satélite de Órbita Elíptica Baja (LEO):** Son satélites pequeños que orbitan entre 160 a 1600 km sobre la superficie terrestre son propensos a ser arrastrados por la resistencia de la atmosfera terrestre.

3.3.9 Sistema Satelital VSAT

Es un sistema satelital que usa antenas de diámetros que van de 1m a 1.2 m. VSAT deriva de Very Small Aperture Terminal la cual hace referencia al área de la antena que es muy pequeña. El diámetro pequeño de las antenas VSAT, las limitaciones de potencia del satélite, la atenuación que sufre la señal portadora en el Up link y Down link son factores que dificultan las comunicaciones VSAT a VSAT, por lo que se utiliza una estación base denominada HUB, la que posee una antena de tipo large y transmisor de gran potencia y cumple el rol de centro de estrella. De acuerdo con Maral (2003) la portadora sufre una atenuación de 200dB al hacer el recorrido conformado por el up link y Down link.

La configuración de un sistema VSAT puede ser de tipo estrella o en malla, la primera requiere de un punto central denominado estación HUB el cual sirve como punto intermedio para comunicar 2 estaciones remotas VSAT, mientras que en una configuración malla, las estaciones remotas tienen comunicación directa entre sí, sin la necesidad de la intervención de alguna estación que haga de intermediaria. Las Figuras 3 y 4 muestran la configuración estrella y malla

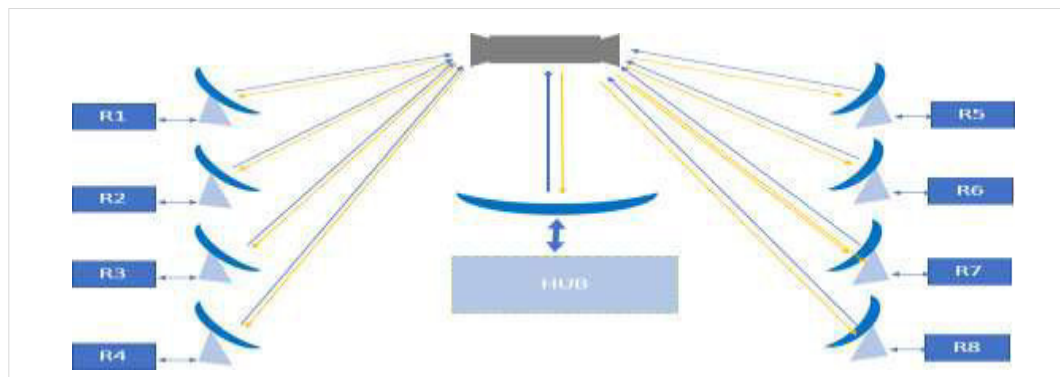


Figura 3. Sistema VSAT en Configuración en Estrella.

Fuente: Elaboración del autor

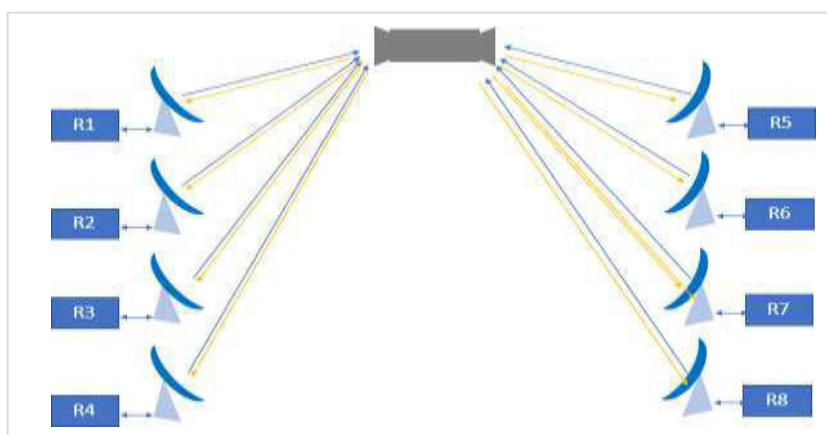


Figura 4. Sistema VSAT en Configuración malla.

Fuente: elaboración del autor

Característica del Flujo de información

La aplicación de la red VSAT puede ser diversa, por ejemplo, para distribución de señal de video a domicilios sólo interesa que el tráfico llega a las estaciones remotas sin tener la necesidad de que dichas remotas se comuniquen, con lo cual una configuración de estrella se acomodaría muy bien al requerimiento de esta red. Por otro lado, la red VSAT también se utiliza para soportar tráfico corporativo en el cual la necesidad es muchas veces que las remotas se conecten a oficinas centrales desde donde se controla y gestiona la operación.

Finalmente, también es conveniente tener en cuenta la interactividad que tendrán las remotas, por ejemplo, puede haber aplicaciones donde no sea necesario o se tenga un grado de interacción muy bajo entre remotas como por ejemplo en cajero bancarios de zonas rurales o puntos de acceso a INTERNET.

Calidad y capacidad requerida del enlace

La calidad del enlace considera la calidad de la recepción de la señal modulada y de la señal de banda base que es entregada al terminal de usuario. La calidad de la señal modulada se mide con la relación (C/N_0) , donde C es la potencia de la portadora recibida y N_0 la densidad espectral de potencia del ruido, mientras que la calidad del enlace de banda base se mide por la tasa de error de bit (BER) o bit information error que depende de la relación (E_b/N_0) , de la señal modulada recibida.

Retardo de Transmisión

El retardo en la transmisión puede afectar a aplicativos sensibles a este factor, de acuerdo con Inglis y Luther (1997) el delay que demora una señal en subir hasta el satélite y bajar de nuevo es de 250 ms en un sistema que usa un satélite GEO y es una desventaja de estos frente a uno de tipo MEO o LEO ya que estos satélites en orbitas de menor altitud que la GEO.

Partes de un sistema VSAT

Considerando una configuración estrella, un sistema VSAT está conformado por las estaciones terrestres y el HUB VSAT, además del satélite.

- Estaciones Terrestres VSAT

Está dividido en 2 partes, los equipos instalados en la parte exterior a cuyo conjunto se les denomina Outdoor Unit (ODU) y los equipos que se encuentran dentro de la oficina cliente denominados como Indoor Unit (IDU). En la Figura 5 se observa sus componentes.

- Outdoor Unit (ODU)

Conformado por la antena y los equipos electrónicos como el amplificador,

el amplificador de bajo ruido, el convertidor de alta y baja, así como el sintetizador de baja frecuencia. Especificaciones que caracterizan a la ODU, son la banda de transmisión y recepción, rango de temperatura de operación, lluvia y humedad y condiciones de sobrevivencia.

- Indoor Unit (IDU)

Conecta los terminales de usuario a la terminal VSAT a través de puertos Ethernet instalados en su chasis. Parámetros que caracterizan a un IDU son número de puertos, tipo de puertos, velocidad de puertos.

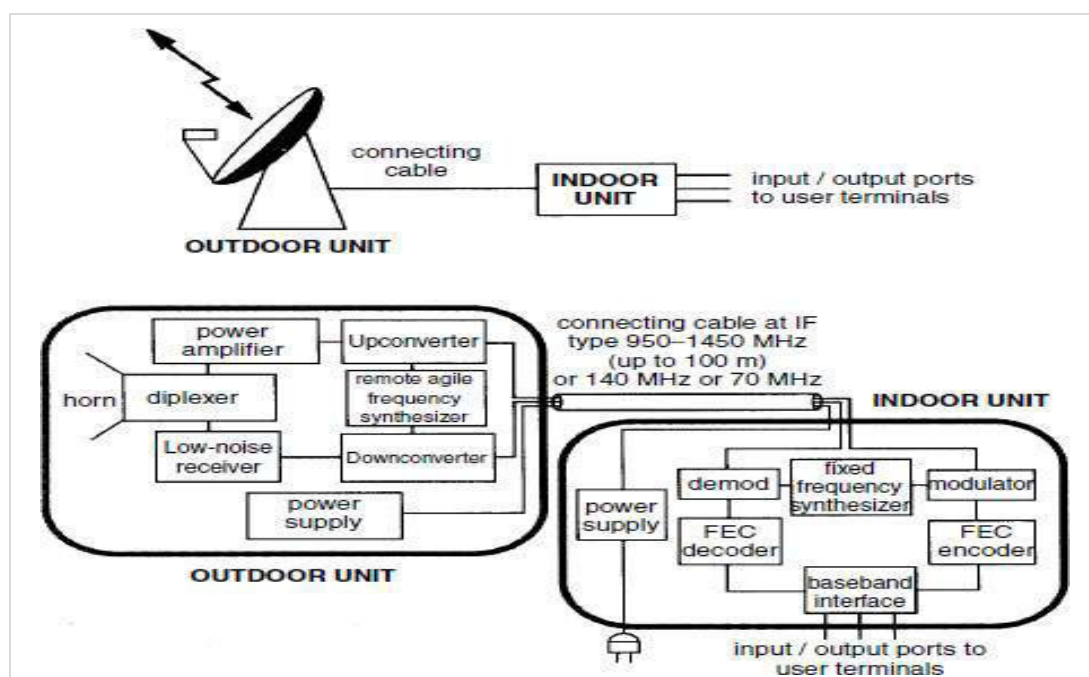


Figura 5. Componentes de una terminal VSAT o estación remota. Fuente: Maral (2003)

- Hub VSAT

Es la estación central a donde todas las estaciones terrestres VSAT tienen que enviar sus señales. En sus puertos denominados host computers usualmente no van conectados equipos clientes sino por ejemplo puede ir conexiones a redes MPLS o de INTERNET para salida a la red pública. La antena usada en el Hub suele ser conocida como antena master por ser de gran dimensión, así mismo dada la criticidad del rol que desempeña el HUB

casi todos sus componentes se encuentran redundados a fin de brindar una mayor seguridad a la disponibilidad del sistema ante fallas y evitar las averías masivas. En la Figura N° se aprecia los componentes de un HUB VSAT, al igual que la remota tiene componentes Indoor y Outdoor Unit.

3.3.10 Conceptos básicos de Probabilidad y Estadística

La Probabilidad es una ciencia que busca cuantificar la incertidumbre de tal modo que encuentra aplicación en muchos campos del quehacer humano. De acuerdo con Blitzstein y Hwang (2019) algunos campos de aplicación de la Probabilidad son la Estadística, Física, Biología, Ciencias de la Computación, Meteorología, Juegos, Finanzas, Ciencias Políticas, Medicina, Estadística.

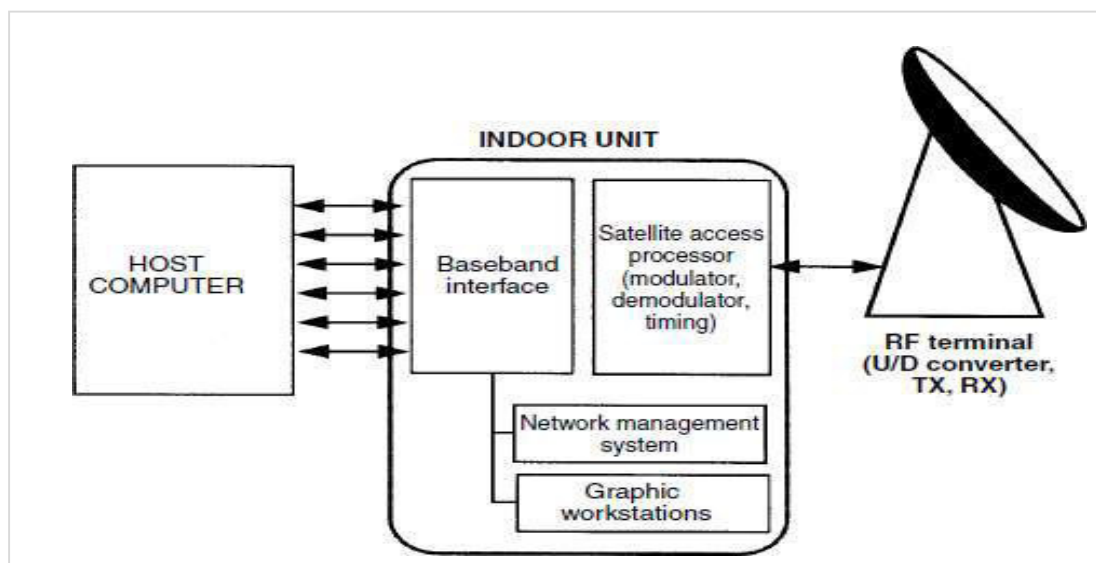


Figura 6. Componentes Hub VSAT. Fuente: Maral (2003)

Por otro lado, para Grami (2020) la Probabilidad cuantifica la oportunidad que un evento ocurra, definiendo el concepto de experimento como un proceso de observación y el concepto de evento como un único resultado o conjunto de resultados de un experimento, también señala que existen dos tipos de

experimentos, el 1ero llamado determinístico, debido a que siempre dará el mismo resultado bajo las mismas condiciones, mientras que el 2do es llamado aleatorio debido a que su resultado será imprevisible así se realice bajos las mismas condiciones, por ejemplo lanzar una moneda.

- Variable Aleatoria

Triola (2018), define una variable aleatoria como aquella que tiene un único valor numérico y que dicho valor depende del resultado de un procedimiento, es decir tiene que ocurrir el evento para poder conocer el valor que tomará la variable. También afirma que existen dos tipos de variables, la discreta y la continua.

- Variables Aleatorias Discretas

Las variables aleatorias pueden ser discretas o continuas, las cuales adoptan valores que puede ser contados de forma individual. Grami (2020) hace una precisión importante sobre las variables aleatorias discretas, indica que una característica importante del conjunto de valores que puede tomar una variable aleatoria es que ese conjunto pueda ser listado en una lista finita o infinita contable.

- Variables Aleatorias Continuas

Respecto a este tipo de variables, Triola (2018) sostiene que pueden adoptar una cantidad infinita de valores y que no pueden ser contados, dando como ejemplo los valores que se puede obtener al medir la temperatura en el cuerpo de una persona

- Variable Aleatoria Mixta

De acuerdo con Grami (2020) hay un tercer tipo de variable aleatoria que se caracteriza por tener un rango con partes discretas y continuas, a la cual se denomina variable aleatoria mixta.

3.3.11 Ingeniería de Confiabilidad

De acuerdo con Tongdan (2019), la ingeniería de confiabilidad puede ser definida como un estudio que emplea diversas disciplinas de estudio y que tiene como objetivo administrar el tiempo de vida de un producto o sistema, también afirma que la confiabilidad desempeña un rol importante en garantizar la seguridad humana y en la eficiencia de costo de una operación de una infraestructura, a través de la emisión de emitir pronósticos que mitiguen el impacto e incertidumbre de su ocurrencia.

Según Yang (2007), la ingeniería de confiabilidad tiene como fin, evitar las fallas y para ello se vale de la teoría de Probabilidad y Estadística. Tiene 2 escuelas que se diferencian por el tipo de datos en los que centran el análisis probabilístico: tiempo para la falla, este enfoque construye su modelo en base al historial de fallas de un componente o sistema. La otra se centra en estudiar el deterioro o física de la falla, su preocupación es entender de qué manera ocurre la falla. Zapata (2011) hace la distinción entre confiabilidad y disponibilidad, sostiene que la Confiabilidad está asociado al tiempo de funcionamiento de un componente o sistema no reparable mientras que la disponibilidad se asocia a que un sistema reparable pueda cumplir sus funciones en un instante de tiempo específico.

En ingeniería de confiabilidad, el término componente y sistema son de uso intercambiable. Por otro lado, existen varias formas de clasificar a los componentes y dado que el enfoque del presente estudio es de la confiabilidad desde el punto vista del análisis probabilístico de los tiempos de falla, se usará la clasificación de componentes por el destino que los aguarda luego de presentarse la falla: componentes reparables y no reparables.

- **Falla**

Se considera que un componente, producto o servicio ha fallado en el momento que pierde su capacidad para cumplir con sus funciones a raíz de algún incidente o condición presentada. Jiang (2015) indica que la duración de la falla permite clasificarlas en 2 tipos: falla intermitente y extendida, la primera caracterizada por ser de muy corta duración, mientras que la

segunda requiere alguna acción correctiva, dentro del tipo extendido hay una subclasificación, las fallas de impacto parcial y total.

- **Confiabilidad**

De un componente, sistema o producto no reparable puede tomar valores aleatorios por lo cual se le representa por una variable continua en el tiempo y se aplica teoría de probabilidad para estimar su valor. En términos técnicos, Yang (2007) define la confiabilidad como la probabilidad de que un producto cumpla las funciones para la cual fue creado, dentro de un periodo de tiempo definido y bajo condiciones específicas de operación. Por otro lado, Jiang (2015) indica que la confiabilidad es un atributo de calidad orientado al tiempo.

Por otro lado, Tongdan (2019) define la confiabilidad como la habilidad de un componente o sistema para desempeñar sus funciones bajo condiciones específicas de operación por un periodo de tiempo definido y que expresada como la probabilidad de disponibilidad de un componente o elemento y se denota por $R(t)$.

Escuela de Confiabilidad basada en el análisis probabilístico del tiempo para la falla

En esta escuela, la Ingeniería de Confiabilidad estudia las fallas en base a la información que contiene el historial de las fallas, privilegian el uso de datos como los tiempos de fallas y de reparación de equipos. El estudio de esta escuela se bifurca entre el estudio de los activos reparables y los no reparables, dado que el objeto del estudio es desde el punto de vista de componentes no reparables, sólo se profundizará en el estudio de este tipo de activos. Los activos no reparables están caracterizados por que son de vida única, son reemplazados luego que se presenta la avería, tienen como variable de interés para el estudio al tiempo para la falla, insumo que es empleado para estimar la tasa de fallas.

- **Función de Densidad de Probabilidad (pdf)**

Denotada por $f(t)$, es la función de distribución de falla, de acuerdo con Yang

(2007) es una función básica no usada directamente para calcular la confiabilidad, sino para el cálculo de otras métricas de la confiabilidad.

- Función de Distribución acumulativa

Denotada por $F(t)$, permite el cálculo de que un componente, producto o sistema falle al cumplirse un tiempo específico, es llamada también la probabilidad de falla.

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$$

- Confiabilidad

Denotada por $R(t)$, se le conoce también como función de supervivencia, donde supervivencia puede ser tiempo de vida de un ser vivo o vida útil de un dispositivo. Según Tongdan (2019) la relación entre la Función de Distribución Acumulativa y de Confiabilidad $R(T)$ está dada por la siguiente ecuación:

$$R(t) = \Pr(T > t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

- Función de velocidad del incremento del peligro o tasa de fallas

Denotada por $h(t)$, es la función de riesgo se le conoce como la tasa de falla:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Pr(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{1}{R(t)} \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{f(t)}{R(t)}$$

- Función acumulada de Riesgo

La función acumulada de Riesgo se encuentra denotada por $H(t)$ y se calcula con la siguiente formula:

$$H(t) = \int_{-\infty}^t h(t)dt$$

- Mean Time to Failure (MTTF)

Es el tiempo de vida esperada de un componente, producto o sistema no reparable, de acuerdo con Tongdan (2019) puede ser calculada por la siguiente formula:

$$MTTF = E(t) = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

3.3.12 Función de Distribución de Weibull

De acuerdo con Abernethy (2004) realizar el análisis de falla con la distribución Weibull provee 2 ventajas importantes. La 1era es que se requiere muy pocas muestras para proporcionar una precisión aceptable en la predicción de fallas y la 2da es la disponibilidad del plot Weibull que de forma gráfica permite la obtención de los parámetros de la distribución. Las características anteriores han favorecido la difusión de su aplicación en diversas áreas.

En su forma general la distribución Weibull está expresada por la función $F(t)$ la cual se define como:

$$F(t; \theta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \tau}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$$

Donde: $t \geq \tau$

- θ son los 3 parámetros que caracterizan a la función y llevan los siguientes nombres para poder distinguir uno del otro.

- β : Parámetro de forma, define el perfil de la función Weibull. Cuando β vale 1 se aproxima a la función exponencial y cuando vale 4 a la función Normal.

α : Parámetro de escala, rige si la función en el eje horizontal tendrá base ancha o aguda

- τ : Parámetro de localización, hace referencia al desplazamiento en el eje horizontal de la función respecto al cero.

Otro punto importante que resaltar es que α y β son valores mayores a cero mientras que τ puede tomar un valor mayor igual a cero, justamente cuando toma cero se genera la función de Weibull de 2 parámetros. El que $\tau=0$ significa que la función de distribución de Weibull empieza a construirse en el tiempo=0.

- Función Distribución de Densidad de Probabilidad:

$$f(t) = \left[\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \right] e^{\left[-\frac{t^\beta}{\alpha^\beta} \right]}$$

- Función de Distribución de Probabilidad Acumulada: $F(t)$

$$F(t) = 1 - e^{\left[-\frac{t^\beta}{\alpha^\beta} \right]}$$

- Confiabilidad: $R(t)$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Lo cual también puede expresarse de la siguiente manera, luego de reemplazar el valor de $F(t)$ en la ecuación anterior.

$$R(t) = e^{\left[-\frac{t^\beta}{\alpha^\beta} \right]}$$

Cálculo de Confiabilidad en Sistemas

Para Smith (2017) y Yañez et al. (2004) una forma de calcular la confiabilidad de un sistema es a través de considerarlos que están en serie o paralelo. Se considera en serie cuando basta que un solo componente falle y en paralelo cuando todos los componentes deben

de fallar para que falle el sistema como tal, plantean las siguientes ecuaciones para calcular:

- Sistema Serie

$$R_{\text{sistema}}(t) = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \dots C_n$$

$$h(t)_{\text{sistema}} = 1 - R_{\text{sistema}}(t)$$

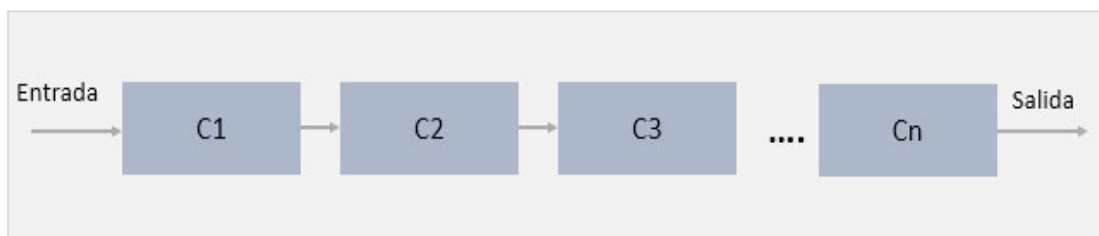


Figura 7. Sistema en serie. Fuente: Smith (2017)

- Sistema Paralelo

$$h_{\text{sistema}}(t) = h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 \cdot h_4(t) \dots \cdot h_n$$

$$R(t)_{\text{sistema}} = 1 - H_{\text{sistema}}(t)$$

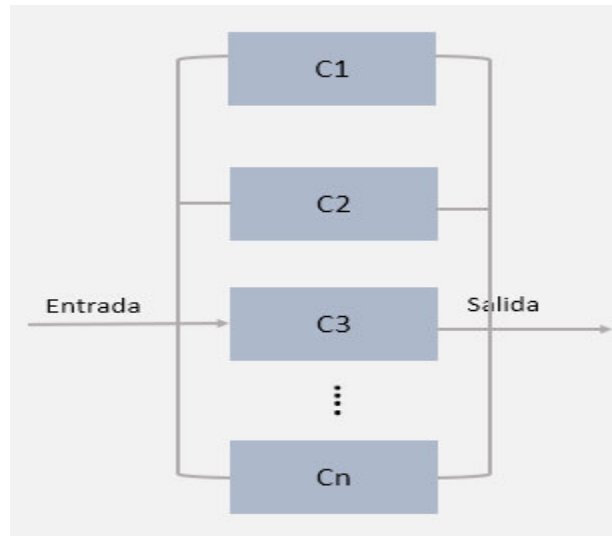


Figura 8. Sistema en Paralelo Fuente: Smith (2017)

3.5. Presentación de resultados

3.3.13 Sistema VSAT Banda Ku de Aplicación

Características del sistema VSAT de Aplicación

- Objetivo: proveer salida a INTERNET a las oficinas remotas
- Alcance: 1500 estaciones terrestres VSAT.
- Configuración: estrella
- Proveedor de capacidad satelital: Eutelsat
- Satélite: Eutelsat 115 W B
- Banda: Ku
- Modulación Outroute: 8PSK
- Modulación Inroute: QPSK
- Diámetro de antena terminal: 1.2 metros Rx / Tx Class
- BUC: 3 W Universal Ku Band
- LNB: Universal Ku Band PLL LNB (excluido del análisis)
- IDU: Satellite Router Evolution X1

En la Figura 9 se puede apreciar el diagrama de la solución satelital VSAT

banda Ku.

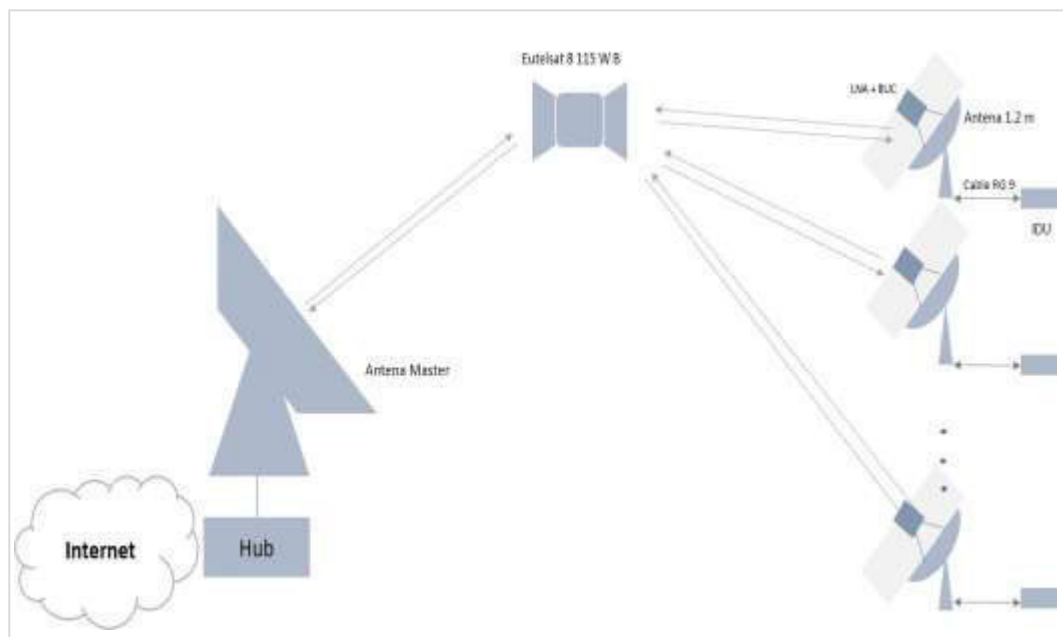


Figura 9. Sistema Satelital VSAT Banda Ku de aplicación. Fuente: *Elaboración del autor*

Satélite Eutelsat 115W B

De acuerdo con Eutelsat (2020), el satélite 115W B, es un satélite completamente eléctrico puesto en órbita en el 01 de marzo del 2015 y fue construido por Boeing Defense & Space. Se localiza a 114.9°. Provee servicios de banda Ku y C en el continente americano. A nivel de banda C tiene una zona de cobertura (Figura 10) y tres en banda Ku (Figuras 11,12 y 13).

El satélite Eutelsat 115W B, tiene capacidad para brindar servicios diversos como: video, broadband, data y mobility.



Figura 10. Zona de Cobertura Satélite Eutelsat 115 W B, Banda C

Fuente: Eutelsat (2021) <https://www.eutelsatamericas.com/es/nuestra-flota/115-oeste.html>

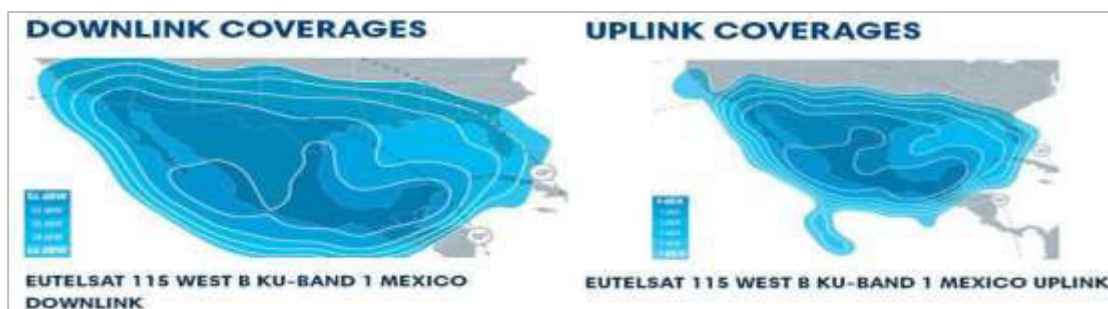


Figura 11. Eutelsat 8 115 W B, Zona 1 Banda Ku

Fuente: Eutelsat (2021), <https://www.eutelsat.com/en/satellites/eutelsat-115-west.html#d14cc055-4d74-4b1c-aa49-2387048d52b2>

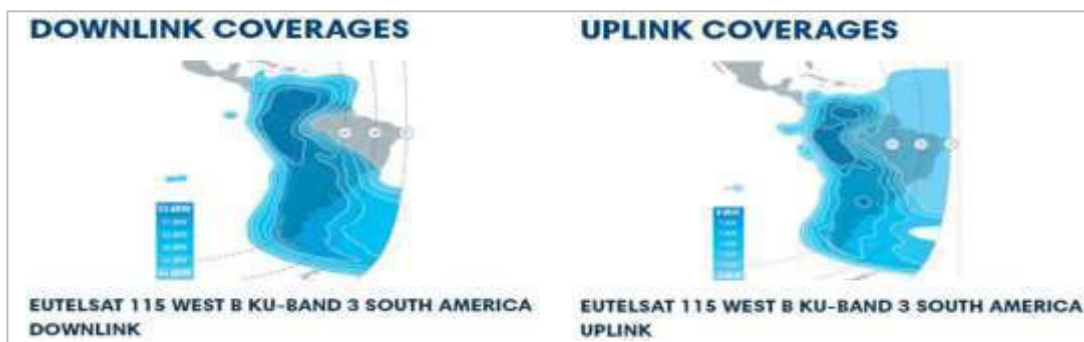


Figura 12. Eutelsat 115 W B – Zona 2 Banda Ku. 2387048d52b2

Fuente: Eutelsat (2021), [https://www.eutelsat.com/en/satellites/eutelsat-115-west.html#d14cc055-4d74-4b1c-aa49-](https://www.eutelsat.com/en/satellites/eutelsat-115-west.html#d14cc055-4d74-4b1c-aa49-2387048d52b2)



Figura 13 Eutelsat 115 W B, Zona 4 Banda Ku

Fuente: Eutelsat, <https://www.eutelsat.com/en/satellites/eutelsat-115-west.html#d14cc055-4d74-4b1c-aa49-2387048d52b2>

Terminal VSAT

A diferencia de los componentes de una estación en banda C, en una estación VSAT banda Ku, varios componentes se encuentran integrados o unidos formando un solo bloque.

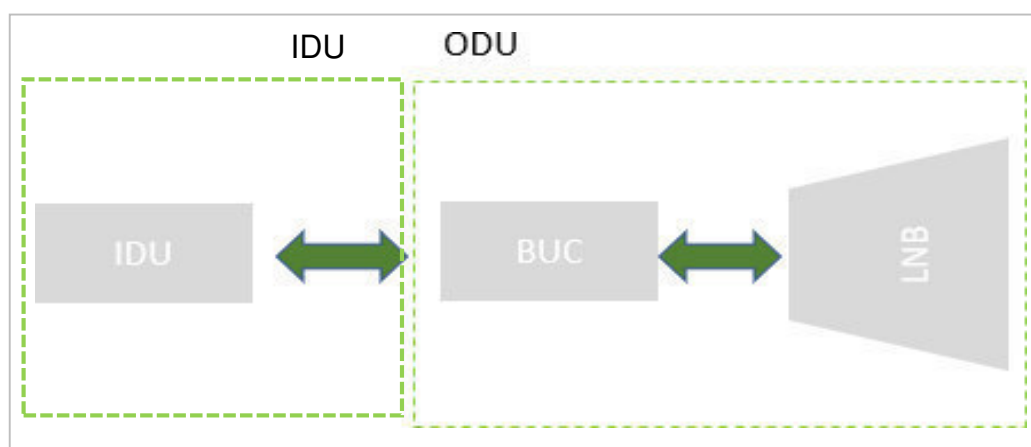


Figura 14. Diagrama de Bloques – Componentes Electrónicos de la termina VSAT

Fuente: Elaboración del autor

Donde:

- IDU (Satellite Router Evolution X1): Es el dispositivo encargado de hacer la interfaz entre la parte de RF y la señal de banda

base en la que viene contenida la información de los usuarios. Se encarga de modular y demodular la señal y hacer la conversión a señal de frecuencia intermedia.



Figura 15. IDU Satellite Router Evolution X100 . Fuente: Datasheet Fabricante Idirect

- BUC: Surge de la unión del Up converter



Figura 16. 3W Universal Ku Band BUC Fuente: Datasheet Fabricante Idirect

- LNB: Es el amplificador de bajo ruido, opera en la etapa de recepción.



Figura 17. Ku Band Universal PLL LNB

Fuente: Datasheet Fabricante Idirect

Información de fallas de los dispositivos electrónicos componentes de la muestra

En la Figura 18, se observa la información estadística de falla de los componentes electrónicos de las terminales VSAT que conforman la muestra, se puede apreciar que las IDUs y los LNBs son los componentes que tienen mayor número de unidades falladas.

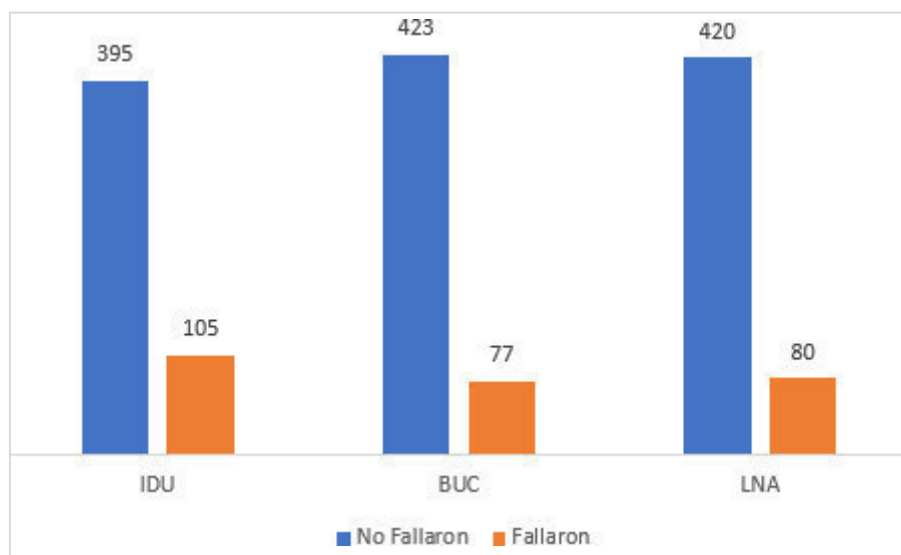


Figura 18. Estadística de falla por tipo de dispositivo

Fuente: Level 3

En la Tabla 2 se muestra la cantidad de IDUs que fallaron y los tiempos en que dicha falla se produjo. Se observa que fallaron 105 unidades fallaron y que 395 mantuvieron su condición de operativas. Por lo tanto, se tiene 395 datos censurados.

Tabla 1. Información de Fallas de IDUs

N°	IDUs (años)	N°	IDUs (años)	N°	IDUs (años)	N°	IDUs (años)
1	0.035	28	1.06899	55	1.9009	82	2.9524
2	0.073	29	1.09959	56	1.9238	83	2.9526
3	0.1121	30	1.1261	57	1.9982	84	2.9605
4	0.1594	31	1.12993	58	2.0021	85	2.9611
5	0.1897	32	1.19298	59	2.0082	86	2.9715
6	0.2273	33	1.2239	60	2.1005	87	2.9743
7	0.2459	34	1.2307	61	2.1027	88	2.9746
8	0.2756	35	1.2346	62	2.1237	89	3.054
9	0.329	36	1.2438	63	2.2383	90	3.128
10	0.3416	37	1.2603	64	2.4084	91	3.1797
11	0.3922	38	1.2821	65	2.4142	92	3.2102
12	0.425	39	1.2946	66	2.4543	93	3.2237
13	0.4394	40	1.3194	67	2.5545	94	3.2404
14	0.4936	41	1.3668	68	2.5567	95	3.2873
15	0.5216	42	1.4269	69	2.6617	96	3.3557
16	0.5787	43	1.438	70	2.6625	97	3.3908
17	0.5811	44	1.4564	71	2.6654	98	3.3933
18	0.62199	45	1.4647	72	2.83214	99	3.4346
19	0.6395	46	1.4705	73	2.843	100	3.451
20	0.6483	47	1.5743	74	2.85901	101	3.5056
21	0.7034	48	1.7606	75	2.9113	102	3.5088
22	0.764	49	1.7612	76	2.9221	103	3.5142
23	0.8198	50	1.7661	77	2.9228	104	3.5303
24	0.8883	51	1.7692	78	2.933	105	3.6893
25	0.8998	52	1.7694	79	2.9339	-	-
26	0.90729	53	1.8803	80	2.9387	-	-
27	1.00304	54	1.8879	81	2.9394	-	-

Fuente: Level 3

Por otro lado, la información de fallas de las BUCs es mostrada en la Tabla 3. Se puede apreciar que durante el periodo de observación

fallaron 77 unidades 403 mantuvieron operativas, por lo tanto hay 403 datos censurados, BUCs que no fallaron.

Tabla 2. Información de Falla de las BUCs

N°	BUCs(años)	N°	BUCs(años)	N°	BUCs(años)	N°	BUCs(años)
1	0.028	21	1.0955	41	1.9123	61	2.9716
2	0.1272	22	1.1039	42	1.9722	62	2.9719
3	0.1902	23	1.1178	43	1.9505	63	2.9934
4	0.2187	24	1.1298	44	1.9988	64	2.9969
5	0.2588	25	1.1306	45	2.0211	65	3.1304
6	0.3185	26	1.2685	46	2.1443	66	3.2709
7	0.4257	27	1.2879	47	2.2459	67	3.3443
8	0.4652	28	1.3287	48	2.2626	68	3.3934
9	0.5251	29	1.3295	49	2.3393	69	3.4211
10	0.5332	30	1.3597	50	2.3806	70	3.4676
11	0.5852	31	1.3605	51	2.4564	71	3.4901
12	0.5898	32	1.5637	52	2.4952	72	3.5065
13	0.6499	33	1.5975	53	2.6236	73	3.5092
14	0.6851	34	1.6093	54	2.6345	74	3.5723
15	0.7746	35	1.6661	55	2.7061	75	3.6263
16	0.8289	36	1.7593	56	2.7798	76	3.6455
17	0.8627	37	1.7672	57	2.8023	77	3.7002
18	0.9658	38	1.7962	58	2.9551	-	-
19	0.9771	39	1.8955	59	2.9532	-	-
20	0.9886	40	1.8978	60	2.9717	-	-

Fuente: Level 3

3.3.14 Identificación de la Función de distribución

Haciendo uso de los datos para la falla registrado en las Tablas 2, 3 se procede a realizar el análisis de confiabilidad con el software estadístico MINITAB con el fin de comparar el ajuste de los datos de fallas de las IDUs, BUCs y LNBs a las funciones Weibull de 2 parámetros, Weibull 3 parámetros, Exponencial y Normal. De los resultados se observa que la distribución Weibull de 2 parámetros es la que tiene un mejor ajuste para los 2 dispositivos.

El software estadístico MINITAB trae consigo la facilidad para validar el ajuste de los datos a determinadas funciones distribución, así como el de poder realizar análisis de confiabilidad con diversos tipos de censura. En la Figura 19, se puede apreciar la ruta seguida en dicho software para hacer la comparación de los ajustes de los datos a las funciones de distribución elegida.

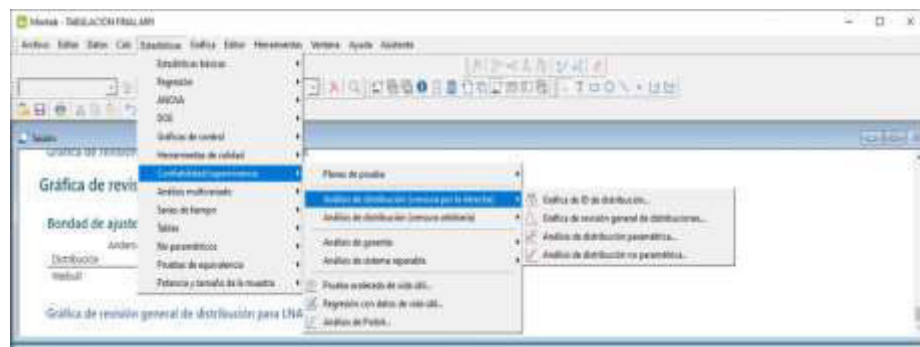


Figura 19. Análisis de Confiabilidad con datos censurados por la derecha

Fuente: Elaboración del autor, Minitab

En las Figuras 20 y 21 se puede apreciar la comparación de los ajustes de datos de falla de la IDUs y BUCs a las funciones Weibull, Weibull 3 parámetros, Exponencial y Normal. Se aprecia que la distribución Weibull es la que presenta el mejor ajuste a los datos de falla de los 3 tipos de dispositivos, por lo cual la distribución Weibull será usada para los cálculos siguientes.

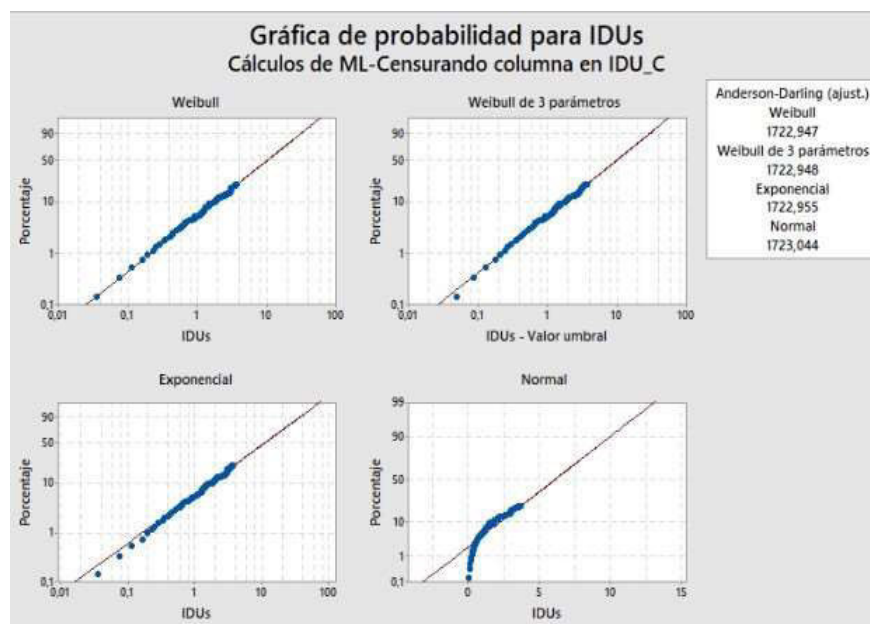


Figura 20. Prueba de ajuste de bondad datos de fallas de las IDUs

Fuente: Minitab

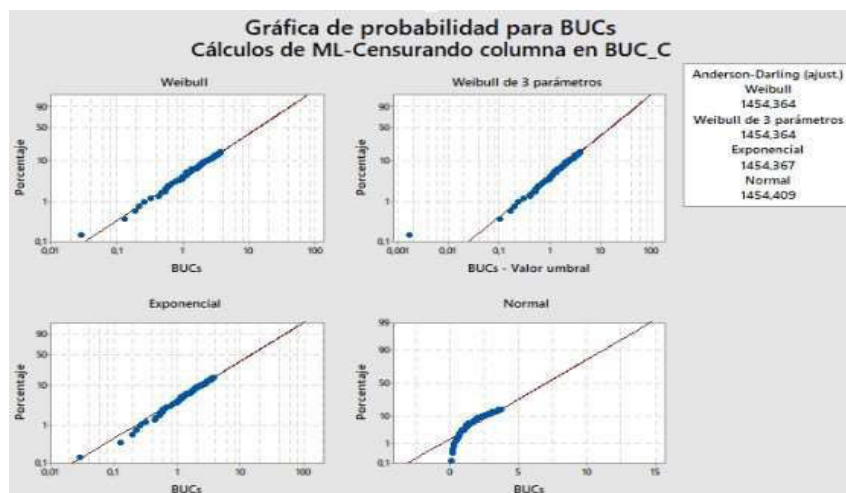


Figura 21 Prueba de ajuste de bondad de los datos de fallas de las BUCs,

Fuente: Minitab

3.3.15 Cálculo de los Parámetros de la distribución Weibull

Con el uso de del análisis de Confiabilidad disponible en MINITAB se procedió a encontrar los parámetros de la función de Weibull, forma y escala. Los resultados se muestran en las Figuras 22 y 23 para las IDUs y BUCs

respectivamente, dichas figuras también muestran las funciones de densidad de probabilidad, supervivencia y de riesgo.

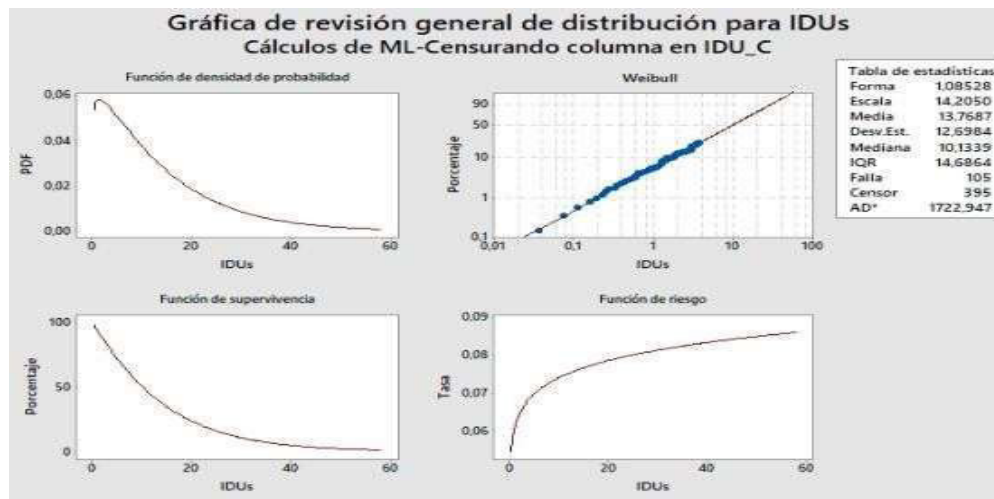


Figura 22 Parámetros de Weibull - IDUs

Fuente: Minitab

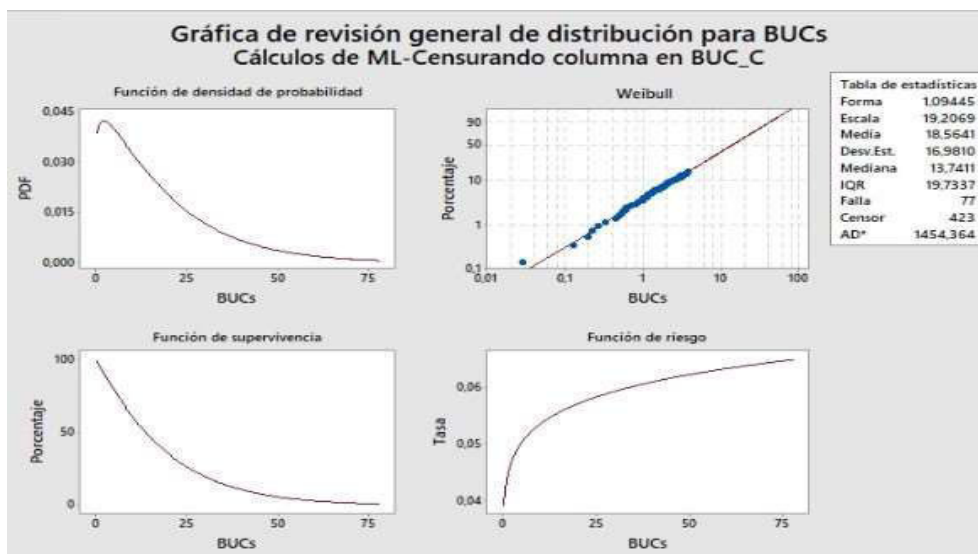


Figura 23 Parámetros de Weibull - BUCs

Fuente: Minitab

En la Tabla 3, se ha resumido los valores de los parámetros de Forma y Escala para cada uno de los tres dispositivos y hallados en las Figuras 22 y 23.

Tabla 3. Resumen de parámetros de Forma y Escala para los tres componentes electrónicos

Componente	Forma (β)	Escala (η)
IDUs	1,08528	14,2050
BUCs	1,09445	19,2069

Fuente: Elaboración del autor

3.3.16 Modelos de Confiabilidad para los componentes estudiados

Con los parámetros β y η hallados para las IDUs y BUCs, Tabla 3, se procede a formular las ecuaciones matemáticas, usando la ecuación obtenida para la distribución Weibull en la sección 3.4.9. El resultado se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 4. Modelos de Confiabilidad para las IDUs y BUCs de las terminales VSAT

Componente	R(t)
IDU	$e^{-\left(\frac{t}{14.2050}\right)^{1.08528}}$
BUC	$e^{-\left(\frac{t}{19.2069}\right)^{1.09445}}$

Fuente: Elaboración del autor

3.3.17 Predicciones

Usando las ecuaciones de la Tabla 5, se procede a calcular el valor de confiabilidad al año cinco para cada uno de los componentes.

Tabla 5. Confiabilidad al término del quinto año de los componentes electrónicos

Componente	Confiabilidad (5 años)
IDU	0.68249
BUC	0.75208
LNB	0.85824

Fuente: Elaboración propia

3.3.18 Evaluación Económica

Tabla 6. Cronograma de desinstalación terminales VSAT

Terminales VSAT (Unid)	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
Desinstaladas	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Por desinstalar	1350	1200	1050	900	750	600	450	300	150	0

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 7. Costo unitario de Instalación y Desinstalación de la Terminal VSAT

Item	Costo (USD\$)
Costo de Instalación	550
Costo de desinstalación	700
Valor de Terminal VSAT	1200

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 8. Pronóstico de utilización de las terminales recuperadas

Terminales (Unid)	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
Para producción (20%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Terminales para ventas (80%)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Total	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 9. Flujo de Caja – Proyecto de Desinstalación

	Mes 0	Mes1	Mes2	Mes3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10
INGRESO											
Servicios Satelitales nuevos (USD \$)	0	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000
Venta de terminales VSAT (USD \$)	0	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000	540000
Total Ingresos (USD \$)	0	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000	168000
EGRESOS											
Almacén	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Gastos de ventas (USD \$)	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800
Costo de desinstalación (USD \$)	105000	105000	105000	105000	105000	105000	105000	105000	105000	105000	
Costo de Instalación (USD \$)	0	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500	16500
Total egresos (USD \$)	113800	130300	130300	130300	130300	130300	130300	130300	130300	130300	25300
Flujo de Caja (USD \$)	-113800	433700	433700	433700	433700	433700	433700	433700	433700	433700	538700

Fuente: Elaboración del autor

Con ayuda de EXCEL se calcula el VAN con una tasa de descuento de 6% obteniéndose

Tabla 10. VAN y TIR del Proyecto

Tasa de descuento	15%
Inversión Inicial	(\$113,800.00)
N	10
VAN	\$101,361.97
TIR	33%

Fuente: Elaboración del autor

Dado que el VAN es positivo y la TIR mayor que la tasa de descuento se recomienda aceptar el proyecto.

IV. CONCLUSIONES

Luego de realizar el análisis de confiabilidad de los tres componentes electrónicos de las terminales VSAT se puede concluir lo siguiente:

- El valor de confiabilidad de 68.249% para la IDU lo hace recomendable recuperarlo para volver a ponerlo en producción.
- El valor de confiabilidad de 75.208% obtenida para las BUC , hace apto su reutilización en otros proyectos.
- En la zona rural peruana, las IDUs son los dispositivos más propensos a las averías, así como a obtener un menor nivel de confiabilidad respecto a los LNBs y BUCs

V. RECOMENDACIONES

Se sugieren las siguientes recomendaciones

- Realizar estudios similares, pero con marcas de otros fabricantes y modelos para hacer comparativas de performance y confiabilidad.
- A fin de facilitar la aplicación de análisis de confiabilidad se recomienda llevar una documentación exhaustiva de información de operación y mantenimiento, que detalle de forma estándar datos de la falla como día y hora de ocurrencia.
- A fin de poder plantear un modelo más exacto es importante la documentación en la etapa de implementación para poder por ejemplo identificar los componentes que fallaron antes que la red entre en producción.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Abernethy, R. (2004). *The New Weibull Handbook 5th edition*. USA. R.B Abernethy
- Alencar, M. y Da Rocha, V. (2020). *Communication Systems 2nd edition*. Switzerland. Springer.
- Beard, C. y Stallings, W. (2015). *Wireless Communication Networks and Systems*. USA. Pearson.
- Blitzstein, J. y Hwang, J. (2019). *Introduction to Probability, Second Edition*. Taylor & Francis Group, LLC
- Dybdal, R. (2009). *Communication Satellite Antennas: System Architecture, Technology, and evaluation*. USA. McGraw- Hill
- Eutelsat (23 de Abril 2020). Web Eutelsat. Recuperado de <http://www.eutelsat.com>
- Frenzel, L (2016). *Principles of Electronic Communication Systems, 4th edition*. USA. McGraw-Hill.
- Inglis, A. y Luther, A. (1997). *Satellite Technology: an Introduction, Second Edition*. USA. El Sevier.
- Grami, A. (2020). *Probability, Random Variables, Statistics and Random Processes, Fundamentals & Applications*. John Wiley / Sons, Inc.
- Jiang, R. (2015). *Introduction to Quality Reliability Engineering*. USA. Springer.
- Maral, G (2003). *VSAT Networks*. USA. Wiley & Sons
- Maini, A. y Agrawal, V. (2014). *Satellite Technology Principles and Applications*. USA. Wiley.
- Olorunfunmi, M. (2014). *Satellite Communication Engineering*. USA. CRC Press.
- Oppenheim, A., Verghese, G. (2016). *Signals, Systems & Inference*. USA. Pearson.

- Paredes, C. (2012). *Pronóstico de fallas e implementación plan de gestión Confiabilidad de repuestos críticos en la minería de Hierro*. Chile. Universidad Austral de Chile.
- Pratt, T. & Allnutt, J. (2020). *Satellite Communications*. USA. Wiley
- Robertazzi, T. (2107). *Introduction to Computer Networking*. USA. Springer.
- Ramírez, S. (2014). *Datos de Falla. Colombia*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Roddy, D. y Coolen, J. (2014). *Electronic Communications*. India. Pearson
- Rosado, R (2017). *Evaluación de métodos para determinar la confiabilidad mediante la distribución de Weibull: caso Planta San Antonio*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Smith, P (2002). *Analysis of failure and Survival data*. USA. CRC Press.
- Tongdan, J. (2019). *Reliability Engineering and Services*. USA. Wiley.
- Triola, M. (2018). *Estadística*. México. Pearson Educación.
- Villanueva, M (2017). *Gestión del Mantenimiento basado en la confiabilidad de las redes del subsistema de distribución eléctrico 22.9/13.2 Kv de San Gabán – Ollachea*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.
- Yang, G. (2007). *Reliability Engineering*. USA. Jhon Wiley & Sons.
- Yañez, M., Gómez, H. y Valbuena, G. (2004). *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo*. Venezuela. Reliability and Risk Management