



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”
ESCUELA DE POSTGRADO**



MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

“MEDIDA DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE LA RED TELEMÁTICA DE LA UNPRG APLICANDO LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN DE SHANNON”

TESIS

PRESENTADA PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS CON MENCIÓN EN GERENCIA DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y GESTIÓN DEL SOFTWARE.

AUTOR:

KELY DORELY PADILLA HUAMÁN

ASESOR:

M.Sc. Ing. ROBERT EDGAR PUICAN GUTIÉRREZ

LAMBAYEQUE, ENERO DEL 2019

DATOS INFORMATIVOS

Título del proyecto

Medida de información y comunicación de la infraestructura de la Red Telemática de la UNPRG aplicando la Teoría de la Información de Shannon

Personal investigador

Autora

Nombre : Kely Dorely Padilla Huamán

Email : karateca180@hotmail.com

Teléfono : 979624099

Asesor

Nombre : M.Sc. Ing. Robert Edgar Puican Gutiérrez

Email : rpuicang@hotmail.com

Teléfono : 979676730

Maestría

Maestría en Ingeniería de Sistemas con mención en Gerencia de Tecnologías de la Información y Gestión del Software

Localidad e institución donde se desarrolló la investigación

Red Telemática de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Línea de investigación

Gerencia de tecnologías de la información

Fecha de presentación

Octubre del 2018

Presentado por

Lic.Mat. Kely Dorely Padilla Huamán
Autora

M.Sc. Ing. Robert Edgar Puican Gutiérrez
Asesor

La presente Tesis “Medida de información y comunicación de la infraestructura de la Red Telemática de la UNPRG aplicando la Teoría de la Información de Shannon” fue elaborada como requisito fundamental para optar el Grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas con mención en Gerencia de Tecnologías de la Información y Gestión del Software y aprobada por:

Dr. Ernesto Karlo Celi Arévalo
Presidente

Mag. Segundo Pedro Fiestas Rodríguez
Secretario

Mag. Jesús Bernardo Olavarría Paz
Vocal

DEDICATORIA

Este trabajo dedico a Dios que me ha dado vida y fortaleza por estar conmigo donde vaya y a mi madre la cual por ella fue el motivo de seguir esta maestría y siempre llevare en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios padre por bendecirme siempre, haber permitido la culminación de este trabajo y a mis padres Manuel y María por su gran paciencia y su ayuda moral.

A los amigos hermanos que me encaminaron a la realización y culminación de esta maestría que Dios siempre los bendiga.

Agradecer de una forma muy especial para los colaboradores que me brindaron su apoyo en la realización de este trabajo:

- Dr. Ernesto Karlo Celi Arévalo.
- Dr. Manuel Adriano Padilla Pérez.

RESUMEN

Esta investigación tiene el propósito de construir un modelo de referencia teórico, basado en los fundamentos de la Teoría de la Información de Shannon (complementado por los aportes de Nyquist y Hartley) para estimar los valores ideales de la capacidad de los canal de comunicación en la infraestructura conocida como Red Telemática, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque – Perú, en relación a la velocidad de transmisión, uso del ancho de banda y ruido generado. A partir de estos valores, determinar la eficiencia de estas variables en la gestión de la red, recopilando datos que evalúen las mismas variables, pero usando software de especialidad para el análisis de redes.

Palabras claves: Teoría de Shannon, velocidad de transmisión, banda ancha, ruido, capacidad de un canal de comunicación

ABSTRACT

This research aims to build a theoretical reference model, based on the fundamentals of Shannon's Information Theory (complemented by the contributions of Nyquist and Hartley) to estimate the ideal values of the capacity of communication channels in the infrastructure known as Red Telemática, of the Pedro Ruiz Gallo National University of Lambayeque - Peru, in relation to the speed of transmission, use of bandwidth and noise generated. From these values, determine the efficiency of these variables in the management of the network, collecting data that evaluate the same variables, but using specialty software for network analysis.

Keywords: Shannon theory, transmission speed, bandwidth, noise, capacity of a communication channel

TABLA DE CONTENIDOS

DATOS INFORMATIVOS	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1. Descripción del problema	14
1.2. Formulación de la pregunta de Investigación.....	16
1.3. Objetivos de la investigación	17
1.3.1. Objetivo General	17
1.3.2. Objetivos específicos:.....	17
1.4. Justificación e importancia de la investigación.....	17
II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes de la investigación.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. Fundamentación teórica científica.....	19
2.2.1. Comunicación.....	19
2.2.2. Información.....	20
2.2.3. Principios de la medición de la información.....	21
2.2.4. Unidad de información	23
2.2.5. Redundancia	25
2.2.6. Teoría matemática de la comunicación	27
2.2.6.1. El propósito de la Teoría matemática de la comunicación	27
2.2.6.2. El problema de la codificación.....	29
2.2.6.3. Medidas de información	32
2.2.6.4. Teoremas de Shannon.....	35
2.2.7. Capacidad del canal de comunicación	38
2.2.7.1. Canal de comunicación	38
2.2.7.2. Elementos que intervienen en la definición de la capacidad de un canal de transmisión	39
2.2.7.3. Definición de capacidad de un canal de transmisión	40
2.2.7.4. Unidad de medida de la capacidad del canal de transmisión.....	41
2.2.7.5. Capacidad del canal de transmisión ideal	41
2.2.7.6. Capacidad de un canal de transmisión con ruido.....	43
2.2.7.7. Eficiencia de un canal de comunicación.....	46
III. MARCO METODOLÓGICO	48
3.1. Hipótesis.....	48
3.2. Tipo de investigación	48
3.3. Operacionalización de variables.....	48
3.4. Diseño de la prueba de hipótesis	49
3.5. Población y muestra del estudio	50
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52

4.1.	Análisis de la infraestructura de la red de telecomunicaciones en la UNPRG	52
4.1.1.	Análisis de la infraestructura del servicio de telefonía	52
4.1.2.	Análisis de la Infraestructura de la red de comunicación de datos.....	58
4.1.2.1.	Backbone de Fibra Optica.....	59
4.1.2.2.	Subsistema de cableado horizontal	62
4.1.2.3.	Infraestructura de equipos activos de comunicaciones	63
4.1.2.4.	Capa Core: Switch Cisco Catalyst 4507R	64
4.1.2.5.	Capa de Acceso: Switches Cisco Catalyst	65
4.1.3.	Enlaces inalámbricos a dependencias administrativas	65
4.1.4.	Dispositivos de enrutamiento e Internet de Banda Ancha	66
4.2.	Análisis de la capacidad del canal con la infraestructura existente.....	71
4.2.1.	Identificación de los canales de comunicación.....	71
4.2.2.	Análisis del tráfico y estimación de los valores reales de las variables de la investigación sobre F.O.	76
4.2.3.	Análisis del tráfico y estimación de los valores reales de las variables de la investigación sobre enlaces de Internet dedicado de 2 Mbps y 10 Mbps.....	80
4.3.	Análisis de la capacidad del canal con los valores teóricos obtenidos aplicando el Teorema de Shannon	83
4.3.1.	Especificaciones de los componentes del sistema de comunicación	83
4.3.2.	Cálculo de los valores de las variables de la investigación aplicando el Teorema de Shannon	87
	CONCLUSIONES	94
	RECOMENDACIONES	96
	REFERENCIAS DE CONSULTA.....	97

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1. Representación de un bit de información.....	23
Gráfico N° 2. Representación de la cantidad de información que se puede obtener con 3 bits	23
Gráfico N° 3. Elementos de un sistema de comunicación general	29
Gráfico N° 4. Relación entre las entropías de la fuente H(S) y del destinatario H(D)	33
Gráfico N° 5. Esquema de codificación en un canal con ruido	36
Gráfico N° 6. Sistema de comunicación, según Shannon	38
Gráfico N° 7. Sistema de comunicación, según Shannon	43
Gráfico N° 8. Nivel de ruido en relación a la velocidad de transmisión	45
Gráfico N° 9. Modelo jerárquico de nivel funcional en 3 capas para la red VoIP	53
Gráfico N° 10. Conectividad del Teléfono IP al Switch Cisco Catalyst.....	56
Gráfico N° 11. Arquitectura de red IP con Telefonía IP en la UNPRG	57
Gráfico N° 12. Asterisk como plataforma de gestión de llamadas de la red VoIP.....	58
Gráfico N° 13. Estructura del medio de transmisión en fibra óptica de la Red Telemática - UNPRG.....	61
Gráfico N° 14. Marco de conexión horizontal de uno de los gabinetes de telecomunicaciones - UNPRG.....	63
Gráfico N° 15. OptiX 155/622H (Metro1000) - Huawei.....	67
Gráfico N° 16. Router Cisco 2821 y 2801 - UNPRG	69
Gráfico N° 17. Arquitectura de red IP de la UNPRG	70
Gráfico N° 18. Backbone de la red de telemática UNPRG, Sección: Campus Universitario	74
Gráfico N° 19. Backbone de la red de telemática UNPRG, Sección: Campus Universitario	75
Gráfico N° 20. Máximo tráfico soportado desde equipos activos del nodo A a nodo T.	76
Gráfico N° 21. Utilización de ancho de Banda desde el nodo A	77
Gráfico N° 22. Utilización mensual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 2Mbps	81
Gráfico N° 23. Utilización anual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 10Mbps.....	81
Gráfico N° 24. Utilización mensual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 10Mbps	81
Gráfico N° 25. Utilización anual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 10Mbps.....	82
Gráfico N° 26. Canal de comunicación FO Monomodo	83
Gráfico N° 27. Canal de comunicación FO Multimodo	84
Gráfico N° 28. Diámetros de la FO Multimodo y Monomodo	85
Gráfico N° 29. Velocidades de transmisión según variantes Ethernet por tipo de FO	86
Gráfico N° 30. Atenuación de la señal según la distancia por tipo de FO	87

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Representación de las posibles elecciones de signos con tres bits	24
Tabla N° 2 : Operacionalización de las variables de la investigación	49
Tabla N° 3 : Distribución de Canales de Voz IP por Nodos	55
Tabla N° 4 : Ubicación de los nodos de conectividad en el Campus Universitario.....	71
Tabla N° 5 : Ubicación de los nodos de conectividad externos al Campus Universitario.....	72
Tabla N° 6 : Metrado y tipo de F.O.....	72
Tabla N° 7 : Bandejas y empalmes de F.O.....	73
Tabla N° 8. Utilización de ancho de banda (BW), latencia y confiabilidad de la red en la transmisión de paquetes IP	79
Tabla N° 9. Utilización de ancho de banda de internet en líneas dedicadas en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.....	82
Tabla N° 10. Parámetros para el análisis de la velocidad de transmisión en un canal sin ruido	88
Tabla N° 11. Parámetros para el análisis de la velocidad de transmisión en un canal con ruido	89
Tabla N° 12. Comparativa de las velocidades de transmisión real y teórica (Shannon).....	90
Tabla N° 13. Cálculo del ancho de banda de los tramos de los canales de transmisión analizados	91
Tabla N° 14. Comparativa de los ancho de banda real y teórico	92

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las civilizaciones desde sus principios ha estado asociado al desarrollo de la tecnología. Aquella civilización que construía su propia tecnología o aprovechaba de mejor manera una tecnología en particular, se desarrollaba más rápido en algún campo de la ciencia o satisfacía mejor sus propias necesidades. De repente han sido aquellas tecnologías que lograban transformar un recurso natural en una fuente de energía o en un nuevo material las que ocasionaban un mayor cambio en la industria, y por consiguiente un mayor desarrollo de la civilización o sociedad que lo hacía.

Sin embargo, desde hace algunas décadas, el desarrollo de una sociedad ya no ha estado exclusivamente relacionado con tecnologías para la transformación de algo material; si no para el procesamiento de algo más inmaterial, como es la información. Es decir, con aquella tecnología que permitía la transmisión, el procesamiento y el almacenamiento de datos, a lo que actualmente lo llamamos “tecnologías de la información”.

La influencia de este tipo de tecnologías en nuestras vidas está alcanzando proporciones considerables. Las relaciones políticas, económicas, sociales de los países, organizaciones, incluso de las personas, se encuentran cada más dependiente de la cantidad y calidad de la información que gestionan. Incluso, la compra, la venta, el almacenamiento y la gestión de información han sido rubros que ha permitido la aparición de empresas dedicadas a ello, alcanzando desarrollos considerables y colocándose dentro de las empresas top a nivel mundial. Las organizaciones y las empresas desarrollan sus procesos administrativos y de negocio soportados sobre una plataforma tecnológica que gestiona el flujo de la información que se genera a partir de éstos, y cada vez son más dependientes de este tipo de tecnología.

Este contexto actual ha ocasionado que el avance de las tecnologías de la información sea vertiginoso provocando cambios profundos en nuestra forma de vida, en la forma como nos comunicamos, relacionamos, trabajamos, satisfacemos el ocio, etc.; tanto que a la civilización contemporánea se le conozca como “sociedad de la información”.

En el campo de la ciencia, los aportes teóricos y las investigaciones sobre “información” también han sido considerables, llegando a ser columna vertebral en casi todas las

áreas de la ciencia. Por ejemplo, en la biología, hoy en día hay grandes esfuerzos económicos y de personal para descifrar el papel crucial que juega la información en el interior de los organismos considerados como conjuntos de mecanismos biológicos con capacidad de procesamiento de información; en psicología, el esfuerzo se dedica a la descripción y explicación de los procesos mediante los cuales los organismos codifican y transmiten información. Incluso en disciplinas tan aparentemente alejadas de estos paradigmas como la propia filosofía, el tema de la información está adquiriendo una gran fuerza como hipótesis explicativa en el campo de la epistemología y la acción humana.

Este nuevo paradigma de la gestión de la información, incluso ha permitido la aparición de nuevas ramas de la ciencia, dedicadas específicamente a crear modelos conceptuales y físicos que representen, reproduzcan y mejoren las estrategias que utilizamos las personas y las organizaciones para producir y procesar flujo informativo, como es el caso de las Ciencias de la Computación, la Ingeniería del Software y la Inteligencia Artificial, entre otras.

Entre todas estas teorías destaca una en especial, la que se ha conocido con el nombre de "Teoría de la Información". La teoría de la información, también conocida como teoría matemática de la comunicación (mathematical theory of communication) o teoría matemática de la información, es una propuesta teórica presentada por Claude E. Shannon y Warren Weaver a finales de la década de los años 1940. Esta teoría está relacionada con las leyes matemáticas que rigen la transmisión y el procesamiento de la información y se ocupa de la medición de la información y de la representación de la misma, así como también de la capacidad de los sistemas de comunicación para transmitir y procesar información (Chen, 2016). La teoría de la información es una rama de la teoría matemática y de las ciencias de la computación que estudia la información y todo lo relacionado con ella: canales, compresión de datos y criptografía, entre otros.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El mundo que habitamos hoy, con el incesante desarrollo tecnológico, el aumento considerable de la población mundial y la creciente interacción entre individuos e instituciones de distintas regiones del planeta, ha dado lugar a un aumento sin precedentes en las capacidades de la especie humana para transmitir y procesar información. El ejemplo más conspicuo de esto es quizá el advenimiento de internet, una inmensa red que interconecta a miles de millones de personas en todo el planeta. Esta capacidad para transmitir y procesar información había tenido sus antecesores en el telégrafo, las ondas de radio, el teléfono y otros sistemas de comunicación más antiguos (Holik, 2018).

Algunos autores, han llegado a afirmar que vivimos en la 'era de la información'. Independientemente del debate acerca de si esta caracterización histórica es adecuada o no, lo cierto es que el estudio de los problemas técnicos asociados a la transmisión, medición y procesamiento de la información ha cobrado vital importancia para las relaciones sociales y comerciales de la sociedad globalizada. Sin ir más lejos, los mercados actuales dependen fuertemente de que los canales informacionales entre los distintos agentes económicos funcionen en forma fluida y eficiente. Pero la importancia del estudio de los flujos informacionales y su correcto funcionamiento va más allá de la esfera estrictamente económica y abarca fines militares, científicos y recreativos.

En este contexto, el estudio de la Teoría de la Información ha tenido un creciente desarrollo, en el que cada vez más investigadores aúnan esfuerzos para resolver los desafíos planteados por la existencia de unos volúmenes de flujo de información muy difíciles de manejar y administrar. Y es especialmente importante que estos desarrollos contemplen el aspecto matemático formal de la noción de información, de forma tal que ésta se pueda medir y cuantificar para ser aplicada con fines tecnológicos (Holik, 2018).

Físicos, matemáticos e ingenieros electrónicos (como C. Shannon, N. Wiener, Von Neuman y N. Morgenster) abordaron los problemas de la comunicación desde la perspectiva de determinar formalmente cuáles son las condiciones generales para la transmisión de mensajes con independencia de cuál pueda ser el «contenido» de los mensajes transmitidos. Desde esta perspectiva

informativa se analiza cuál es la cantidad de señales que pueden transportarse por un determinado canal de modo que puedan transmitirse mayor cantidad de mensajes distintos y con la menor ambigüedad y de qué forma esto es posible.

La teoría que formaliza una respuesta a esta pregunta se denomina Teoría de la Información, o también en su origen, Teoría matemática de la Comunicación. Ambas acepciones sirven para distinguir esta teoría de cualquier otra. Los postulados de la Teoría de la Información consideran el transporte de señales y la medida de la complejidad como criterios últimos de los que depende la posibilidad de transmitir mensajes (Serrano, Piñuel, Gracia, & Arias, 2012).

Los aspectos de los procesos comunicativos que interesan a la Teoría de la Información son (Serrano, Piñuel, Gracia, & Arias, 2012):

- a. Determinar la cantidad de información (que se simboliza por la letra H) que puede contener un flujo de mensajes. Este cálculo se establece a partir de la relación entre el número de señales distintas efectivamente transportadas en el mensaje, y el número total de señales distintas de que se dispone para transmitirlo en la fuente. Dicho de otra manera, se trata de calcular la «previsibilidad» de las señales. Es decir, la cantidad de información, H , se funda en el cálculo de probabilidades. El cálculo de esa previsibilidad permite conocer en qué medida los mensajes son formalmente distintos y diferentes. Cuanto mayor es la complejidad del sistema de señales, mayor es la capacidad que tiene el agente de informarla (organizarla) para la transmisión de mensajes distintos.
- b. Determinar el canal o red de comunicación alternativa, por la que pueda circular más información (mayor número de mensajes por número de señales), con más rapidez y a mayor número de usuarios.
- c. Determinar la forma de codificación, es decir, de organización de secuencias de señales, que permita con mayor simplicidad discriminar sin ambigüedad mayor variedad de mensajes.
- d. Determinar los efectos que sobre la decodificación (es decir, la identificación correcta de las señales empleadas y de su secuencia) puede producir las perturbaciones introducidas durante el transporte.

Estas perturbaciones pueden generarse por la falta de capacidad del canal o por la apertura de este canal a otras señales externas al mensaje (ruidos). A los efectos ocurridos en el transporte pueden añadirse otros generados por la concurrencia de señales que llegan al receptor simultáneamente por otros canales.

En otras palabras, las variables que los teóricos de la información calculan sirven para medir y verificar las condiciones óptimas para la transmisión de mensajes. Tales condiciones requieren:

1. Que al número más reducido posible de señales se ajuste la mayor cantidad de mensajes diferentes posible.
2. Que se seleccione el canal más apropiado para hacer circular más información y al mayor número de usuarios.
3. Que se construya el código más rentable para el mayor número posible de mensajes y con la menor ambigüedad en su determinación.
4. Que se limiten al mínimo los «riesgos» de la distorsión y del ruido en la transmisión, provocados por aquellos fenómenos con los que forzosamente hay que contar al no poder ser eliminados de la naturaleza.

En ese sentido, la motivación para el desarrollo de esta tesis ha sido aplicar los fundamentos teóricos de la Teoría matemática de la comunicación para evaluar el sistema de comunicación que utiliza la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo para brindar sus diferentes servicios de información y comunicación, que sobre ella se ejecutan. Esta plataforma de comunicación es conocida como Red Telemática.

1.2. Formulación de la pregunta de Investigación

¿Cuál es el nivel de eficiencia de la infraestructura de la red telemática de la UNPRG para la comunicación de la información?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo General

Aplicar la Teoría de la información de Shannon para evaluar el nivel de eficiencia de la infraestructura de la red telemática de la UNPRG para luego comparar en relación a la comunicación de la información.

1.3.2. Objetivos específicos:

- a. Determinar el nivel de transmisión de los canales de transmisión de la Red Telemática.
- b. Determinar el nivel de eficiencia en el uso del ancho de banda de los canales de transmisión en la Red Telemática.
- c. Determinar la cantidad de ruido que se genera en canales de transmisión en la Red Telemática.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación se justifica y es importante por las siguientes razones:

a. Pertinencia de la investigación

Esta es una investigación pertinente porque es oportuna y conveniente.

Es oportuna, porque de la revisión literaria realizada encontramos que existe muy poca documentación relacionada con la aplicación de la Teoría de la Información en contextos de sistemas de comunicación con tecnologías de información actuales, como el Internet o redes de computadoras conectadas a través de sistemas inalámbricos o por cableado de fibra óptica, como es el caso específico del caso de estudio de la Red Telemática de la UNPRG. Ante este escenario, la oportunidad de la investigación se expresa en el aporte que esta investigación brindará a la confirmación de la aplicabilidad de la teoría estudiada.

Es conveniente, porque los resultados de la investigación permitirán a los responsables de la gestión de las infraestructuras de comunicación y redes en las organizaciones, contar con un modelo que les permita evaluar la eficiencia de sus sistemas de comunicación en el proceso de transmisión de la información, específicamente para determinar la capacidad de sus

canales de comunicación y el nivel de ruido o distorsión de la información que en éstos existe.

b. Relevancia de la investigación

La presente investigación realizará un análisis comparativo de los resultados que se obtengan con la aplicación del modelo propuesto basado en la Teoría de la Información de Shannon, con los que se obtienen en la realidad, en las mediciones de las capacidades de canal en la transmisión de la información en la Red Telemática; lo cual permitirá identificar problemas en las comunicaciones y toma de decisiones para su mejora.

c. Acotación de la investigación

Este trabajo de tesis está debidamente delimitado para ser aplicado a un caso de estudio específico, como son los servicios de comunicación que se han implementado en la Red Telemática de la UNPRG, de los cuales se cuenta con la información suficiente para poder realizar los cálculos necesarios en la aplicación de la propuesta.

d. Viabilidad de la investigación

La investigación es viable operativamente, porque el modelo desarrollado es fácil de comprender y aplicar y no requiere de muchos conocimientos matemáticos, más que los conceptos básicos de logaritmos y probabilidades.

También es viable tecnológicamente, porque la tecnología requerida para la realización de las pruebas es la que se tiene en la Red Telemática de la UNPRG, a la cual se tiene autorización de acceso.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentación teórica científica

El sustento teórico de la presente investigación, se basa en los siguientes constructos teóricos:

2.1.1. Comunicación

El concepto de comunicación en el contexto de la Teoría de la Información es empleado en un sentido muy amplio en el que "quedan incluidos todos los procedimientos mediante los cuales una mente puede influir en otra". En un sentido más amplio, se consideran todas las formas que el hombre utiliza para transmitir sus ideas: la palabra hablada, escrita o transmitida (teléfono, radio, telégrafo, etc.), los gestos, la música, las imágenes, los movimientos, etc. (López, Parada, & Simonetti, 1995).

En su empeño de abordar teóricamente, Weaver propone la distinción de tres tipos o niveles de problemas comunicacionales: el problema técnico, el semántico y el pragmático (Pérez, 2015). En el nivel técnico se analizan aquellos problemas que surgen en torno a la fidelidad con que la información puede ser transmitida desde el emisor hasta el receptor. En el semántico se estudia todo aquello que se refiera al significado del mensaje y su interpretación. Por último, en el nivel pragmático se analizan los efectos conductuales de la comunicación, la influencia o efectividad del mensaje en tanto da lugar a una conducta. Es importante destacar que la Teoría de la Información se desarrolla como una respuesta a los problemas técnicos del proceso de comunicación, aun cuando sus principios puedan aplicarse en otros contextos (López, Parada, & Simonetti, 1995).

Estos problemas pueden ser enunciados de manera más precisa de la siguiente manera (Pérez, 2015):

- a. Nivel A: ¿Con qué grado de exactitud se pueden transmitir los símbolos empleados en la comunicación? (El problema técnico).
- b. Nivel B: ¿Con qué grado de precisión transmiten el significado deseado los símbolos empleados en la comunicación? (El problema semántico).

- c. Nivel C: ¿Con qué grado de eficacia afectan los significados recibidos a las conductas? (El problema pragmático o de la efectividad).

2.1.2. Información

El concepto de información es definido en términos estrictamente estadísticos, bajo el supuesto que puede ser tratado de manera semejante a como son tratadas las cantidades físicas como la masa y la energía. La palabra "información" no está relacionada con lo que decimos, sino más bien, con lo que podríamos decir. El concepto de información se relaciona con la libertad de elección que tenemos para seleccionar un mensaje determinado de un conjunto de posibles mensajes. Si nos encontramos en una situación en la que tenemos que elegir entre dos únicos mensajes posibles, se dice, de un modo arbitrario, que la información correspondiente a esta situación es la unidad. La Teoría de la Información, entonces, conceptualiza el término información como el grado de libertad de una fuente para elegir un mensaje de un conjunto de posibles mensajes (López, Parada, & Simonetti, 1995).

El concepto de información supone la existencia de duda o incertidumbre. La incertidumbre implica que existen diferentes alternativas que deberán ser elegidas, seleccionadas o discriminadas. Las alternativas se refieren a cualquier conjunto de signos construidos para comunicarse, sean estas letras, palabras, números, ondas, etc. En este contexto, las señales contienen información en virtud de su potencial para hacer elecciones. Estas señales operan sobre las alternativas que conforman la incertidumbre del receptor y proporcionan el poder para seleccionar o discriminar entre algunas de estas alternativas (López, Parada, & Simonetti, 1995).

Se asume que en los dos extremos del canal de comunicación -fuente y receptor- se maneja el mismo código o conjunto de signos. La función de la fuente de información será seleccionar sucesivamente aquellas señales que constituyen el mensaje y luego transmitir las al receptor mediante un determinado canal (Chen, 2016).

Existen diversos tipos de situaciones de elección. Las más sencillas son aquellas en que la fuente escoge entre un número de mensajes concretos. Por ejemplo, elegir una entre varias postales para enviarle a un amigo. Otras situaciones más complejas son aquellas en que la fuente realiza una serie de elecciones sucesivas de un conjunto de símbolos elementales tales como letras o palabras. En este caso, el mensaje estará constituido por la sucesión de símbolos elegidos. El ejemplo más típico aquí es el del lenguaje.

Al medir cuánta información proporciona la fuente al receptor al enviar un mensaje, se parte del supuesto que cada elección está asociada a cierta probabilidad, siendo algunos mensajes más probables que otros. Uno de los objetivos de esta teoría es determinar la cantidad de información que proporciona un mensaje, la cual puede ser calculada a partir de su probabilidad de ser enviada (Chen, 2016).

El tipo de elección más simple es el que existe entre dos posibilidades, en que cada una tiene una probabilidad de $1/2$ (0,5). Por ejemplo, al tirar una moneda al aire ambas posibilidades -cara y sello- tienen la misma probabilidad de salir. El caso del lenguaje e idioma es diferente. En éstos la elección de los símbolos que formaran el mensaje dependerá de las elecciones anteriores. Por ejemplo, si en el idioma español el último símbolo elegido es "un", la probabilidad que la siguiente palabra sea un verbo es bastante menor que la probabilidad que sea un sustantivo o un adjetivo. Asimismo, la probabilidad que a continuación de las siguientes tres palabras "el esquema siguiente" aparezca el verbo "representa" es bastante mayor que la probabilidad que aparezca "pera". Incluso se ha comprobado que, en el caso del lenguaje, es posible seleccionar aleatoriamente letras que luego son ordenadas según sus probabilidades de ocurrencia y éstas tienden a originar palabras dotadas de sentido.

2.1.3. Principios de la medición de la información

Primer principio

Un primer principio de la medición de información, establece que mientras más probable sea un mensaje menos información

proporcionará. Esto puede expresarse de la siguiente manera (López, Parada, & Simonetti, 1995):

$$I(x_i) > I(x_k) \text{ si y solo si } p(x_i) < p(x_k)$$

donde

$I(x_i)$: cantidad de información proporcionada por x_i

$p(x_i)$: probabilidad de x_i

De acuerdo a este principio, es la probabilidad que tiene un mensaje de ser enviado y no su contenido, lo que determina su valor informativo. El contenido sólo es importante en la medida que afecta la probabilidad. La cantidad de información que proporciona un mensaje varía de un contexto a otro, porque la probabilidad de enviar un mensaje varía de un contexto a otro.

Segundo principio

Un segundo principio que guarda relación con las elecciones sucesivas establece que si son seleccionados los mensajes X e Y, la cantidad de información proporcionada por ambos mensajes será igual a la cantidad de información proporcionada por X más la cantidad de información proporcionada por Y, dado que X ya ha sido seleccionada. Esto puede ser expresado así (López, Parada, & Simonetti, 1995):

$$I(x_i \text{ e } y_j) > f p(x_i) + f p\left(\frac{y_j}{x_i}\right)$$

Donde:

$I(x_i \text{ e } y_j)$: cantidad de información proporcionada por los mensajes x_i e y_j

f : función

$p(x_i)$: probabilidad de x_i

$p(y_j/x_i)$: probabilidad de y_j dado que x_i ha sido seleccionado.

2.1.4. Unidad de información

Una vez que hemos seleccionado el mensaje expresado en un lenguaje determinado es posible transcribirlo a un código de tipo binario. Este consta de sólo dos tipos de señales que indican Si o No, y que generalmente se codifican como 1 o 0. La cantidad de información proporcionada por cada elección entre dos alternativas posibles constituye la unidad básica de información, y se denomina dígito binario, o abreviadamente bit.

La elección existente al tener un bit de información puede ser esquematizada de la siguiente manera:

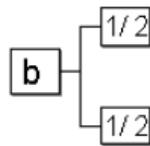


Gráfico N° 1. Representación de un bit de información
Fuente: (López, Parada, & Simonetti, 1995)

En la elección (b) tanto la línea superior como la inferior, es decir ambas posibilidades, pueden ser elegidas con la misma probabilidad de $r/2$.

Si existen N posibilidades, todas igualmente probables, la cantidad de información será igual a $\log_2 N$. Es, entonces, el $\log_2 N$ la función matemática que nos indicará la cantidad de bits de información de una situación determinada. Esto puede esquematizarse de la siguiente manera:

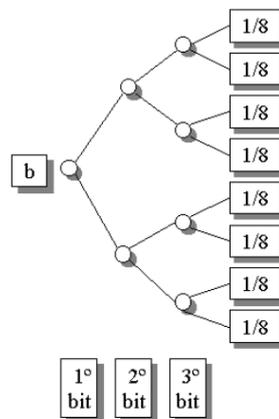


Gráfico N° 2. Representación de la cantidad de información que se puede obtener con 3 bits
Fuente: (López, Parada, & Simonetti, 1995)

La figura nos muestra una situación con 8 posibilidades, cada una con una misma probabilidad de $1/8$. Para poder determinar una posibilidad específica de estas 8, la elección requiere como mínimo 3 etapas, cada una de las cuales arroja un bit de información. El primer bit corresponde a la elección entre las primeras cuatro o segundas cuatro elegidas. El último bit determina el primer o segundo miembro del par y especifica la posibilidad elegida. Como vemos, el número de bits que se requieren en esta situación para determinar una posibilidad específica es de 3, lo que corresponde al $\log_2 8$.

Esto se puede ejemplificar en la siguiente tabla:

Tabla N° 1. Representación de las posibles elecciones de signos con tres bits

Signo	Elecciones		
	1°	2°	3°
A	1	1	1
B	1	1	0
C	1	0	1
D	1	0	0
E	0	1	1
F	0	1	0
G	0	0	1
H	0	0	0

Esta figura nos muestra un alfabeto compuesto por sólo 8 signos. Pensemos que una fuente de información selecciona un signo y de alguna manera se lo señala al receptor. La pregunta sería entonces, ¿cuánta Información deberá conocer el receptor para identificar correctamente el signo escogido?

Asumamos que a partir de elecciones anteriores sabemos que cada uno de los 8 signos tiene la misma probabilidad de ser seleccionado. La incertidumbre, entonces, se ha repartido uniformemente sobre nuestro "alfabeto", o lo que es lo mismo, las probabilidades a priori de los signos son iguales; en este caso $1/8$.

Las señales que llegan al receptor representan instrucciones para seleccionar alternativas. La primera instrucción responde a la pregunta ¿está en la primera mitad del alfabeto, si o no? (en la figura, si = 1 y no

= 0). La respuesta nos proporciona un bit de información y reduce el rango de incertidumbre exactamente a la mitad. Luego, una segunda instrucción divide cada mitad nuevamente en la mitad y, una tercera instrucción, otra vez en la mitad. En este caso, bastan tres simples instrucciones Si-No (1-0) para identificar un signo cualquiera de un total de ocho. La letra F, por ejemplo, podría ser identificada de la siguiente manera: 010. La respuesta a nuestra pregunta es entonces, ¡el receptor deberá obtener tres bits de información para identificar correctamente el signo escogido!

2.1.5. Redundancia

No obstante lo anterior, la mayoría de las fuentes de información producen mensajes que no consisten en una única elección entre posibilidades de igual probabilidad, sino en elecciones sucesivas entre posibilidades de probabilidad variable y dependiente. A este tipo de secuencias se les denomina **procesos estocásticos**. El caso más típico son las letras y palabras que conforman el lenguaje. El escribir en español constituye un proceso de elecciones dependientes. Por ejemplo, al formar una palabra se elige una primera letra de todas las posibles primeras letras con diferentes probabilidades; luego, se elige la segunda letra cuya probabilidad depende de la primera letra seleccionada, y así sucesivamente hasta formar la palabra deseada. Lo mismo ocurre en el caso de las palabras para formar oraciones.

Lo importante aquí es señalar el hecho de que, en la medida que se avanza en la formación de una palabra u oración, el rango de posibles letras o palabras a ser seleccionadas va disminuyendo y la probabilidad de que ciertas letras o palabras específicas sean seleccionadas va aumentando. Dicho de otra forma, tanto la incertidumbre como la información de las últimas letras de una palabra o de las últimas palabras de una oración es menor comparada con las primeras.

La mayoría de los mensajes se constituyen a partir de un número limitado de posibilidades, por ejemplo, sólo 29 letras en el caso de nuestro idioma. Como vimos, la probabilidad de ocurrencia de una de estas posibilidades dentro de un mensaje depende de las posibilidades seleccionadas previamente; por ejemplo, la probabilidad de que ocurra

la letra "q" luego de una "p" es O. Son estos dos hechos los que en conjunto determinan que todo mensaje contenga cierto grado de redundancia. En otras palabras, la redundancia se refiere a que las posibilidades dentro de un mensaje se repiten, y se repiten de una cierta manera predecible. Mientras mayor sea, entonces, la redundancia de un mensaje, menor será su incertidumbre y menor la información que contenga.

El inglés escrito es un tipo de fuente de información que ha sido ampliamente estudiado. Se ha llegado a determinar que la redundancia de la lengua inglesa está muy próxima al 50%. Es decir, al escribir inglés aproximadamente la mitad de las letras y palabras que se emplean dependen de la libre elección de quien escribe, mientras que la otra mitad está determinada por la estructura probabilística del idioma.

La redundancia de los idiomas permite que si se pierde una fracción de un mensaje sea posible completarlo en forma muy aproximada al original. Este hecho se puede observar al eliminar varias letras de una oración sin que ello impida al lector completar las omisiones y rehacer la oración. Por ejemplo, en la siguiente frase han sido omitidas las vocales: CMPLT ST FRS.

Otra función importante de la redundancia es que nos permite ahorrar tiempo en la decodificación de los mensajes. Generalmente, no leemos cada una de las letras y palabras que conforman un texto, sino que vamos adivinando lo que viene. En el caso del telégrafo, por ejemplo, podríamos ahorrar tiempo ideando un código poco redundante y transmitiendo el mensaje a través de un canal sin ruido. Sin embargo, cuando el canal utilizado tiene ruido es conveniente no emplear un proceso de codificación que elimine toda la redundancia, pues la redundancia nos ayuda a combatir el ruido. Si se pierde parte del mensaje por el ruido que afecta al canal, la redundancia nos permite rehacer en forma aproximada el mensaje.

Por el contrario, la fracción de un mensaje no redundante que se pierde por el ruido es imposible de ser recuperada. La redundancia de los

mensajes nos permite, entonces, corregir con facilidad los errores u omisiones que hayan podido ocurrir durante la transmisión.

2.1.6. Teoría matemática de la comunicación

2.1.6.1. El propósito de la Teoría matemática de la comunicación

El artículo de Claud Shannon "Una teoría matemática de la comunicación", publicado en julio y octubre de 1948, es la Carta Magna de la era de la información. El descubrimiento de Shannon de las leyes fundamentales de la compresión y transmisión de datos marca el nacimiento de la teoría de la información (Chen, 2016). Es sin duda uno de los avances científicos más importantes del siglo XX. El principal objetivo de esta teoría es el de proporcionar una definición rigurosa de la noción de información que permita cuantificarla. Fue desarrollada con el objetivo de encontrar límites fundamentales en las operaciones de procesamiento de señales tales como compresión de datos, almacenamiento y comunicación. Sus aplicaciones se extienden a campos diversos, entre ellos la física, la química, la biología, la inferencia estadística, la robótica, la criptografía, la computación, la lingüística, el reconocimiento de patrones y la teoría de la comunicación (Holik, 2018).

La teoría de Shannon se basó en teorías previas, como el mismo Shannon lo reconoce en su artículo original:

“El desarrollo de varios métodos de modulación, tales como PCM y PPM que intercambian ancho de banda para una tasa de señal a ruido ha intensificado el interés en una teoría general de la comunicación. Una base para esta teoría está contenida en los importantes artículos de Nyquist y Hartley en este tema. En el presente artículo extenderemos la teoría para incluir un número de nuevos factores, en particular el efecto del ruido en el canal, y los cambios posibles debido a la estructura estadística del mensaje original y debido a la naturaleza final de la destinación de la información.” (Shannon & Weaver, 1949)

Uno de los principales aportes de Shannon fue el especificar cuál es el problema informacional, y separar los aspectos formales de los aspectos semánticos asociados con el contenido del mensaje:

“El problema fundamental de la comunicación es el de reproducir en un punto exacto o aproximadamente, un mensaje seleccionado en otro punto. Frecuentemente los mensajes tienen significado; esto es, ellos refieren o están correlacionados de acuerdo a algún sistema con ciertas entidades físicas o conceptuales. Estos aspectos semánticos de la comunicación son irrelevantes para el problema de ingeniería. El aspecto significativo es que el mensaje de hecho es uno seleccionado a partir de un conjunto de posibles mensajes. El sistema debe ser diseñado para operar para cada posible selección, no sólo para aquella que será seleccionada de hecho, dado que es desconocida al momento del diseño.”
(Shannon & Weaver, 1949)

De este modo, Shannon define el problema en términos técnicos precisos, separando el problema de ingeniería concreto asociado al proceso de comunicación con los aspectos semánticos de la noción de información vinculada a su uso generalizado en el lenguaje cotidiano. Esto no significa que estos últimos desaparezcan o que no sean importantes; de hecho, los aspectos filosóficos de la Teoría de la Información han dado lugar a importantes debates en la literatura. Lo que señala Shannon es simplemente que los aspectos semánticos son irrelevantes para el problema planteado en la ingeniería del proceso comunicacional.

Su trabajo se centró en algunos de los siguientes problemas que surgen en los sistemas destinados a manipular información: cómo hablar, los mejores métodos para utilizar los diversos sistemas de comunicación; cómo establecer el mejor método para separar las señales del ruido y cómo determinar los límites posibles de un canal (Cherry, 1956).

2.1.6.2. El problema de la codificación

Shannon estableció resultados matemáticos acerca de los recursos que se necesitan para la codificación óptima y para la comunicación libre de errores. Estos resultados tuvieron aplicaciones en diversos campos ligados a la teoría de las comunicaciones, como en la radio, la televisión y la telefonía. Hoy en día se siguen aplicando en diversas disciplinas (Holik, 2018) como el Internet y las redes de computadoras.

De acuerdo a Shannon, un sistema de comunicación general consta de varias partes. Una **fuentes**, la cual genera un mensaje a ser recibido en el destinatario. Un **transmisor**, que transforma el mensaje generado en la fuente en una señal a ser transmitida. En los casos en los que la información es codificada, el proceso de codificación también es implementado por el transmisor. Un **canal** es cualquier medio que sirva para que la señal se transmita desde el transmisor al receptor. Este puede ser, por ejemplo, un cable, una fibra óptica o una señal inalámbrica. Un **receptor**, que reconstruye el mensaje a partir de la señal, y finalmente, un destinatario, que es quien recibe el mensaje. En el siguiente dibujo se representan estos elementos en forma esquemática:

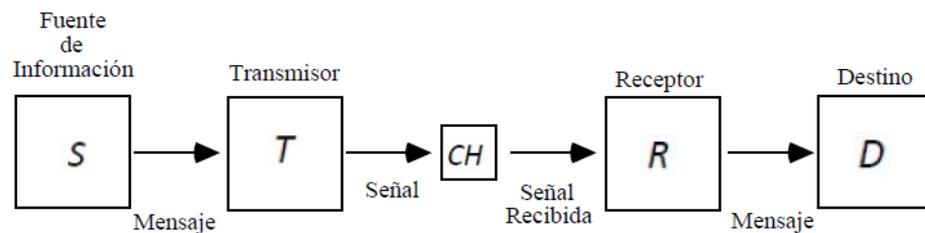


Gráfico N° 3. Elementos de un sistema de comunicación general
Fuente: (Pérez, 2015)

La fuente **S** es un sistema que contiene un conjunto de estados diferentes S_1, \dots, S_n , llamados usualmente letras. Un aspecto central de la teoría de Shannon es que es posible asignar probabilidades de ocurrencia para los distintos estados de la fuente. Es decir, los estados

S_1, \dots, S_n son producidos con probabilidades $p(S_1), \dots, p(S_n)$. La cantidad de información generada por la fuente debido a la ocurrencia del estado S_i se define como:

$$I(S_i) = \log\left(\frac{1}{p(S_i)}\right) = -\log p(S_i)$$

(Fórmula N° 1)

Dado que S produce sucesiones de estados (estas sucesiones son usualmente llamadas mensajes), la entropía de la fuente S se define como la cantidad promedio de información producida por la fuente:

$$H(S) = \sum_{i=1}^n p(S_i) \log\left(\frac{1}{p(S_i)}\right) = -\sum_{i=1}^n p(S_i) \log p(S_i)$$

(Fórmula N° 2)

En forma análoga, el destinatario D es un sistema con un rango de estados posibles D_1, \dots, D_m , a los cuales se le asignan probabilidades $p(D_1), \dots, p(D_m)$. La cantidad de información $I(D_j)$ recibida en el destinatario debido a la ocurrencia de d_j se define como:

$$I(D_j) = \log\left(\frac{1}{p(D_j)}\right) = -\log p(D_j)$$

(Fórmula N° 3)

Y la entropía del destinatario se define como la cantidad promedio de información recibida:

$$H(D) = \sum_{j=1}^m p(D_j) \log\left(\frac{1}{p(D_j)}\right) = -\sum_{j=1}^m p(D_j) \log p(D_j)$$

(Fórmula N° 4)

Este sistema de comunicación es lo suficientemente amplio como para incluir los diferentes contextos en que se da la comunicación (conversación, T.V., danza, etc.). Tomemos como ejemplo lo que ocurre en el caso de la radio. La fuente de información corresponde a la

persona que habla por el micrófono. El mensaje son las palabras y sonidos que esta persona emite. El micrófono y el resto del equipo electrónico constituyen el transmisor que transforma este mensaje en ondas electromagnéticas, las cuales corresponden a la señal. El espacio que existe entre las antenas transmisoras y receptoras es el canal, mientras que lo que altera la señal original constituye la fuente de ruido. El aparato de radio de cada hogar es el receptor y el sonido que éste emite corresponde al mensaje recobrado. Las personas que escuchan este mensaje radial son los destinatarios (López, Parada, & Simonetti, 1995).

También podemos ejemplificar esto mediante la lectura de un artículo que lee. En este caso, nuestros cerebros son la fuente de información y nuestros pensamientos, el mensaje. La máquina de escribir constituye el transmisor que transforma nuestros pensamientos en lenguaje escrito, el cual corresponde a la señal. El papel es el canal y cualquier error de tipeo o puntuación, manchas, espacios en blanco, etc., constituyen la fuente de ruido. Por último, usted que está leyendo este ejemplo es a la vez el receptor y destinatario, que a través de la lectura recobra el mensaje por nosotros enviado (López, Parada, & Simonetti, 1995).

Es importante considerar que el problema del significado del mensaje no es relevante en este contexto. El interés principal de la Teoría de la Información lo constituye todo aquello relacionado con la capacidad y fidelidad para transmitir información de los diferentes sistemas de comunicación. En el ejemplo anterior, el mensaje podría haber consistido en una secuencia de letras carentes de todo significado e igualmente el problema de cuánta información es transmitida estaría presente. En un sentido amplio, la Teoría de la Información trata acerca de la cantidad de información que es transmitida por la fuente al receptor al enviar un determinado mensaje, sin considerar el significado o propósito de dicho mensaje. No interesa tanto la pregunta: "¿Qué tipo de información?" sino más bien, "¿Cuánta información?" es la que transmite la fuente.

2.1.6.3. Medidas de información

En su artículo original, Shannon discute la conveniencia del uso de una función logarítmica en la definición de entropías, dado que muchos parámetros importantes en ingeniería varían linealmente con el logaritmo del número de posibilidades. Señala que es al mismo tiempo una medida intuitiva, porque es usual medir magnitudes comparando linealmente con unidades de medida. Además de estas ventajas, es matemáticamente adecuada dado que resulta ser que muchas operaciones llevadas a cabo con el logaritmo se vuelven mucho más simples que en términos de otras formas funcionales (Holik, 2018).

La elección de una base logarítmica se corresponderá con la elección de una unidad de medida de la información. Si la base usada es 2, la unidad resultante se llamará 'bit'. Este término proviene de la contracción del término en inglés 'binary digit'. Con estas definiciones, un bit terminará siendo la cantidad de información que se obtiene cuando una de dos alternativas igualmente probables es especificada. En otras palabras, una fuente S con dos estados que puede adoptar los valores 1 y 2 con la misma probabilidad, tendrá una cantidad de información de un bit.

Otras bases dan lugar a diferentes unidades de la información. Por ejemplo, si se usan logaritmos naturales, la unidad de medida en este caso será el nat (que es la contracción del término en inglés natural unit). Cuando se usa la base 10 de los logaritmos, la unidad se llama Hartley. La posibilidad de usar diferentes unidades para cuantificar la información muestra la diferencia entre la cantidad de información asociada a un evento y el número de símbolos binarios necesarios para codificarlo. Es importante mencionar que el "bit" es una unidad de medida, y el hecho de que distintas unidades de medida puedan ser usadas, no afecta a la naturaleza de la información.

De las definiciones es bastante claro que $H(S)$ y $H(D)$ son cantidades de información promedio. Sin embargo, en la literatura son llamadas usualmente **entropías**. Efectivamente, la forma funcional que poseen estas medidas de la información, es completamente análoga a las

formas funcionales que la entropía adquiere en distintas teorías físicas. Esta terminología refleja una problemática profunda en los fundamentos de la teoría de la información. Esto es así a tal punto que el carácter intrigante de esta magnitud y sus propiedades se manifestó al comienzo de la formulación de la teoría. En efecto, de acuerdo a las palabras mismas de Shannon refiriéndose a cómo llamar a su nueva medida:

“Mi preocupación más grande era cómo llamarla. Pensé en llamarla ‘información’, pero esa palabra estaba muy usada, de forma tal que decidí llamarla ‘incerteza’. Cuando discutí el asunto con John von Neumann, él tuvo una idea mejor. Von Neumann me dijo: ‘Deberías llamarla entropía, por dos motivos. En primer lugar tu función de incerteza ha sido usada en la mecánica estadística bajo ese nombre, y por ello, ya tiene un nombre. En segundo lugar, y lo que es más importante, nadie sabe lo que es la entropía realmente, por ello, en un debate, siempre llevarás ventaja.’”

La relación entre las entropías de la fuente $H(S)$ y del destinatario $H(D)$ se puede representar intuitivamente por el siguiente diagrama:

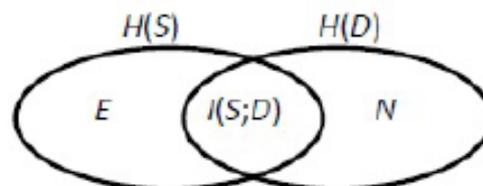


Gráfico N° 4. Relación entre las entropías de la fuente $H(S)$ y del destinatario $H(D)$
Fuente: (Pérez, 2015)

Donde $I(S;D)$ es la información mutua: la cantidad promedio de información generada en la fuente S y recibida en el destinatario D . E es la equivocación: la cantidad promedio de información generada en S pero no recibida en D . N es el ruido: la cantidad promedio de información recibida en D pero no generada en S . Como el diagrama sugiere desde un punto de vista intuitivo, la información mutua se define como:

$$I(S; D) = H(S) - E = I(X; Y) = H(D) - N$$

(Fórmula N° 5)

La equivocación E y el ruido N son medidas de la independencia entre la fuente y el destinatario, dado que si S y D son completamente independientes, los valores de E y N son máximos ($E = H(S)$ y $N = H(D)$), y el valor de $I(S;D)$ es mínimo ($I(S;D)=0$). Por otro lado, si la dependencia entre S y D es máxima, los valores de E y N son mínimos ($E = N = 0$), y el valor de $I(S;D)$ es máximo ($I(S;D)=H(S)=H(D)$).

Los valores de E y N son funciones no solo de la fuente y del destinatario, sino también del canal de comunicación CH. La introducción del canal de comunicación lleva directamente a la posibilidad de que se produzcan errores en el proceso de transmisión. El canal CH se puede definir como una matriz $[p(d_j|s_i)]$, donde $p(d_j|s_i)$ es la probabilidad condicional de ocurrencia de d_j en el destinatario dado que s_i ocurrió en la fuente S. Los elementos de cada columna de $[p(d_j|s_i)]$ suman uno. De este modo, E y N se pueden expresar como:

$$N = \sum_{i=1}^n p(S_i) \sum_{j=1}^m p(D_j|S_i) \log \left(\frac{1}{p(D_j|S_i)} \right)$$

$$N = \sum_{j=1}^m p(D_j) \sum_{i=1}^n p(S_i|D_j) \log \left(\frac{1}{p(S_i|D_j)} \right)$$

Donde:
$$p(S_i|D_j) = \frac{p(D_j|S_i) p(S_i)}{p(D_j)} \quad (\text{Fórmula N° 6})$$

La capacidad del canal se define como:

$$C = \max_{p(S_i)} I(S; D)$$

(Fórmula N° 7)

Donde el máximo se toma sobre todas las posibles distribuciones $p(S_i)$ en la fuente. La magnitud C se interpreta como la cantidad de información promedio más grande que puede ser transmitida por el canal de comunicación CH.

2.1.6.4. Teoremas de Shannon

Shannon planteó dos teoremas. El primer teorema, o **teorema de codificación sin ruido**, plantea que el valor de la entropía $H(S)$ de la fuente es igual al número de símbolos necesarios en promedio para codificar una letra de la fuente usando un código ideal: $H(S)$ mide la compresión óptima de los mensajes de la fuente. La prueba del teorema se basa en el hecho de que los mensajes de longitud N que produce S pueden ser clasificados en dos tipos. Una de estas clases tiene aproximadamente $2^{NH(S)}$ mensajes típicos. La otra clase, contiene los mensajes atípicos. Cuando $N \rightarrow \infty$, la probabilidad de un mensaje atípico se vuelve despreciable. Por ello, se puede concebir a la fuente como produciendo sólo $2^{NH(S)}$ mensajes posibles. Esto sugiere una estrategia natural para codificar: cada mensaje típico es codificado en una secuencia binaria de longitud $NH(S)$, que es en general más corta que la longitud N del mensaje original. Se pensaba entonces, que el incremento de la tasa de transmisión de información sobre un canal de comunicación siempre aumentaría la probabilidad de error.

En resumen, Desde esta perspectiva, el significado de la entropía $H(S)$ queda definido por el primer teorema de Shannon: *“preguntar cuánta información produce una fuente es preguntar hasta qué grado es compresible la salida de la fuente?”* ... También: *“La información de Shannon $H(X)$ [...] mide en qué medida se pueden comprimir los mensajes de la fuente.”* (Timpson, 2008)

El segundo teorema, conocido como **teorema de codificación en un canal con ruido**, sorprendió a la comunidad de la teoría de la comunicación probando que esa hipótesis no era cierta si se mantenía la tasa de comunicación por debajo de la capacidad del canal. La capacidad del canal es igual a la tasa máxima con la cual la información puede ser enviada por el canal y recuperada en el destinatario con una probabilidad de error despreciable.

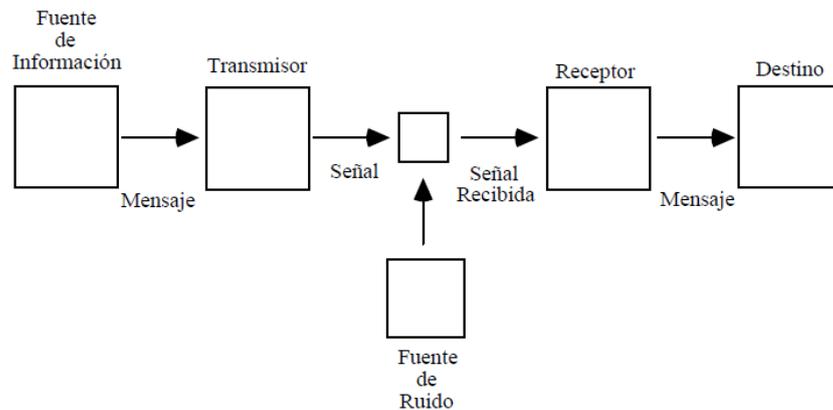


Gráfico N° 5. Esquema de codificación en un canal con ruido
Fuente: (Pérez, 2015)

La fuente consiste en un sistema S de n estados S_i , que se pueden pensar como letras de un alfabeto $AS = \{s_1, \dots, s_n\}$, cada una con su propia probabilidad $p(s_i)$. Las secuencias de letras son llamadas mensajes. La entropía de la fuente $H(S)$ se puede calcular exclusivamente en términos de estos elementos, y se mide en bits cuando el logaritmo tiene base 2. A su vez, el transmisor codifica el mensaje de la fuente y esto equivale a hacer una conversión entre el alfabeto de la fuente $AS = \{s_1, \dots, s_n\}$, y el código del alfabeto del transmisor T , que viene dado por $AC = \{c_1, \dots, c_q\}$. Los elementos C_i son llamados símbolos. La secuencia de símbolos producidos por el transmisor y que entran al canal se llama señal. El alfabeto de n símbolos AS puede variar mucho dependiendo de los distintos dispositivos empleados.

En resumen, el Segundo teorema de Shannon es usado para explicar la información mutua $H(S;D)$: *“La interpretación más importante de la información mutua deriva del teorema de codificación ruidoso.”* (Timpson, 2008). Es importante remarcar que, si bien la estrategia de definir la información de Shannon usando los teoremas de codificación lleva ciertamente a una perspectiva interesante, algunos autores la han criticado.

Por otro lado, en muchos ejemplos de interés, conviene elegir un AC binario, es decir, con $q = 2$. En este caso, los símbolos son directamente dígitos binarios. Pero en el caso más general, el alfabeto del código se puede implementar físicamente por medio de sistemas que tengan una

cantidad q de estados disponibles. Para el caso particular en que $q = 2$, los sistemas de dos niveles se pueden llamar cbits.

En el contexto de la teoría de la información de Shannon, codificar implica establecer un mapa entre las letras S_i del alfabeto de la fuente AS el conjunto de cadenas de longitud finita de símbolos del alfabeto del código AC . Estas suelen llamarse palabras-código. En general, las palabras-código no tienen la misma longitud. Cada palabra-código w_i que corresponde a la letra S_i , va a tener una longitud l_i . Pero las longitudes l_i de las distintas palabras-código pueden variar. Es entonces útil definir una longitud de palabra-código promedio como:

$$L = \sum_{i=1}^n p(S_i) l_i$$

(Fórmula N° 8)

L es entonces una medida de cuán compacto es el código. En otras palabras, un código con un valor de L más pequeño será más eficiente, dado que en promedio, economiza más recursos informacionales para codificar los mensajes. El Teorema del Canal Sin ruido afirma que existe un proceso de codificación óptimo tal que la longitud de palabra-código promedio L está tan cerca como se quiera del límite inferior L_{\min} para L :

$$L_{\min} = \frac{H(S)}{\log q}$$

(Fórmula N° 9)

En la fórmula de arriba, si $H(S)$ se mide en bits, \log es el logaritmo en base 2. Es importante enfatizar la diferencia entre el proceso de generación de la información en la fuente y la codificación de la información en el transmisor. La información generada en la fuente se mide con $H(S)$, y sólo depende de las características de la fuente. Puede ser expresada en bits o en cualquier otra medida de la información. Además, la información así generada puede ser codificada mediante un alfabeto código de un número arbitrario de símbolos y la longitud promedio de las palabras código depende esencialmente de ese número.

2.1.7. Capacidad del canal de comunicación

2.1.7.1. Canal de comunicación

Al igual que todos los tipos de comunicación, mantener un diálogo con otro sistema necesita un medio físico para transmitir los datos. En el caso de la Arquitectura de Redes, a ese medio se le denomina canal.



Gráfico N° 6. Sistema de comunicación, según Shannon
Fuente: (Heras, 2013)

La X representa el espacio entre las señales que puede ser transmitida y la Y el espacio de señales recibidas, durante un bloque de tiempo sobre el canal (Heras, 2013).

$$pY|X(y|x)$$

Con esta fórmula obtenemos la distribución condicional de la función de Y sobre X. Tratando el canal como un sistema estático conocido, $pY|X(y|x)$, esto es una propiedad inherente del canal de comunicación (que representa la naturaleza del ruido en él). Entonces la distribución conjunta $pY|X(y|x)$ de X e Y esta completamente determinada por el canal y por la elección de la distribución marginal de las señales que nosotros elegimos enviar sobre el canal:

$$pX(x) = \int_y pX,Y(x,y)dy$$

La distribución conjunta puede ser recuperada usando la identidad:

$$pY,X(y,x) = pY|X(y|x) pX(x)$$

Sobre estas limitaciones, se debe después maximizar la cantidad de información, o de mensaje, que uno puede comunicar sobre el canal. La medida apropiada para esto es la información mutua $I(X;Y)$, y esta

máxima información mutua es el llamado canal de capacidad y viene dado por:

$$C = \sup_{p_X} I(X; Y)$$

(Fórmula N° 10)

2.1.7.2. Elementos que intervienen en la definición de la capacidad de un canal de transmisión

Ahora que ya hemos precisado el concepto -de información y los conceptos relacionados con él (incertidumbre, bit, redundancia) podemos volver a plantearnos el problema inicial de definir la capacidad de un canal determinado para transmitir información. Dado un canal con una capacidad de C unidades por segundo que recibe señales de una fuente de información de H unidades por segundo, la pregunta es ¿cuánto es el máximo número de bits por segundo que puede ser transmitido a través de este canal? Por ejemplo, un teletipo consta de 32 símbolos posibles que supondremos son empleados con igual frecuencia. Cada símbolo representa entonces 5 bits ($\log_2 32$) de información. De esta forma, si en ausencia total de ruido podemos enviar N símbolos por segundo a través de este canal, entonces podremos enviar 5N bits de información por segundo a través de dicho canal.

Son estas dos cantidades, la tasa de transmisión H por la fuente de información y la capacidad C del canal, las que determinan la efectividad del sistema para transmitir información. Si $H > C$ será ciertamente imposible transmitir toda la información de la fuente, no habrá suficiente espacio disponible. Si $H \leq C$ será posible transmitir la información con eficiencia. La información, entonces, puede ser transmitida por el canal solamente si H no es mayor que C.

El teorema fundamental para un canal sin ruido que transmite símbolos discretos afirma que si se emplea un procedimiento adecuado de codificación para el transmisor es posible conseguir que el ritmo medio de transmisión de símbolos por el canal sea muy próximo a C/H. Por muy perfecto que sea el procedimiento de codificación, dicho ritmo nunca podrá ser mayor de C/H.

Sin embargo, el problema de calcular la capacidad del canal se complica por la presencia de ruido. La presencia de ruido durante la transmisión provocará que el mensaje recibido contenga ciertos errores que contribuirán a aumentar la incertidumbre. Recordemos que la información es una medida del grado de libertad de elección que poseemos al momento de seleccionar un mensaje. Cuanto mayor sea la libertad de elección, mayor será la falta de seguridad en el hecho de que el mensaje enviado sea uno determinado. La incertidumbre será mayor y mayor la cantidad de información posible. De esta forma, si el ruido aumenta la incertidumbre, aumentará la información. Esto parecería indicar que el ruido es beneficioso, puesto que cuando hay ruido, la señal recibida es seleccionada a partir de un mayor conjunto de señales que las deseadas por el emisor. Sin embargo, la incertidumbre originada por la libertad de elección del emisor es una incertidumbre deseable; la incertidumbre debida a errores por la influencia del ruido es una incertidumbre no deseable.

Para extraer la información útil de la señal recibida es necesario suprimir la ambigüedad introducida por el ruido. Para ello se recurre a un factor de corrección matemático que no entraremos a analizar. El teorema para la capacidad de un canal con ruido se define como el ritmo máximo a que la información útil (incertidumbre total menos la incertidumbre debida al ruido) puede ser transmitida a través del canal.

2.1.7.3. Definición de capacidad de un canal de transmisión

Se llama capacidad de un canal a la velocidad, expresada en bps (bits por segundo), a la que se pueden transmitir los datos en un canal o ruta de comunicación.

La capacidad del canal depende de la naturaleza del soporte. Es decir, los portadores de canales de gran ancho de banda, como la fibra óptica, siempre tienen una capacidad límite.

Las limitaciones en el ancho de banda surgen de las propiedades físicas de los medios de transmisión o por limitaciones que se imponen deliberadamente en el transmisor para prevenir interferencia con otras

fuentes que comparten el mismo medio. Cuanto mayor es el ancho de banda mayor el costo del canal.

Para un ancho de banda dado se puede alcanzar la mayor velocidad de transmisión posible pero hay que evitar que se supere la tasa de errores aconsejable. Para conseguirlo, el mayor inconveniente es el ruido.

En conclusión, la capacidad de un canal depende del ancho de banda (que depende del transmisor y de la naturaleza del medio de transmisión), de la relación S/N (Relación señal/ruido) y la tasa de errores permitida.

2.1.7.4. Unidad de medida de la capacidad del canal de transmisión

Para medir la velocidad máxima que puede soportar un medio de transmisión determinado con respecto al tipo de señal utilizada, se emplean dos medidas: el baudio y los dígitos binarios por segundo (bps).

La medida en bps indica el número de bits que se transmiten en un segundo. Por su parte, el baudio mide la cantidad de veces por segundo que la señal cambia su valor.

Una línea de b baudios no necesariamente transmite b bps, pues cada señal podría transmitir varios dígitos. Si se usan, por ejemplo, los voltajes 0,1,2,3,4,5,6,7, el valor de cada señal podrá servir para transportar tres dígitos, de modo que la velocidad en bps sería tres veces superior a la velocidad en baudios.

2.1.7.5. Capacidad del canal de transmisión ideal

En 1924, Nyquist planteó la existencia de un límite en la capacidad de un canal ideal (exento de ruido y distorsiones) de ancho de banda finito. Por lo tanto, la limitación de la velocidad de transmisión permitida en el canal, es la impuesta exclusivamente por el ancho de banda del canal.

El teorema de Nyquist establece que la velocidad máxima de transmisión en bits por segundo para un canal (sin ruido) con ancho de banda B (Hz) es:

$$C = 2Bn = 2B \log_2 M \text{ (bps)}$$

(Fórmula N° 11)

Dónde:

- C es la capacidad del canal según el teorema de Nyquist (tasa de bits de información bit/s)
- n es el número de bits por cada elemento de la señal
- B es el ancho de banda expresado en hertzios (Hz)
- M es el conjunto de elementos diferentes que puede adoptar la señal (número de niveles posibles de la señal).

En el caso de que $M=2$, entonces $\log_2(2)=1$, por lo tanto:

$$C=2B$$

(Fórmula N° 12)

Por tanto, Nyquist establece que aumentado los niveles de tensión diferenciables en la señal, es posible incrementar la cantidad de información transmitida.

Ejemplo con una señal binaria:

Si suponemos que un canal de voz con un ancho de banda de 3100 Hz se utiliza con un modem para transmitir datos digitales (2 niveles), la capacidad C del canal es:

$$2B= 6200 \text{ bps.}$$

Por tanto, no se podrá transmitir señales binarias a una velocidad mayor que 6200 bps.

Esta expresión fija una cota superior con la que comparar el comportamiento de los sistemas que se diseñan ya que, cuando se habla de velocidad de transmisión de un canal real (con ruidos), nunca se alcanzan estas velocidades.

Ejemplo con varios niveles de señal

Para calcular la capacidad del canal si la velocidad de transmisión es igual a 1200 bps con 5 niveles de señal, entonces tenemos que:

$$C=2B \log_2 M$$

$$C=2(1200) \log_2(5)$$

$$C= 2(1200) \ln 5/\ln 2$$

$$C= 5572.62 \text{ bps}$$

El teorema establece la máxima cantidad de datos digitales que pueden ser transmitidos sin error sobre dicho enlace de comunicaciones con un ancho de banda específico y que está sometido a la presencia de la interferencia del ruido.

2.1.7.6. Capacidad de un canal de transmisión con ruido

Como se mencionó anteriormente, Shannon estudió el caso general de un sistema de comunicación, compuesto por un emisor, un receptor, un canal de transmisión y una fuente de ruido, como se muestra en la gráfica siguiente:

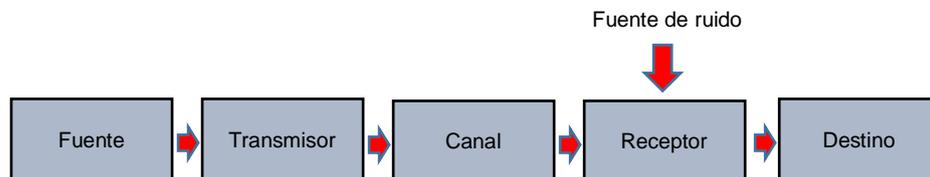


Gráfico N° 7. Sistema de comunicación, según Shannon
Fuente: (Pérez, 2015)

Donde:

- **Fuente:** Componente de naturaleza humana o mecánica que determina el tipo de mensaje que se transmitirá y su grado de complejidad.
- **Transmisor:** Recurso técnico que transforma el mensaje originado por la fuente de información en señales apropiadas.
- **Canal:** Medio generalmente físico que transporta las señales en el espacio (cumple funciones de mediación y transporte)
- **Receptor:** Recurso técnico que transforma las señales recibidas.
- **Destino:** Componente terminal del proceso de comunicación al cual está dirigido el mensaje

Por otro lado, tenemos que según el teorema de Nyquist, para aumentar la capacidad de un canal se deben incrementar los niveles de tensión. Por lo que el receptor debe de ser capaz de diferenciar estos niveles de tensión en la señal recibida, cosa que es dificultada por el ruido. Además, cuanto mayor es la velocidad de transmisión, mayor es el daño que puede ocasionar el ruido.

En 1948, Shannon conjuntamente con Ralph Hartley extendieron el trabajo de Nyquist al caso de un canal real sujeto a la aparición de una cierta cantidad de ruido aleatorio. El teorema de Shannon-Hartley es una aplicación del teorema de codificación para canales con ruido. Un caso muy frecuente es el de un canal de comunicación analógico continuo en el tiempo que presenta un ruido gaussiano, que se encuentra asociado con la radiación electromagnética. Ya que no podemos tener comunicación eléctrica sin electrones, es imposible evitar el ruido.

El teorema establece la capacidad del canal, una cota superior que establece la máxima cantidad de datos digitales que pueden ser transmitidos sin error (esto es, información) sobre dicho enlace de comunicaciones con un ancho de banda específico y que está sometido a la presencia de la interferencia del ruido.

Para la correcta aplicación del teorema, se asume una limitación en la potencia de la señal y, además, que el proceso del ruido gaussiano es caracterizado por una potencia conocida o una densidad espectral de potencia.

Dado un nivel de ruido, cuanto mayor es la velocidad de transmisión mayor es la tasa de errores.

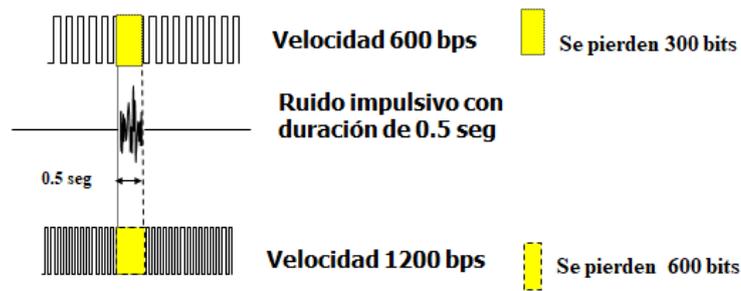


Gráfico N° 8. Nivel de ruido en relación a la velocidad de transmisión
Fuente: (Pérez, 2015)

La siguiente expresión, conocida como fórmula de Shannon, proporciona la capacidad máxima en bps de un canal con ruido:

$$C = B \log_2(1+S/R) \text{ (bps)}$$

(Fórmula N° 13)

donde:

- C es la capacidad del canal según el teorema de Shannon (tasa de bits de información bit/s)
- B es el ancho de banda expresado en hertzios (Hz)
- S es la potencia de la señal útil, que puede estar expresada en vatios (W), milivatios (mW), etc.
- N es la potencia del ruido presente en el canal, (mW, μ W, etc.) que trata de enmascarar a la señal útil.
- S/N es la relación de señal a ruido, S y N dados en watts

En esta fórmula se utiliza la medida de la relación señal-ruido lineal (no en dB). De esta expresión se deduce que la capacidad de los canales con poco ruido será mayor que la de aquéllos con mucho ruido.

Ejemplo

Supóngase que el espectro de un canal está situado entre 3Mhz y 4 Mhz y que la SNR_{dB} es de 24 dB.

$$B = 4Mhz - 3Mhz = 1Mhz$$

$$SNR_{dB} = 24 \text{ dB} = 10 \log_{10}(SNR)$$

$$24 = 10 \log_{10}(SNR)$$

$$\left(\frac{24}{10}\right) = \log_{10}(SNR)$$

$$10^{2.4} = SNR$$

$$SNR = 251$$

Usando la fórmula de Shannon se tiene que:

$$C = B \log_2(1+S/R) \text{ (bps)}$$

$$C = 10^6 \log (1+251)$$

$$C = 10^6 \times 8$$

$$C = 8 \text{ Mbps}$$

Según Nyquist, este límite teórico es difícil de alcanzar. Para alcanzar este límite se necesitarían los siguientes niveles de señal:

$$C = 2 B \log_2 M$$

$$8 \times 10^6 = 2 \times 10^6 \times \log_2 M$$

$$4 = \log_2 M$$

$$M = 16 \text{ niveles}$$

Para un nivel de ruido dado, podría parecer que la velocidad de transmisión se puede aumentar incrementando tanto la energía de la señal como el ancho de banda.

Sin embargo, al aumentar la energía de la señal, también lo hacen las no linealidades del sistema dando lugar a un aumento en el ruido de intermodulación.

Ya que el ruido se ha supuesto blanco, cuanto mayor sea el ancho de banda, más ruido se introducirá al sistema. Por lo tanto, cuando aumenta B, disminuye SNR.

2.1.7.7. Eficiencia de un canal de comunicación

La eficiencia E de un canal de comunicación, es la relación entre su capacidad y su ancho de banda e indica el número de bits por segundo de información que se puede transmitir por cada herzio de su ancho de banda:

$$E = C/B \text{ (bps/Hz)}$$

(Fórmula N° 14)

La eficiencia de un canal está establecida por el número máximo de estados distintos que puede adoptar la señal que se transmite por él para codificar la información. La capacidad de un canal de ancho de banda determinado podría elevarse a infinito utilizando señales con un número infinito de niveles. Pero esto solo se puede obtener con un canal ideal, sin ruidos ni distorsión alguna, los cuales no existen en el mundo real. Por tanto, el número de estados posibles está limitado por la sensibilidad y la capacidad de resolución del propio receptor para diferenciar entre niveles contiguos de la señal que recibe junto con el ruido.

III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Hipótesis

Ho: existen diferencias en el cálculo del nivel de eficiencia real de los canales de transmisión de la red telemática de la UNPRG para la comunicación de la información con el modelo teórico de Shannon

Ha: No existen diferencias en el cálculo del nivel de eficiencia real de los canales de transmisión de la red telemática de la UNPRG para la comunicación de la información con el modelo teórico de Shannon

3.2. Tipo de investigación

Este trabajo de tesis se ha tipificado de la siguiente manera:

- **Descriptiva comparativa**, porque se pretende recolectar dos muestras de datos de cada una de las variables de la investigación (velocidad de transmisión, uso de ancho de banda, nivel de ruido, tasa de errores); una obtenida con un software de análisis de una red de datos y la segunda obtenida con cálculos con el modelo teórico de referencia (Teoría de Shannon), con el propósito de observar el comportamiento de la variables y compararlas.
- **Aplicada**, porque se pretende llevar a un caso empírico real la aplicación del modelo teórico de Shannon, específicamente en el cálculo de la capacidad de los canales de transmisión de la red telemática de la UNPRG y comprobar la validez del modelo.

3.3. Operacionalización de variables

Como la investigación es descriptiva solo se evaluó la variable dependiente de la investigación: nivel de eficiencia de la infraestructura de la red telemática de la UNPRG para la comunicación de la información.

La tabla siguiente muestra las dimensiones y los indicadores que se evaluarán en la presente investigación.

Tabla N° 2 : Operacionalización de las variables de la investigación

VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR	ESCALA
DEPENDIENTE nivel de eficiencia de la infraestructura de la red telemática de la UNPRG para la comunicación de la información	Eficiencia en la transmisión	Velocidad de transmisión Bits por segundo (bps)	Discreta de razón
		Cantidad de bytes usados en la transmisión de un mensaje	Discreta de razón
	Ruido	Relación señal/ruido	Discreta de razón

3.4. Diseño de la prueba de hipótesis

Este estudio lo podemos diagramar de la manera siguiente:

M1 O1 O2 O3

M2 O4 O5 O6

En el modelo:

- M1 y M2 son las muestras de trabajo. M1 son las muestras obtenidas con un software de análisis de una red de datos y M2 son las muestras obtenidas con los cálculos obtenidos aplicando el modelo de Shannon
- O1 y O4 son las observaciones o mediciones realizadas de la velocidad de transmisión
- O2 y O5 son las observaciones o mediciones realizadas sobre el uso del ancho de banda
- O3 y O6 son las observaciones o mediciones realizadas sobre la relación señal/ruido

En esta investigación, para describir las diferencias entre el nivel de eficiencia de la infraestructura de la red telemática estimado con un software de análisis de red de datos y el nivel de eficiencia calculado con la aplicación del modelo de Shannon, se seleccionó dos muestra de: velocidad de transmisión, uso del ancho de banda, relación señal/ruido y tasa de errores, con la finalidad de compararlas.

3.5. Población y muestra del estudio

Unidad de análisis

Para identificar los criterios de inclusión y exclusión de la población y precisar el tamaño de la población se tuvo en cuenta que el problema abordado y los objetivos de la investigación están orientados a evaluar indicadores, cuyo datos se obtienen a partir de un proceso técnico.

Por tanto, la unidad de análisis son los datos obtenidos de la ejecución de un software especializado en análisis de una red de datos y del cálculo de las fórmulas de la Teoría de Shannon.

Para ambos casos, la toma de datos se realizó tomando en cuenta las características técnicas de la infraestructura existente para los siguientes casos de transmisión:

- a. transmisión de datos a través del canal de telefonía fija digital (telefonía IP)
- b. transmisión de datos a través del canal de fibra óptica del backbone
- c. transmisión de datos a través del canal de enlaces inalámbricos

Población

La población está constituida por el conjunto de datos de pruebas intencionalmente preparados para evaluar cada caso de transmisión, indicado en la descripción de la unidad de análisis.

Muestreo

El método de muestreo utilizado fue no probabilístico discrecional (o muestreo por juicio), debido a que los datos de prueba fueron seleccionados a juicio de la investigadora.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el análisis descriptivo de la investigación se aplicó:

a. Análisis documental

La finalidad de la aplicación de esta técnica fue para recolectar la información relacionada con la descripción de las especificaciones y características técnicas de los equipos y de los canales de transmisión evaluados.

b. Observación de campo

Esta técnica se aplicó para recopilar los datos de la ejecución del software especializado de análisis de la red de datos.

c. Trabajo en escritorio

Esta técnica se aplicó para recopilar los datos obtenidos de los cálculos utilizando las fórmulas de la Teoría de Shannon.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de la infraestructura de la red de telecomunicaciones en la UNPRG

4.1.1. Análisis de la infraestructura del servicio de telefonía

Infraestructura

La infraestructura del servicio de telefonía en la UNPRG es de una arquitectura de servicio centralizada y redundante con 2 administradores de llamadas en el Data Center de la Universidad (cada callmanager configurada en cluster activo/pasivo). Las centrales de telefonía IP están basadas en software libre GNU/Linux como sistema operativo y Asterisk Open Surce como callmanager y se implementaron sobre servidores multiprocesador de gama alta basados en el procesador Intel Xeon Quad Core con una memoria RAM de 6 Gb, de forma que se garantice la calidad de servicio en momentos de máxima afluencia de llamadas.

Para la provisión externa del servicio se cuenta con planes uniformes de tarifa plana:

- a. Un (01) enlace primario ISDN (contratación de 1 primario - 30 canales) que se conecta al cluster,
- b. Cuatro (04) líneas analógicas en el servidor activo para la redundancia del servicio y,
- c. Doce (12) líneas de red privada móvil sobre 02 dispositivos Gateway VoIP integrando las comunicaciones de la infraestructura de telefonía IP con la telefonía móvil.

Estos 3 grupos de conexiones se configurarán de forma que se pueda establecer un plan de contingencia que contemple el reencaminado total del tráfico en el caso de desconexión de cualquiera de los miembros del cluster.

Numeración

Se tiene un plan de numeración con las consideraciones que sigue la UIT en la norma E.164 utilizando numeración corta para cada anexo (4 dígitos) con utilización del servicio a la PSTN, basado en cuotas de

conexión flexibles de llamadas a nivel de usuario en oficinas según se requieren.

En el caso de los terminales, se tiene principalmente teléfonos IP con soporte SIP en las dependencias de la Universidad y se aprovecha de una estructura de VPN de la red de la Universidad para realizar conexiones de clientes Softphone con soporte SIP desde Internet.

Seguridad

Con el fin de garantizar la seguridad y calidad de servicio se han instalado switches administrables 802.3af (soporte PoE – Power Over Ethernet) en las dependencias de gestión crítica y se utilizaron las capacidades de seguridad en todas las capas TCP/IP que ofrece la infraestructura de Red Telemática de la Universidad.

Diseño de la red

Para el diseño de la red VoIP se ha considerado el Modelo Jerárquico en 3 capas desde el punto de vista funcional. Asimismo, para garantizar la seguridad de la red, base fundamental para la confiabilidad de las comunicaciones de voz sobre la red de datos, se consideró de manera prioritaria un nivel de control en todas las capas.

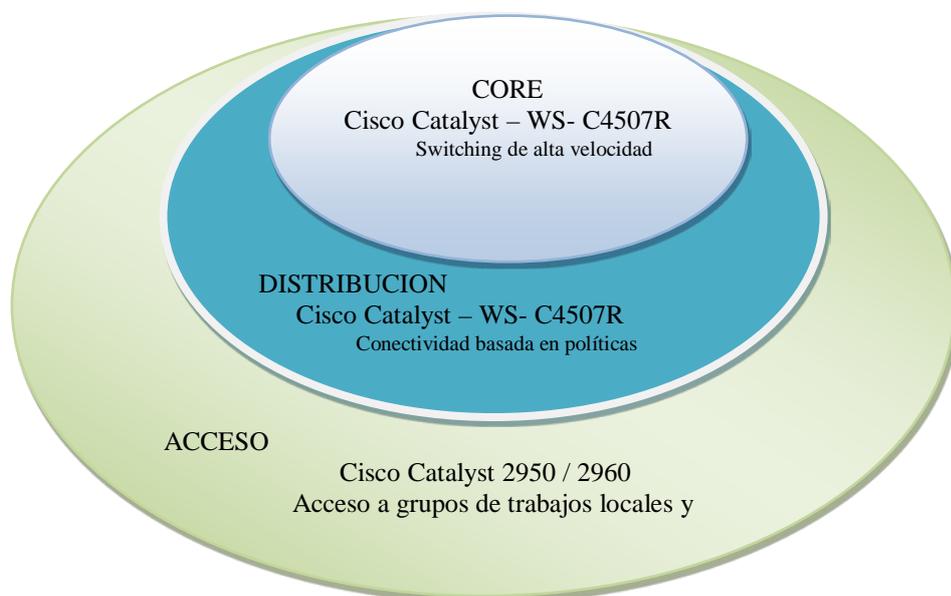


Gráfico N° 9. Modelo jerárquico de nivel funcional en 3 capas para la red VoIP
Fuente: Red telemática

Se utiliza el soporte de políticas de control, calidad de servicio y el soporte del estándar 802.3af o Power over Ethernet (PoE)¹ en la capa de acceso para garantizar la disponibilidad del servicio en la capa de acceso.

Con la finalidad de extender el servicio de comunicaciones de voz al personal administrativo de Alta Dirección, Decanos y Jefes de dependencias, hay conexiones de terminales SIP por la red VPN² conectados a las líneas de internet con la menor carga de tráfico IP.

Distribución de los teléfonos IP

En total se existen 210 puntos distribuidos por dependencia y en función a los requerimientos de terminales de voz IP. Para su conexión se utiliza la infraestructura de cableado existente, conectados a través de switches con soporte del estándar 802.3af (PoE).

La distribución es tal como se muestra en la siguiente tabla N° 3.

Características de los equipos terminales teléfonos IP

El modelo de teléfono IP que se utiliza en la UNPRG es Cisco Catalyst 2960S-24PD-L PoE, que satisface los requerimientos de terminales de voz en cada dependencia y prevé el crecimiento futuro de nuevos terminales y de ampliación de las capacidades de gestión de tráfico. Sus características técnicas principales son:

- Administrable con Interfaces Ethernet 10/100/1000 Mbps.
- 802.2af PoE+ con densidad de puertos y potencia mínima para 24 terminales de voz 370W.
- Soporte VLAN³ de Voz, QoS y clasificación por listas de control de acceso.

¹ Power over Ethernet (PoE), es una tecnología de alimentación eléctrica a una infraestructura LAN estándar. Permite que la alimentación eléctrica se suministre a un dispositivo de red usando el mismo cable que se utiliza para la conexión de red.

² Virtual Private Network (VPN), es una tecnología de red de computadoras que permite una extensión segura de la red de área local sobre una red pública o no controlada como Internet

³ Una VLAN, es el acrónimo de virtual LAN. Es un método para crear redes lógicas independientes dentro de una misma red física. Varias VLAN pueden coexistir en un único conmutador físico o en una única red física.

- 2 enlaces uplinks 10 Gbps para conexión redundante en capa de distribución.
- Soporte de stacking, seguridad 802.1x, IGMP y DHCP snooping, IPv6.

Tabla N° 3 : Distribución de Canales de Voz IP por Nodos

Áreas u oficinas	Nodo	N° Teléf. IP	Modelo y Tipo Switch
Rectorado y Vicerrectorados	Total A	22	2960S-24PD-L PoE
Escuela de Postgrado	Total B	15	WS-C2950G-48-EI
Biblioteca Central	Total C	4	WS-C2950G-24-EI
FIME (Ing. Mecánica)	Total D	5	WS-C2950G-48-EI
FICSA (Ing. Civil, Sistemas y Arquitectura)	Total E	19	WS-C2950G-48-EI
FIQIA (Ing. Química e Industrias Alimentarias)	Total F	5	WS-C2950G-24-EI
FACFYM – Administrativo (Física y Matemática)	Total G	5	WS-C2950G-24-EI
FCCBB (Biología)	Total H	4	WS-C2950G-24-EI
FIA (Ing. Agrícola)	Total I	4	WS-C2950G-24-EI
FAG (Ing. Agrónoma)	Total J	4	WS-C2950G-24-EI
FIZ (Ing. Zootecnia)	Total K	4	WS-C2950G-24-EI
FACFYM – Académico (Física y Matemáticas)	Total L	6	WS-C2950G-48-EI
FDCP (Derecho)	Total LL	7	WS-C2950G-24-EI
FE (Enfermería)	Total M	7	WS-C2950G-24-EI
FACEAC (Ciencias Econ., Admin. y Contables)	Total N	13	WS-C2950G-48-EI
FMV (Veterinaria – Laboratorios)	Total O	3	WS-C2950G-24-EI
Oficina Gen. de SI, Planificación y Obras	Total P	12	2960S-24PD-L PoE
FACHSE (Ciencias Históricas Soc. y Educación)	Total Q	11	WS-C2950G-48-EI
FMH (Medicina Humana - Laboratorios)	Total R	2	WS-C2950G-24-EI
FMV (Veterinaria – Administrativo)	Total S	13	WS-C2950G-24-EI
Red Telemática, Personal y Remuneraciones	Total T	10	2960S-24PD-L PoE
Contabilidad y Tesorería General	Total U	8	2960S-24PD-L PoE
DGA, Admisión, Control Interno	Total V	15	2960S-24PD-L PoE
Centro Preuniversitario	Total X	10	2960S-24PD-L PoE
Oficina Central de Transportes	Total Y	2	WS-C2950G-24-EI
	T. Gral.	210	

En la capa de acceso, los equipos de voz se conectan directamente a los conmutadores principales en cada nodo. En caso de las oficinas que ejecutan aplicaciones de datos a través de un equipo de cómputo, éste último accederá a la red a través del dispositivo de voz que cuenta con al menos 2 interfaces FastEthernet.

La red de voz está separada de la red de datos a través de VLANs debidamente configuradas. La utilización de VLANs permite controlar el

tráfico de voz en dominios de broadcast⁴ diferentes a los dominios de broadcast de datos de tal manera que se garantice la independencia de ambas redes en el flujo de tráfico generado, menor saturación, así como disminuir el riesgo y amenazas que pudieran afectar a las comunicaciones de voz. Se utilizan también las capacidades de Calidad de Servicio (QoS) de los equipos de comunicaciones de la infraestructura de red, de forma que se priorice el tráfico de la VLAN de voz sobre cualquier otro tráfico.

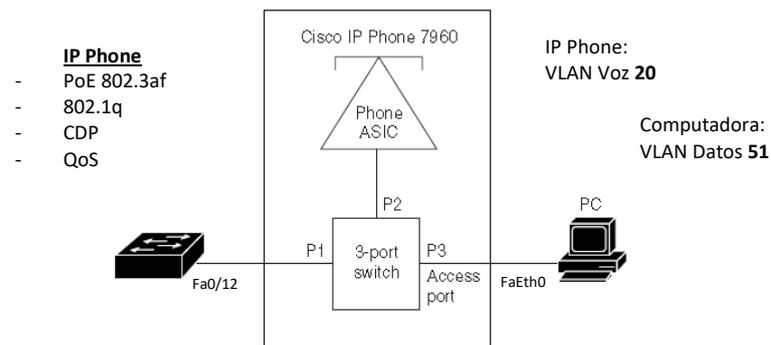


Gráfico N° 10. Conectividad del Teléfono IP al Switch Cisco Catalyst
Fuente: Red telemática

Se han definido 27 VLANs de voz (a parte de las 128 VLANs de datos) para una mejor distribución y mayor nivel de administración y seguridad, orientada a segmentos clasificados por perfil funcional. Esto permite mejor performance y separación de los tipos de tráfico IP.

⁴ Broadcast (o difusión ancha) es una forma de transmisión de información donde un nodo emisor envía información a una multitud de nodos receptores de manera simultánea, sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo

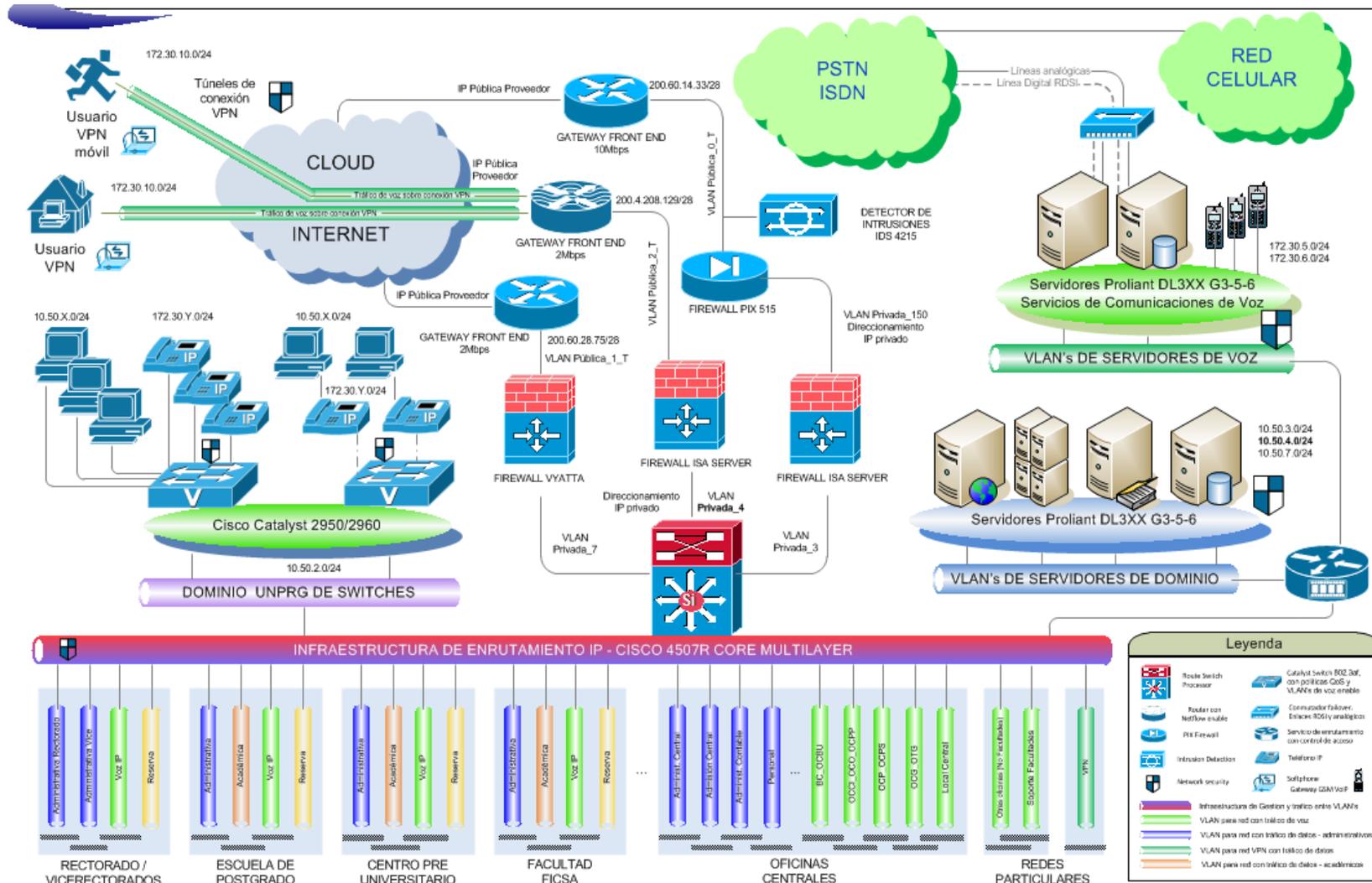


Gráfico N° 11. Arquitectura de red IP con Telefonía IP en la UNPRG
Fuente: Red telemática

Gestión VoIP

Para la gestión VoIP se cuenta con una solución Asterisk como administrador de llamadas del sistema de telefonía IP. Asterisk es un proyecto Open Source patrocinado por la empresa Digium Inc. propiedad de Mark Spencer, perteneciente al movimiento y los principios del software libre bajo licencia GPL (Licencia Pública General de GNU).

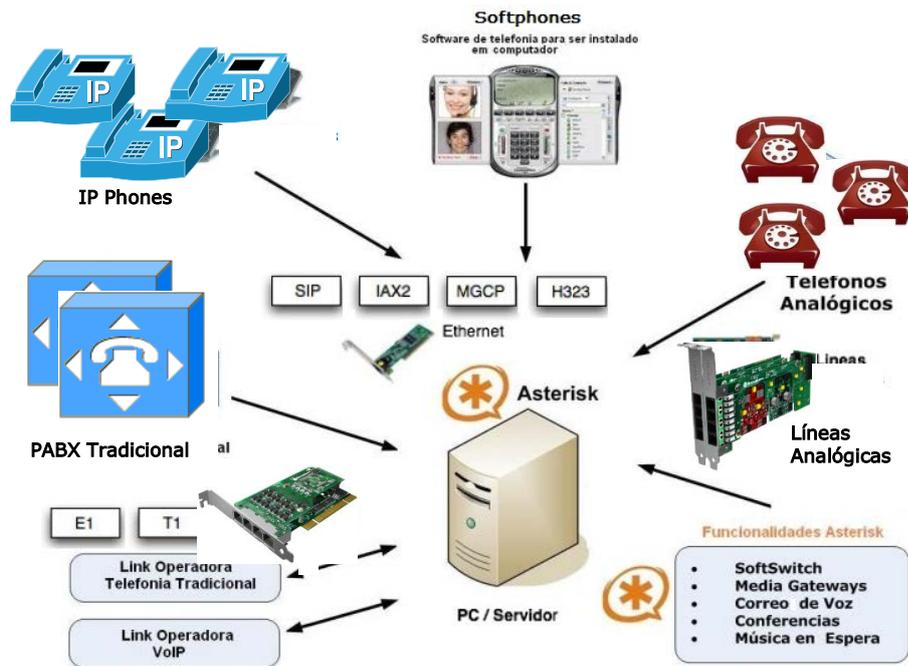


Gráfico N° 12. Asterisk como plataforma de gestión de llamadas de la red VoIP
Fuente: Red telemática

4.1.2. Análisis de la Infraestructura de la red de comunicación de datos

La infraestructura de telecomunicaciones se soporta sobre los siguientes componentes:

- a. Sistema de cableado estructurado con backbone de fibra óptica bajo el estándar 802.3ae con un soporte de tasa de transferencia máxima de 10Gbps y subsistema de cableado horizontal con medio de transmisión que soporta 1 Gbps en la capa de acceso, cumpliendo los estándares internacionales para sistemas de cableado para sistemas de cableado estructurado, lo que garantiza el uso de múltiples aplicaciones sobre la misma infraestructura de telecomunicaciones.

- b. Sistema Activo de comunicaciones, con tecnología de conmutación de datos distribuida en un sistema jerárquico en 2 capas preparada para actualizarse a 3 capas. Implementan una red escalable y con capacidades de redundancia, disponibilidad y administración. No utiliza el 100% de la capacidad de tráfico que puede soportar la red del Campus Universitario, incluso la capacidad de tráfico que pueden soportar los enlaces inalámbricos con 3 dependencias importantes externas al Campus Universitario, son de banda ancha.
- c. Sistema Activo de comunicaciones con equipos de enrutamiento de alta confiabilidad, redundancia, disponibilidad y administración.
- d. Sistema de seguridad con hardware y software de protección en la frontera de la red pública y privada así como la disponibilidad de herramientas de seguridad en todos los niveles del modelo de red TCP/IP de la red privada de la Universidad.
- e. Data Center con capacidad de soportar hardware de servidores adicional para el procesamiento y almacenamiento de nuevas aplicaciones.
- f. El sistema de cableado estructurado cumple con las normas ANSI/TIA/EIA-568 para cableado de telecomunicaciones, ANSI/TIA/EIA-569 rutas, espacios y canalizaciones para telecomunicaciones, ANSI/J-STD-607 aterramientos para los sistemas de telecomunicaciones.

4.1.2.1. Backbone de Fibra Optica

El backbone de la red de la Universidad esta implementado bajo el estándar 802.3ae con Fibra Óptica multimodo y monomodo que conforman el cableado vertebral de campus interedificios.

El cableado vertebral de campus interedificios, se extiende desde el marco de conexión principal (MC) o distribuidor de campus (CD) (Nodo T – Sala de equipos) hacia los marcos de conexión horizontal (HC) o distribuidores de piso (FD) desde donde se extiende el subsistema de cableado

horizontal con cable par trenzado UTP categoría 6, en cada dependencia principal de la Universidad.

El cableado de fibra óptica integra todas las facultades y dependencias principales de la Universidad dentro del Campus Universitario.

El medio de transmisión de fibra óptica tiene especificación propietaria del fabricante Siemon XGLO, el cual es un cable de fibra óptica Ethernet 10 Gigabit Ethernet mejorado sobre la especificación IEEE 802.3 ae para fibra óptica multimodo 50/125 μm y para fibra óptica monomodo (estándar especificado en la Subcapa de Control de Acceso al Medio – MAC, IEEE 802.3, por medio de Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones - CSMA/CD).

El cable instalado considera cables de 6 hilos de fibra de tipo monomodo (número de parte: 9F5LB1-6B) y cables de 6 fibras de tipo multimodo (número de parte 9F8LB1-6B). Asimismo el backbone está conformado por cables de fibra óptica con especificaciones 9F5LB1-24B (multimodo) y 9F8LB1-6B (monomodo) con 24 hilos de fibra óptica.

Todas las instalaciones de fibra óptica en las diferentes dependencias de la Universidad cuentan con los test satisfactorios de certificación que garantizan el tráfico esperado definido por su especificación (tal como muestran los informes de certificación de Sistema de cableado estructurado: Test de conectorización y empalme de la fibra óptica instalada en la Red Telemática).

Las dependencias de la Universidad hacia donde se ha extendido fibra óptica desde el Data Center, cuentan con 3 pares de fibra instalados en sus respectivos cuartos de telecomunicaciones, de los cuales sólo 1 par está en uso, los otros 2 pares son de libre disponibilidad para las aplicaciones que se requiera.

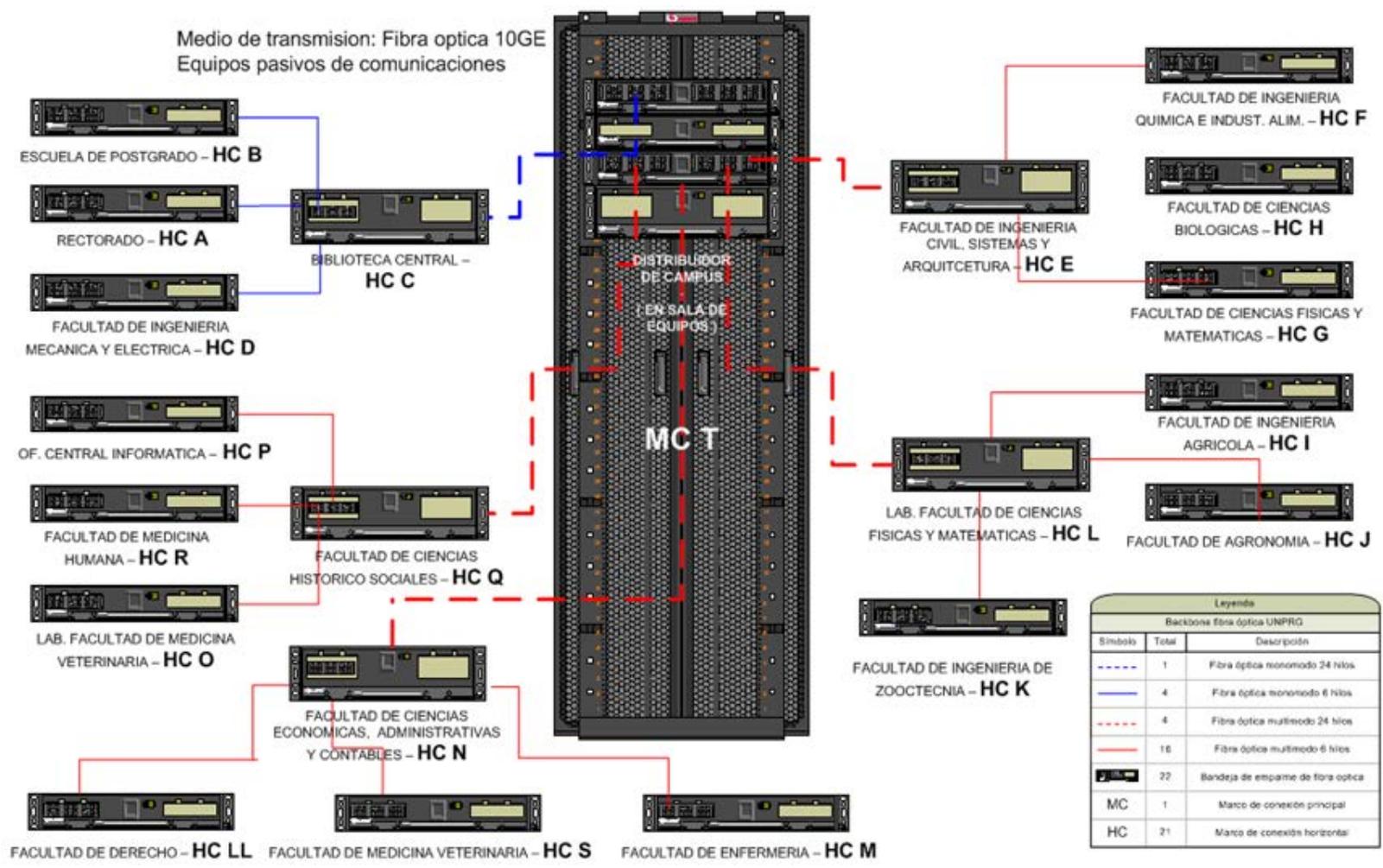


Gráfico N° 13. Estructura del medio de transmisión en fibra óptica de la Red Telemática - UNPRG
Fuente: Red telemática

4.1.2.2. Subsistema de cableado horizontal

El cableado horizontal de la Red Telemática, integra las dependencias de la Universidad y se extiende desde los gabinetes de telecomunicaciones, desde el marco de conexión horizontal hasta las salidas de telecomunicaciones en cada área de trabajo.

Este sistema está implementado con medio de transmisión cable UTP categoría 6 del fabricante Siemon Company en su especificación propietaria System 6, el cual asegura un ancho de banda de hasta 250 MHz permitiendo el soporte para tasas de transferencia mayores a 1 Gbps. El medio de transmisión y las canalizaciones que protegen el medio en el subsistema de cableado horizontal hasta el área de trabajo, están adecuadamente instaladas de acuerdo a las normas ANSI/TIA/EIA-568 y ANSI/TIA/EIA-569

En el área de trabajo, la Universidad cuenta con un total de 1062 salidas de telecomunicaciones instalados con test satisfactorios de certificación, dentro de los cuales están considerados las oficinas que requieren del servicio de voz (de acuerdo a los informes de certificación de Sistema de cableado estructurado: Test de Certificación de Salidas de Telecomunicaciones) lo que garantizaría la instalación de aplicaciones de voz, video o datos.

Los test de certificación permiten garantizar el cumplimiento de las normas en las instalaciones del cableado de LAN a las propuestas de Categoría 6 de TIA e ISO. Estos test se hicieron con el equipo de certificación Agilente WireScope 350, el cual es una herramienta de certificación de cable de alta performance. Estas salidas de telecomunicación (1062 puntos de red) están instaladas en las oficinas principales de todas las dependencias de la Universidad, quedando por integrar a la red de comunicaciones a otras oficinas administrativas y laboratorios de cómputo cuya integración a la red de voz aún no es prescindible.



Gráfico N° 14. Marco de conexión horizontal de uno de los gabinetes de telecomunicaciones - UNPRG
Fuente: Red telemática

4.1.2.3. Infraestructura de equipos activos de comunicaciones

Los equipos activos de comunicaciones IP de la Red Telemática de la Universidad se distribuyen en un diseño de red modular Collapsed Core en 2 capas (Core y Acceso) con conexión e integración de los diferentes tipos de hosts (servidores, computadoras, impresoras) en la capa de acceso tratando de asegurar la performance y escalabilidad sin afectar el rendimiento de las diferentes redes conformadas.

Los equipos de seguridad permiten proteger la red privada de la red pública a través de software y hardware de supervisión, detección y filtrado de paquetes. La red jerárquica tiene potencial para soportar la implementación de seguridad en todas las capas del modelo de red TCP/IP. El direccionamiento IP se distribuye por VLAN's y se asigna los diferentes recursos de la red a VLAN's específicas para una mejor administración.

La redundancia de los principales servicios y componentes hardware como el switch core (redundancia en componentes del mismo equipo), servidores de administración del dominio y el internet permiten mantener una disponibilidad del 99.900% en el año, de todos los servicios de red. Sin embargo las redes de telefonía IP necesitan, adicionalmente, tener garantizada la disponibilidad del suministro eléctrico también en el área de trabajo, dado que un dispositivo hardware de voz requiere de por lo menos 15 watts de energía. La Universidad no cuenta con un generador de energía que garantice alta disponibilidad del suministro eléctrico.

Todos los equipos de acceso y core (de conmutación, enrutamiento y seguridad) están preparados para soportar el tráfico de diferentes tipos de aplicaciones IP y tienen características que soportan la administración específica del tráfico de voz.

4.1.2.4. Capa Core: Switch Cisco Catalyst 4507R

El Switch Cisco Catalyst 4507 R de la UNPRG es un equipo de comunicación modular multicapa que concentra la conmutación central en el backbone de fibra óptica. En el modelo Jerárquico de 3 capas, este Switch estaría cumpliendo la función de CORE por ser el núcleo de la red. Sin embargo, la funcionalidad actual del dispositivo en la red UNPRG, muestran su desempeño en las 2 capas jerárquicas: Core y Acceso lo que la hace parte de una red modular Collapsed Core en 2 capas con capacidad de aprovechar las funcionalidades de esta capa en una red de voz y datos.

Este switch central soporta todas las conexiones de fibra óptica que vienen desde el marco de conexión principal del sistema de cableado estructurado administrando todo el tráfico de red de las diferentes dependencias de la Universidad. Cuenta con 2 fuentes de alimentación eléctrica, dos tarjetas supervisors (1 activa y 1 en standby) y disponibilidad de 1 tarjeta de 06 interfaces de fibra óptica lo cual le permiten operar con la redundancia que requiere ante problemas de hardware manteniendo la disponibilidad de los servicios de redes que soporta. Ante una falla mayor, en la tarjeta principal del switch, la redundancia de éste es prácticamente nula siendo un aspecto crítico a considerar dado su carácter nuclear en la red. Sin embargo el registro de falla y de errores de hardware del switch es nulo.

Soporta la base de datos principal de VLAN's administradas en la red corporativa permitiendo hasta un máximo de 4096 VLAN's, Listas de control de acceso de las redes definidas en las VLAN's, soporta la clasificación y priorización usando modular QoS CLI (MQC) así como permite configurar 64,000 registros de políticas de calidad de servicio QoS necesarios para la gestión eficiente de una red VoIP. En consecuencia, este switch está preparado para aplicaciones de misión crítica y soporte de redes convergentes de voz, video y datos.

4.1.2.5. Capa de Acceso: Switches Cisco Catalyst

Actualmente, en la capa de acceso, la Universidad cuenta con switches administrables. Este dispositivo principal de borde, se conecta al Switch core 4507R a través de fibra óptica y conecta otros dispositivos ya sea en configuración física de stacking o cascada.

Todos los switches de acceso principales que conectan a los hosts que utilizan el sistema de cableado estructurado son administrables. Los equipos conectados en cascada son switches administrables o switches no administrables según la dependencia. Los switches no administrables instalados en los switches principales de acceso, podrían afectar el rendimiento no sólo de la red sino también de nuevas aplicaciones como VoIP por lo que se ha verificado que el tráfico generado por estos switches no administrables sea controlable a través de los switches de acceso principales.

Por lo que en este estudio se describe principalmente los equipos de telecomunicaciones ubicados en la capa de acceso y que se conectan directamente al core a través de tecnología Ethernet con una tasa máxima de transferencia de datos de 1Gbps.

4.1.3. Enlaces inalámbricos a dependencias administrativas

La Red Telemática de la Universidad también integra oficinas externas al Campus Universitario: Oficina General de Admisión, Oficina General de Contabilidad-Tesorería y el Centro Preuniversitario.

La integración a estas dependencias se realiza mediante enlaces inalámbricos punto a punto con equipos radio Motorola PTP58600 Conectorizado (radio y antena integrada) y no conectorizado (radio y antena externa Radio Waves).

Estos enlaces wireless trabajan en la frecuencia de 5.7-5.8 Ghz, una banda de operación totalmente diferente y saturada en el área, a la 2.4 Ghz en la que operaba el estándar 802.11b/g. La capacidad de tráfico que soportan (en teoría) es de 150Mbps de throughput agregados en cada

conexión punto a punto, soporta un nivel de seguridad en el cifrado con AES de 128 y 256 bits y permiten priorizar tráfico.

Alternativamente se cuenta también con dispositivos Bridge marca Cisco modelo 350 los que operan bajo el estándar IEEE 802.11b y configurados en modo redundante para cada enlace. El estándar 802.11b soporta un máximo de 11Mbps en tráfico de datos de acuerdo a las especificaciones técnicas del estándar. Los bridges Cisco 350, soportan la creación de hasta un máximo de 16 VLAN's bajo el estándar 802.1q permitiendo gestionar el tráfico VTP de VLAN's desde la base de datos central hacia los switches de acceso Cisco Catalyst 2950 y 2960 en cada dependencia externa.

La seguridad del tráfico de voz en el enlace wireless (equipo radio en modo bridge) está protegida a través de listas de control de acceso, WEP de 128 bits y longitud de encriptación de clave con 128 bits. Los bridges backup permiten la priorización del tráfico de voz, implementación de QoS y permiten configurar políticas específicas para el tráfico de voz.

4.1.4. Dispositivos de enrutamiento e Internet de Banda Ancha

El acceso al servicio de Internet se implementa a través de 3 enlaces. 2 Routers Cisco modelo 2821 y 1 router Cisco modelo 2801 conforman los dispositivos front end hacia la red de internet con enlaces de 10, 2 y 2 Mbps respectivamente.

Un primer router principal Cisco 2821 es conectado a un dispositivo OptiX Metro1000 de la marca Huawei con tecnología de transporte óptico SDH el cual permite el enlace dedicado de banda ancha de 10 Mbps a internet con overbooking de 1:1 nacional e internacional a través de fibra optica. Sin embargo este equipo también permite multiplexar varias señales correspondientes a otros servicios sobre un mismo medio de transmisión (en este caso el enlace fibra optica) identificando entre ellos a los enlaces E1/T1. Este es el enlace principal utilizado para los principales servicios web de la Universidad publicados hacia internet incluyendo la publicación de los resultados de exámenes de admisión.

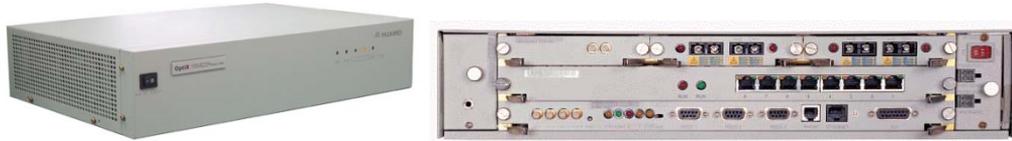


Gráfico N° 15. OptiX 155/622H (Metro1000) - Huawei
Fuente: Red telemática

El router Cisco 2821 presenta las siguientes características físicas y lógicas totalmente compatibles con VoIP incluyen el software Cisco CallManager Express para la administración de llamadas VoIP, lo cual justifica aún más su soporte para una eficiente administración del tráfico de voz por parte del router.

- HSRP, ACLs, multiple T1/E1/xDSL connections.
- Digital Voice Support: Up to 192 calls, Voice and Video Enabled VPN (V3PN) for quality-of-service (QoS), Cisco CallManager Express (CME) embedded in Cisco IOS Software that provides call processing for Cisco IP phones, including wired and cordless WLAN phones, converged IP telephony solution for up to 96 IP phones, allows network managers to provide scalable analog and digital telephony
- Ability to connect up to 12 T1/E1s trunks, 52 foreign-exchange-station (FXS) ports, or 36 foreign-exchange-office (FXO) ports. supports more than 90 modules, including WICs, VICs, network modules, PVDMS, and AIMS, Four integrated HWIC (High-Performance WIC) slots, Enhanced Network-Module (NME) Slots (The NME slots support existing network modules), HWICs slots can also support WICs, VICs, and VWICs, Extension-Voice-Module (EVM) Slot (The EVM supports additional voice services and density without consuming the network-module slot)
- Multiprotocol Label Switching (MPLS) VPN Support, Packet Voice DSP Module (PVDM) Slots integrated on the Motherboard, IP Phone Support: Optional support for Cisco in-line power distribution to Ethernet switch network modules and HWICs can be used to power Cisco IP phones; EVM Module Slots: provide support for the Cisco High-Density Analog and Digital Extension Module for Voice and Fax, providing support for up to 24 total voice and fax sessions without consuming a Network Module Slot.; PVDM (DSP) Slots on

Motherboard: DSP (PVDM2) modules deliver support for analog and digital voice

- Conferencing, transcoding, and secure Real-Time Transport Protocol (RTP) applications; Support for up to a 250 mailboxes using the Cisco Unity® Express voice messaging system is possible with the integration of an optional voice-mail AIM or network module
- Amplia gama de interfaces de voz: Interfaces for public switched telephone network (PSTN), private branch exchange (PBX), and key system connections include FXS; FXO; analog direct inward dialing (DID); ear and mouth (E&M); Centralized Automated Message Accounting (CAMA); ISDN Basic Rate Interface (BRI); and T1, E1, and J1 with ISDN Primary Rate Interface (PRI); QSIG; E1 R2; and several additional channel-associated-signaling (CAS) signaling schemes; Survivable Remote Site Telephony (SRST)

El segundo enlace dedicado a internet se conecta através de un router Cisco 2821 con conexión de fibra óptica a la red del proveedor con una tasa de transferencia máxima de 2 Mbps con overbooking de 1:1. Las características del router que conecta a este enlace son las que se describieron anteriormente. No evaluamos este enlace debido a su uso restrictivo para aplicaciones específicas y a la transferencia de datos que requieren dedicación de ancho de banda.

El tercer enlace dedicado a internet se conecta a través de un router Cisco 2801 con conexión dedicada a la red del proveedor con una tasa de transferencia máxima de 2 Mbps con overbooking de 1:2. Este enlace soporta un servicio de VPN el cual permite conexiones seguras en túneles con la red privada de la Universidad. Presenta las siguientes características compatibles con aplicaciones de voz incluyendo un software (Cisco CallManager Express) para la administración de llamadas VoIP.

- Cisco Unified Communications Manager
- 02 puertos HWIC, 02 puertos Fast Ethernet, 01 puerto WIC, 01 puerto VWIC y VIC (sólo voz), 02 ranuras PVDM en placa para voz
- 02 módulos avanzados de integración
- Soporte para Firewall de Cisco IOS, IPS, NAC y VPN SSL

- VPN IPSec, hasta 1500 túneles, calidad de servicio (QoS) avanzada
- 802.1Q y 802.1X, SRST, correo de voz y PoE



Gráfico N° 16. Router Cisco 2821 y 2801 - UNPRG
Fuente: Red telemática

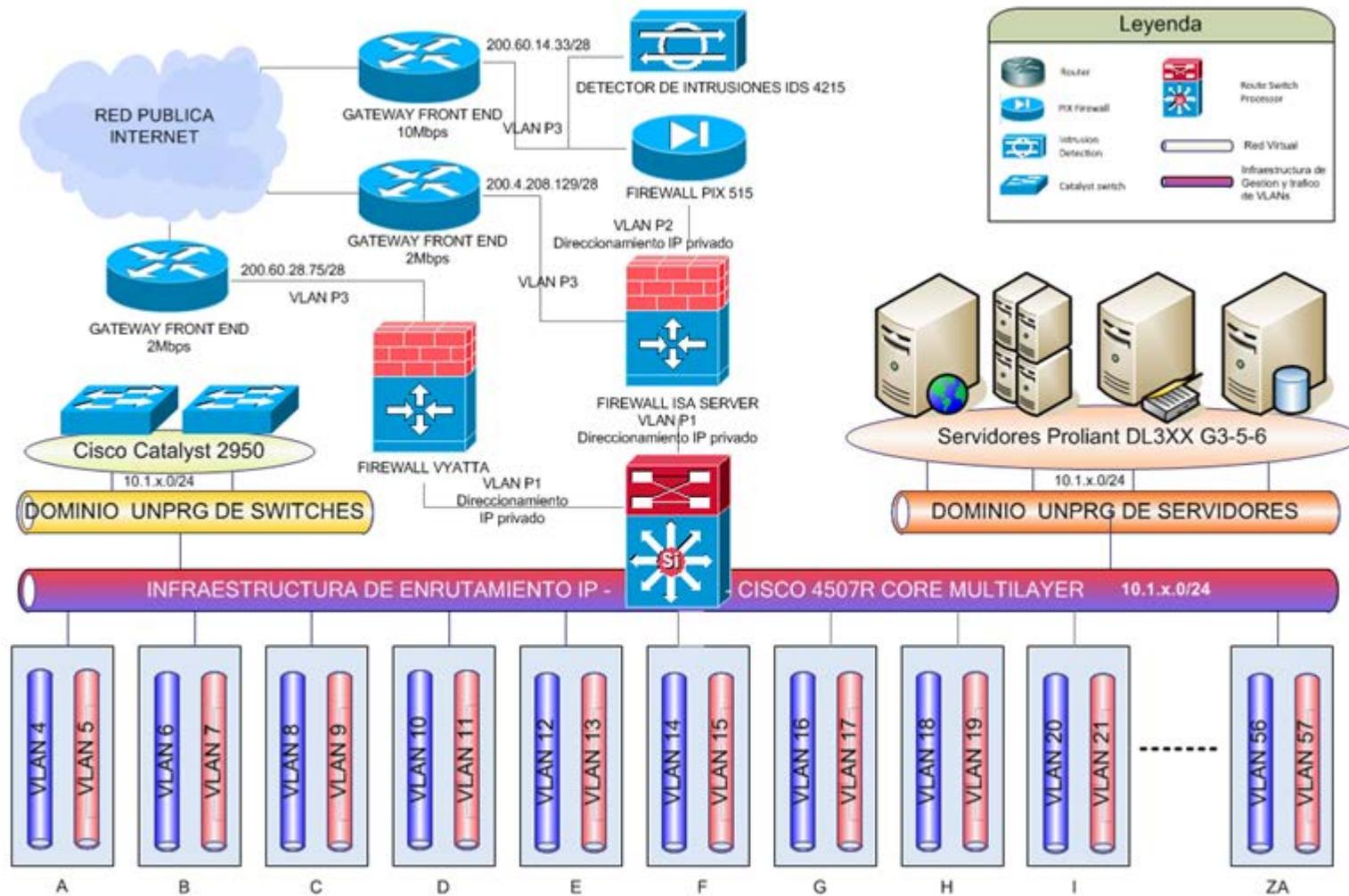


Gráfico N° 17. Arquitectura de red IP de la UNPRG

4.2. Análisis de la capacidad del canal con la infraestructura existente

4.2.1. Identificación de los canales de comunicación

La red de datos para la UNPRG tiene una topología estrella. En el Campus Universitario se encuentran ubicados 21 nodos de borde. Cada nodo secundario se conecta al nodo principal mediante una F.O. de seis (06) hilos. A continuación se describen los nodos de borde y su ubicación:

Tabla N° 4 : Ubicación de los nodos de conectividad en el Campus Universitario

Nº	Denominación	Descripción de la Ubicación
1	A	Edificio del Rectorado 1er piso
2	B	Escuela de PostGrado Centro de Cómputo – 3er piso
3	C	Biblioteca Central Ambiente de Cómputo – 1er piso
4	D	Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica (FIME)
5	E	Facultad de Ingeniería Civil, de Sistemas y Arquitectura (FICSA) Laboratorio de Cómputo N° 01 – 3er piso
6	F	Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias (FIQIA) 2do piso
7	G	Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Oficina Administrativas – 2 piso
8	H	Facultad de Biología
9	I	Facultad de Ingeniería Agrícola 2do piso
10	J	Facultad de Agronomía
11	K	Facultad de Zootecnia Oficinas Administrativas – 2 piso
12	L	Laboratorio de Cómputo de FACFyM Oficina Administrativa – 2 piso
13	LI	Facultad de Derecho
14	M	Facultad de Enfermería
15	N	Facultad de Ciencias Económicas, Contables y Administrativas (FACEAC)
16	O	Laboratorio de Veterinaria
17	P	Oficina General de Sistemas de Información (OGSI) Oficina de Servidores – 1er piso
18	Q	Facultad de Ciencias Históricas, Sociales y Educación (FACHSE)
19	R	Facultad de Medicina Humana
20	S	Facultad de Medicina Veterinaria Oficina Administrativa – 1er piso
21	T	Oficina de Red Telemática (ORT)

Tabla N° 5 : Ubicación de los nodos de conectividad externos al Campus Universitario

Nº	Denominación	Descripción de la Ubicación
22	U	Local Central de Lambayeque 1er piso
23	V	Local de Junín – Lambayeque 1er piso
24	X	Local Balta – Bolognesi - Chiclayo 2do piso

Tabla N° 6 : Metrado y tipo de F.O.

Rutas de ORT (Nodo T) a:	Destino	Detalle de la F.O.			
		24Hilos	12Hilos	6Hilos	Tipo F.O.
Ruta 01	C Biblioteca Central	415			SM
	A Edificio Rectorado			150	SM
	B Escuela PostGrado			250	SM
	D FIME			330	SM
Ruta 02	E FICSA	180			MM
	F FIQIA			160	MM
	G Adm. FACFyM			160	MM
	H Biología			260	MM
Ruta 03	L Lab. FACFyM	185			MM
	I Ing. Agrícola			120	MM
	J Agronomía			65	MM
	K Zootecnia			135	MM
Ruta 04	N FACEAC	230			MM
	LI Derecho			100	MM
	M Enfermería			75	MM
	O Veterinaria			135	MM
Ruta 05	Q FACHSE	305			MM
	P OCI			65	MM
	R Medicina Humana			110	MM
	S Medicina Veterinaria			165	MM

Nota: MM: Multimodo, SM: Monomodo

Tabla N° 7 : Bandejas y empalmes de F.O.

Nodos	Bandejas 48 hilos	Bandejas 12 hilos	Nodos de Empalme
PRINCIPAL	3		
A		1	
B		1	
C		1	1
D		1	
E		1	1
F		1	
G		1	
H		1	
I		1	
J		1	
K		1	
L		1	1
LL		1	
M		1	
N		1	1
O		1	
P		1	
Q		1	1
R		1	
S		1	
TOTAL	3	20	4

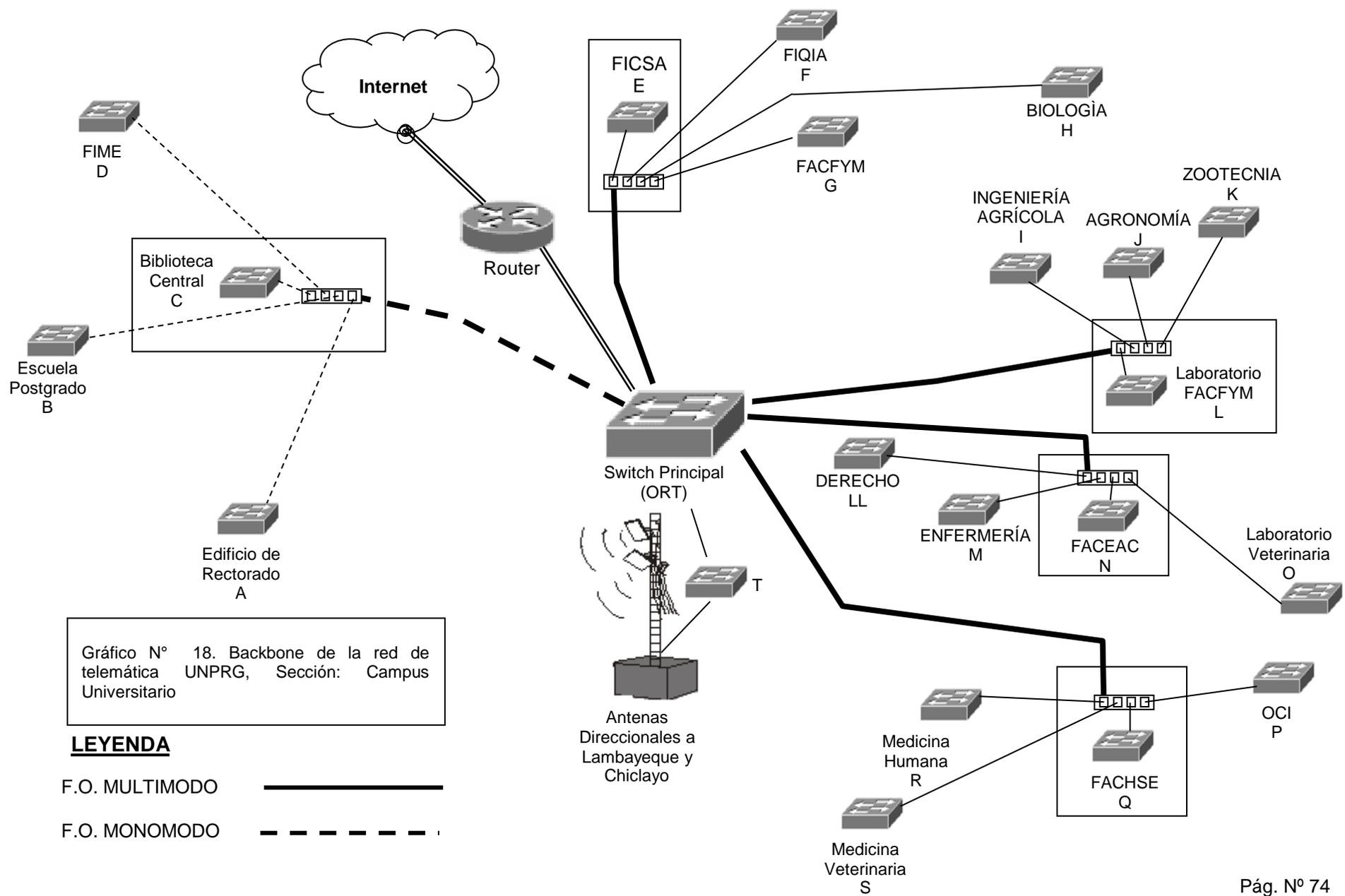


Gráfico N° 18. Backbone de la red de telemática UNPRG, Sección: Campus Universitario

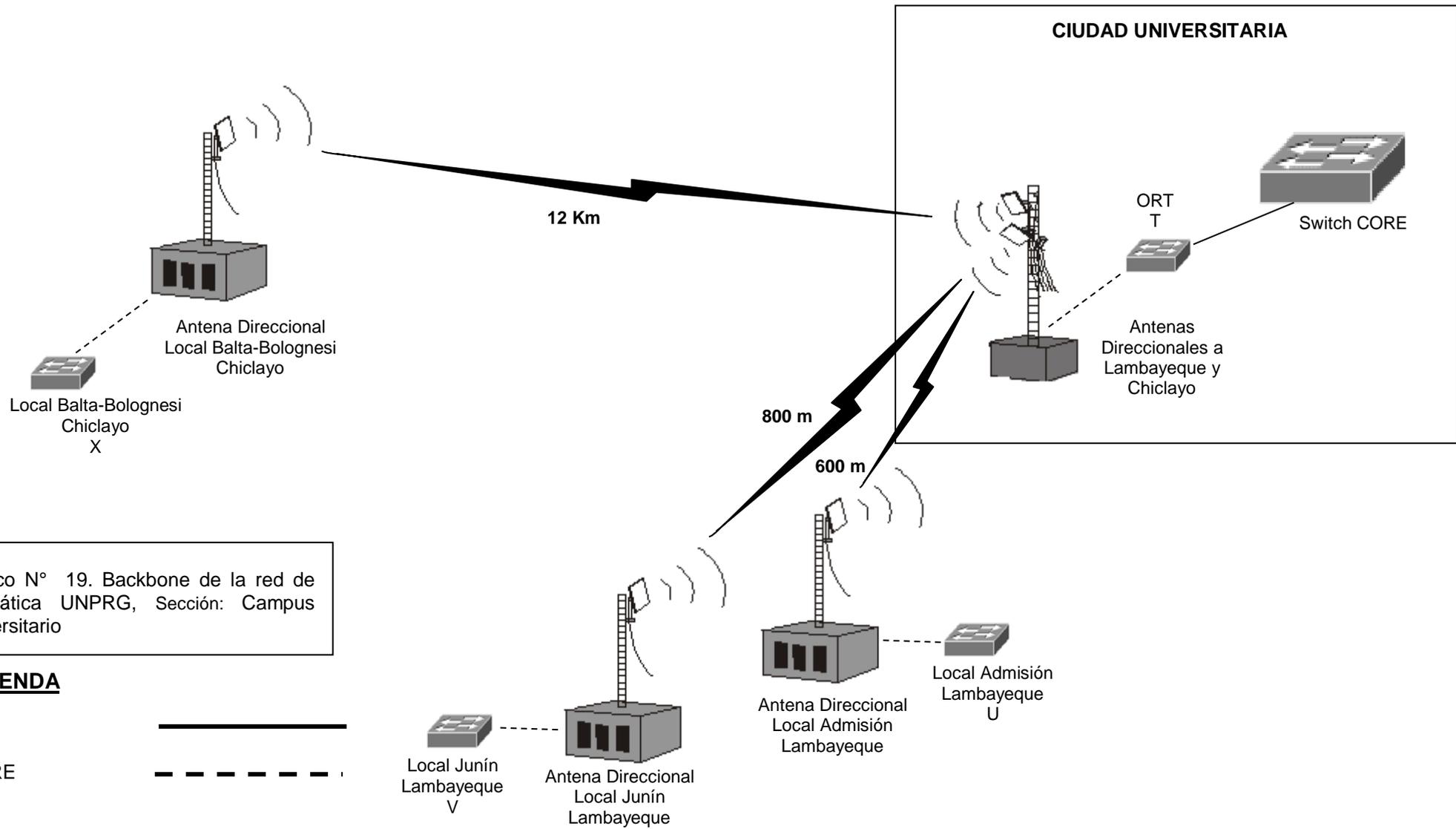


Gráfico N° 19. Backbone de la red de telemática UNPRG, Sección: Campus Universitario

LEYENDA

- F.O. —————
- COBRE - - - - -

4.2.2. Análisis del tráfico y estimación de los valores reales de las variables de la investigación sobre F.O.

Para esta actividad, se utilizaron herramientas de software para la recolección de datos durante varios períodos alternos de 2 semanas, en horas pico de tráfico de red, en los diferentes nodos de la Red Telemática de la Universidad. Para ello se utilizó lo siguiente:

- a. Cisco Network Assistant 5.3: Para la medición del máximo rendimiento de ancho de banda (Cantidad de bytes usados en la transmisión de un mensaje)
- b. Jperf 2.0.2 (Iperf): Para la medición de la Velocidad de transmisión Bits por segundo (bps), el ruido y la tasa de errores
- c. Mensajes de solicitud y respuesta de eco del Protocolo (ICMP), para comprobar la conectividad entre dos puntos y los retardos existentes

En esta evaluación se consideraron todas las comunicaciones ocurridas para la transmisión de datos y voz a la vez. Debe tenerse en cuenta que sobre el tendido de F.O. se transmiten tanto datos como voz.

A continuación se muestra el resultado de mediciones realizadas para conocer el tráfico generado y el máximo tráfico soportado entre la capa de acceso correspondiente al Nodo A (edificio de Rectorado y Vicerrectorados) y la capa de acceso de otro nodo de referencia (nodo T).

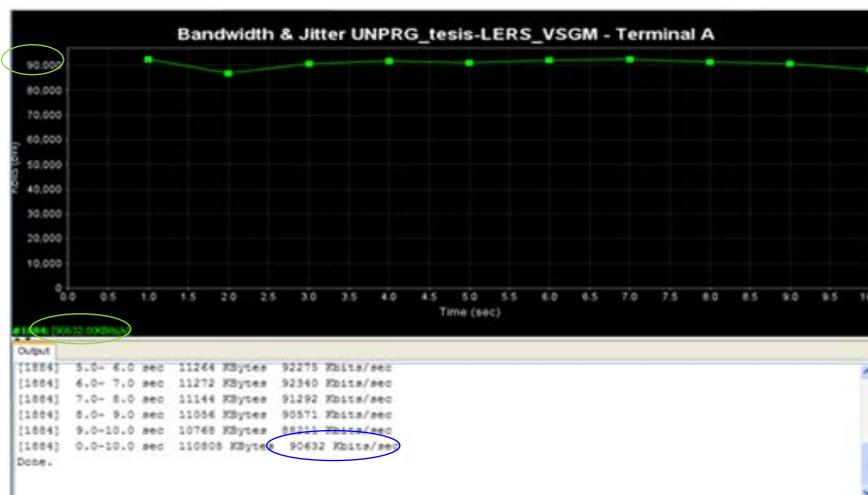


Gráfico N° 20. Máximo tráfico soportado desde equipos activos del nodo A a nodo T.
Fuente: medición con software Jperf

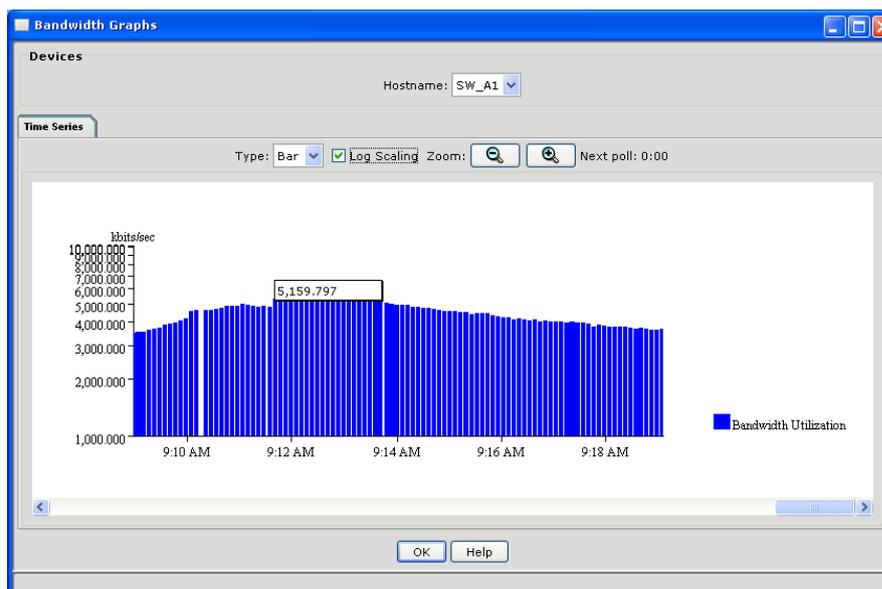


Gráfico N° 21. Utilización de ancho de Banda desde el nodo A
Fuente: Medición con software Cisco Network Assistant

Para obtener la latencia⁵ para las dependencias de cada Nodo de la Red Telemática con respecto a un nodo específico (Nodo T) enviando paquetes ICMP de solicitud y respuesta entre hosts de la capa de acceso de cada nodo.

El siguiente resultado muestra la latencia obtenida luego de enviar paquetes ICMP desde un hosts (pcAsecgnr01) del nodo A hacia un hosts (10.1.53.100) del nodo T:

```
administrador@pcAsecgnr01: ~/Escritorio$ ping -c 5 10.1.53.100
PING 10.1.53.100 (10.1.53.100) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.1.53.100: icmp_req=1 ttl=63 time=0.359 ms
64 bytes from 10.1.53.100: icmp_req=2 ttl=63 time=0.278 ms
64 bytes from 10.1.53.100: icmp_req=3 ttl=63 time=0.276 ms
64 bytes from 10.1.53.100: icmp_req=4 ttl=63 time=0.261 ms
64 bytes from 10.1.53.100: icmp_req=5 ttl=63 time=0.265 ms

--- 10.1.53.100 ping statistics ---
5 packets transmitted, 5 received, 0% packet loss, time 4000ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.261/0.287/0.359/0.042 ms
administrador@pcAsecgnr01: ~/Escritorio$
```

La capacidad disponible de procesamiento de los switches de acceso en cada nodo se obtiene de la información que muestra el software de gestión (IOS o Sistema Operativo de Internetworkin de Cisco) de los equipos en

⁵ Latencia en una red es el retardo producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red.

producción (en horas pico de tráfico) de la red de tal manera que se pueda garantizar la gestión de tráfico adicional para nuevas aplicaciones de red como la telefonía IP.

```
PROHIBIDO EL INGRESO A PERSONAL NO AUTORIZADO
ADMINISTRACION DE LA RED - UNPRG
SWTCH: NODO A ID: 1
User Access Verification
Password:
SW_A1>en
Password:
SW_A1#
SW_A1#sh processes cpu
CPU utilization for five seconds: 23%/7%; one minute: 21%; five
minutes: 21%
SW_A1#
SW_A1#sh processes memory
Total: 7675264, Used: 4916008, Free: 2759256
SW_A1#
```

```
PROHIBIDO EL INGRESO A PERSONAL NO AUTORIZADO
ADMINISTRACION DE LA RED - UNPRG
SWTCH: NODO B ID: 1
User Access Verification
Password:
sw_B1>en
Password:
sw_B1#sh processes cpu
CPU utilization for five seconds: 32%/13%; one minute: 30%; five
minutes: 30%
sw_B1#sh processes memory
Total: 7947968, Used: 4992584, Free: 2955384
sw_B1#
```

```
PROHIBIDO EL INGRESO A PERSONAL NO AUTORIZADO
ADMINISTRACION DE LA RED - UNPRG
SWTCH: NODO TNC ID: 1
User Access Verification
Password:
sw_TNC1>en
Password:
sw_TNC1#sh processes cpu
CPU utilization for five seconds: 20%/8%; one minute: 17%; five
minutes: 17%
sw_TNC1#sh processes memory
Total: 7669664, Used: 3590436, Free: 4079228
sw_TNC1#
```

```
PROHIBIDO EL INGRESO A PERSONAL NO AUTORIZADO
ADMINISTRACION DE LA RED - UNPRG
SWTCH: NODO U ID: 1
User Access Verification
Password:
sw_U1>en
Password:
sw_U1#sh processes cpu
CPU utilization for five seconds: 37%/21%; one minute: 38%; five
minutes: 38%
sw_U1#sh processes memory
Total: 7669664, Used: 3847320, Free: 3822344
sw_U1#
```

A continuación se detallan los resultados obtenidos para la capa de acceso de los nodos de la red de comunicaciones IP de la Universidad.

Tabla N° 8. Utilización de ancho de banda (BW), latencia y confiabilidad de la red en la transmisión de paquetes IP

Nodo	Velocidad de transmisión Gbps	Utilization de BW Máx (conec. all ports) - kbps	Tráfico máximo soportado entre Switches de acceso (kbps)	BW disponible (kbps)	% de Utilización de BW	RTT (Round Trip Delay Time) máx. (ms)	Paquetes perdidos	% CPU/ RAM dispon.
A	0.516	9,906.81	90,632.00	80,725.19	11	0.287	0%	77/35.95
B	1.1127	18,981.10	79,233.00	60,251.90	24	0.354	0%	68/37.18
C	0.2103	3,883.03	91,233.00	87,349.97	4	0.159	0%	91/67.17
D	0.6354	23,461.77	84,322.00	60,860.23	28	0.459	0%	73/38.54
E	1.1778	60,297.39	78,913.00	18,615.61	76	0.302	0%	58/36.78
F	0.385	15,401.30	90,297.00	74,895.70	17	0.231	0%	79/54.13
G	0.1387	8,320.54	87,233.00	78,912.46	10	0.274	0%	75/43.96
H	0.8908	23,755.33	89,221.00	65,465.67	27	0.288	0%	71/37.31
I	0.4344	7,446.91	90,644.00	83,197.09	8	0.301	0%	83/59.12
J	0.4695	10,243.22	92,311.00	82,067.78	11	0.299	0%	79/55.25
K	0.1783	3,566.12	90,892.00	87,325.88	4	0.286	0%	87/58.21
L	0.6273	13,686.28	85,671.00	71,984.72	16	0.219	0%	81/46.85
LL	0.0869	4,173.19	91,988.00	87,814.81	5	0.350	0%	90/55.60
M	0.5636	11,272.91	89,344.00	78,071.09	13	0.266	0%	78/49.24
N	0.4021	12,062.50	86,822.00	74,759.50	14	0.312	0%	59/38.34
O	0.0564	4,509.57	89,112.00	84,602.43	5	0.377	0%	96/89.00
P	0.621	15,688.26	91,200.00	75,511.74	17	0.401	0%	66/42.55
Q	0.7906	29,191.53	88,185.00	58,993.47	33	0.463	0%	64/31.20
R	0.3009	24,073.02	93,992.00	69,918.98	26	0.415	0%	72/41.36
S	0.3584	5,376.54	87,006.00	81,629.46	6	0.493	0%	93/60.96
T	1.0603	14,968.91	84,300.00	69,331.09	18	0.359	0%	80/53.19
U	1.0766	58,018.80	90,937.00	32,918.20	64	1.787	0%	62/49.84
V	1.1004	42,005.17	89,771.00	47,765.83	47	1.335	0%	76/52.84
X	1.1277	26,018.80	90,901.00	64,882.20	29	2.551	0%	79/52.85

BW: Bandwidth – Ancho de banda

Excepto el caso del nodo E y U, en los demás casos se tiene un ancho de banda (referido a kbits/s) disponible de por lo menos 53%, un retardo muy inferior al máximo permitido (150 ms).

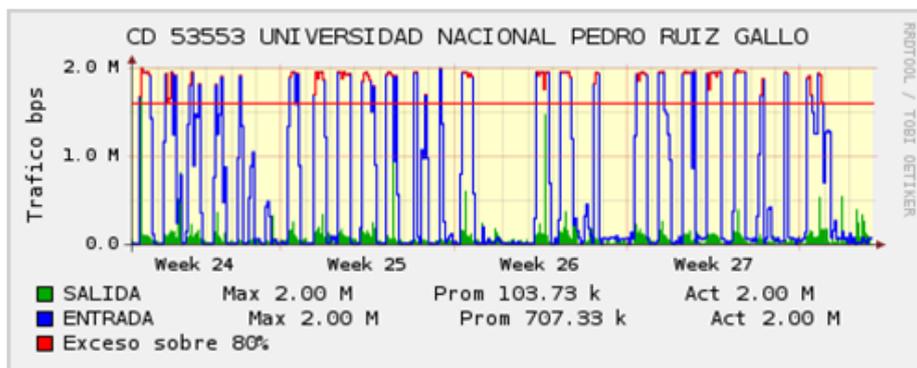
Luego de realizado los test de envío de paquetes, ninguno de estos necesita retransmisión durante el envío de datos. Los switches de acceso con más del 58% de capacidad de procesamiento disponible y 31% de almacenamiento disponible en los equipos de comunicaciones IP.

Estos datos obtenidos, que procesamos y presentamos en el cuadro anterior nos permiten afirmar que la infraestructura de Red Telemática puede soportar tráfico adicional generado por otros servicios de redes.

En consecuencia, la infraestructura de comunicaciones IP (equipos activos y pasivos) de la Universidad cuenta con los recursos y las características necesarias para una adecuada administración y soporte del tráfico de voz. Sin embargo el soporte de la red IP de la Universidad para una solución específica de Telefonía IP se define en la etapa de diseño y propuesta de solución de acuerdo a las características técnicas seleccionadas posteriormente para la administración del tráfico de voz requerido de acuerdo a los objetivos y dimensionamiento de este proyecto.

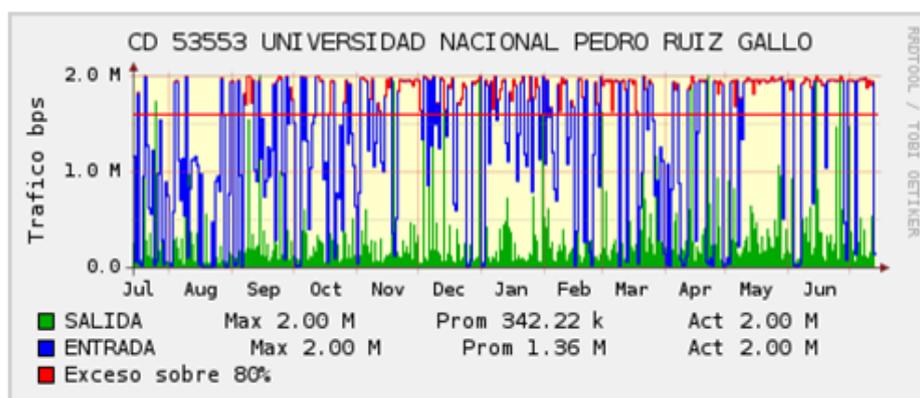
4.2.3. Análisis del tráfico y estimación de los valores reales de las variables de la investigación sobre enlaces de Internet dedicado de 2 Mbps y 10 Mbps

Evaluamos la utilización de ancho de banda en cada enlace a internet en la Universidad, con la finalidad de conocer su disponibilidad. Los datos se obtienen de las mediciones realizadas al tráfico que gestionan los routers Cisco 2821 (10Mbps 1:1) y 2801 (2Mbps 1:2).



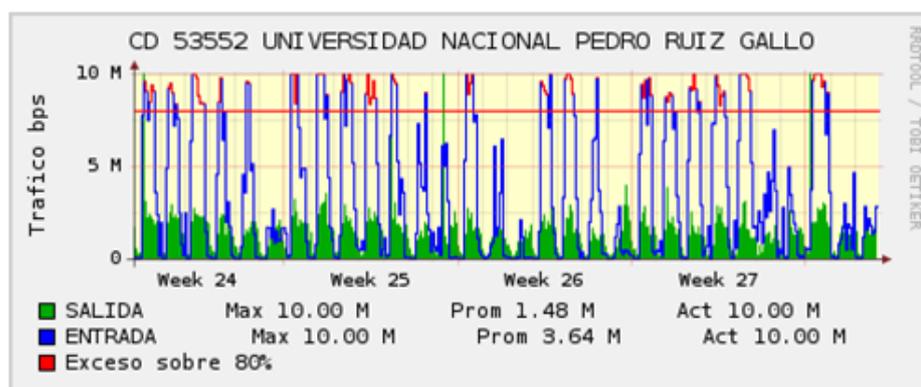
La gráfica presentada en esta página es sólo referencial y no tiene valor legal

Gráfico N° 22. Utilización mensual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 2Mbps
Fuente: Red telemática



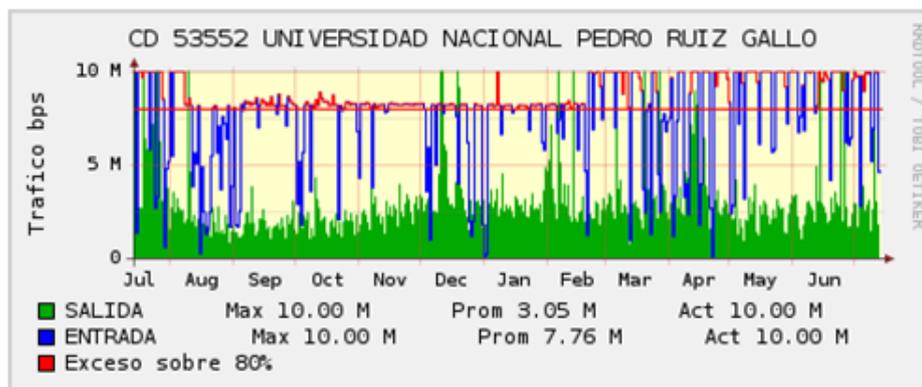
La gráfica presentada en esta página es sólo referencial y no tiene valor legal

Gráfico N° 23. Utilización anual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 2Mbps
Fuente: Red telemática



La gráfica presentada en esta página es sólo referencial y no tiene valor legal

Gráfico N° 24. Utilización mensual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 10Mbps



La gráfica presentada en esta página es sólo referencial y no tiene valor legal

Gráfico N° 25. Utilización anual de ancho de banda – Línea dedicada Internet 10Mbps

Tabla N° 9. Utilización de ancho de banda de internet en líneas dedicadas en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

	Prom.Bandwidth In (uso en kbps)	Prom.Bandwidth Out (uso en kbps)	Prom. Total Bandwidth (uso en kbps)	% utiliz.	Prom. Total Bandwidth (dispo.en kbps)	% dispon.
2Mbps mes	707.33	103.73	811.06	39.60	1236.94	60.40
2Mbps año	1392.64	342.22	1734.86	84.71	313.14	15.29
10Mbps mes	3727.36	1515.52	5242.88	51.20	4997.12	48.80
10Mbps año	7946.24	3123.2	11069.44	> 100	> 10240 (2Mbps)	0

De los datos registrados en cada enlace, podemos apreciar, que en el análisis de un periodo mensual, ambos enlaces de internet (de 2 Mbps y 10Mbps), en promedio disponen de ancho de banda para la ejecución de otras aplicaciones, incluidas las de voz IP. Siendo el enlace de 10 Mbps el enlace que mayor disponibilidad tiene (4997.12 kbps contra 1236.94).

Sin embargo, a pesar que el enlace de 10Mbps presenta una disponibilidad mayor de ancho de banda, en el análisis de tráfico de un periodo anual, el enlace de 10 Mbps se satura llegando a tener un déficit considerable en la disponibilidad de ancho de banda (829.44 kbps pudiendo ser mayor si se estudiara en detalle este enlace sobre una referencia mayor a 10 Mbps), mientras que el enlace de 2 Mbps aún presenta ancho de banda disponible (17%) sin llegar a saturarse.

Esto se puede explicar considerando que el enlace de 10Mbps es el principal enlace para los procesos de Exámenes de Admisión y de Centro Preuniversitario.

Teniendo en cuenta esta información, podemos concluir en que la Universidad cuenta con un enlace dedicado de 2 Mbps, con un ancho de banda disponible mensual de 60.40%, lo que representa **1236.94 kbps**, para la ejecución de otras aplicaciones sobre esta línea de datos.

4.3. Análisis de la capacidad del canal con los valores teóricos obtenidos aplicando el Teorema de Shannon

4.3.1. Especificaciones de los componentes del sistema de comunicación

Para los cálculos de las variables de la investigación sobre F.O. se debe tener en cuenta las características y especificaciones técnicas de los componentes que conforman el sistema de comunicación, (bajo la perspectiva de la Teoría de Shannon). Básicamente, se debe tener en cuenta las características de los equipos que cumplen las funciones del transmisor, canal y receptor.

Bajo la topología de la red telemática, descrita en el gráfico N° 18 y en las tablas N° 4, 5, 6 y 7, se tienen dos modelos de comunicación con canal de F.O. a evaluar:

a. Modelo de comunicación con F.O. monomodo

Este canal de comunicación se establece en el backbone de la red telemática con los siguientes equipos y medio físico de FO SM:

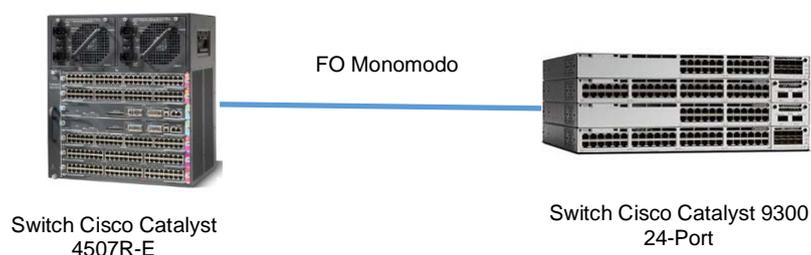


Gráfico N° 26. Canal de comunicación FO Monomodo
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la topología de la red telemática, este tipo de canal de comunicación se da en los siguientes tramos (Ver Gráfico N° 18):

- Tramo T – E (FICSA)
- Tramo T – L (FACFYM Laboratorio)
- Tramo T – N (FACEAC)
- Tramo T – Q (FACHSE)

Los demás tramos se descartan del análisis porque son canales de comunicación conformados por un medio físico de cable UTP.

b. Modelo de comunicación con F.O. multimodo

Este canal de comunicación se establece en el backbone de la red telemática con los siguientes equipos y medio físico de FO MM:

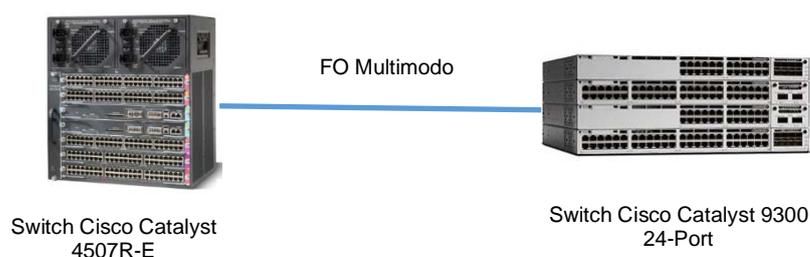


Gráfico N° 27. Canal de comunicación FO Multimodo
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la topología de la red telemática, este tipo de canal de comunicación se da en el siguiente tramo (Ver Gráfico N° 18):

- Tramo T – C (Oficina General de Biblioteca)

El monomodo significa que la fibra sólo puede propagarse un modo de la luz a la vez. Sin embargo el multimodo significa que la fibra puede propagarse varios modos de la luz a la vez. La principal diferencia entre fibra monomodo y multimodo es el diámetro del núcleo de la fibra, la longitud de onda, la fuente de la luz y el ancho de banda.

Las principales diferencias técnicas entre estos tipos de FO, se detallan a continuación:

- El diámetro de núcleo de fibra monomodo es más pequeño que el de fibra multimodo. Aunque hay otros diámetros de núcleo, el diámetro de núcleo típico todavía es de $9\mu\text{m}$ (con un revestimiento de $125\mu\text{m}$). Y el diámetro de núcleo de fibra multimodo típico es de $50\mu\text{m}$ y $62.5\mu\text{m}$ lo que le permite tener una mayor capacidad de “recolección de luz” y simplificar las conexiones.

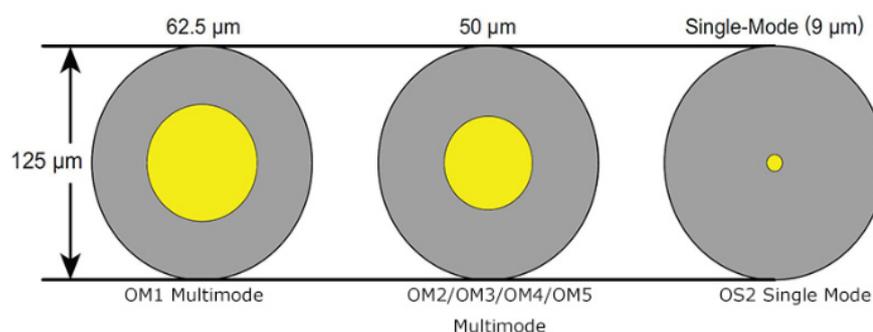


Gráfico N° 28. Diámetros de la FO Multimodo y Monomodo

- Debido al gran tamaño del núcleo de la fibra multimodo, algunas fuentes de luz de bajo costo como LED (diodos emisores de luz) y VCSEL (láseres de emisión de superficie de cavidad vertical) que funcionan a 850nm y 1310nm de longitud de onda se utilizan en cables de fibra multimodo. Mientras que el monomodo a menudo usa un láser o diodos láser para producir luz inyectada en el cable. Y la longitud de onda de fibra monomodo de uso común es 1310nm y 1550nm .
- El ancho de banda de fibra multimodo está limitado por su modo de fuente y el máximo ancho de banda actual es de 28000MHz/km de fibra OM5. Mientras que el ancho de banda de fibra monomodo es ilimitado teóricamente debido a que permite el paso de una luz del modo a la vez.
- La distancia de FO SM es más larga que la de cables de FO MM a la velocidad desde 1G hasta 10G , pero cables multimodo OM3/OM4/OM5 soporta la más alta velocidad. La FO SM del tipo OS1 puede desplegarse hasta un máximo de 2000 metros y en el tipo OS2, puede llegar a una distancia de 5000 a 10000 metros. a la

velocidad desde 1G hasta 10G, para ambos casos. Los OS1 y OS2 son cables de larga distancia debido a su poca capacidad para doblarse.

Mientras que la FO MM permite que los haces de luz reboten en las paredes del cadding o revestimiento. Esto permite una mayor cantidad de haces de luz viajando al mismo tiempo a través del núcleo, debido a que su núcleo de 50 a 62.5 micrómetros, concede más espacio para que la data viaje.

- En relación a la velocidad de transmisión, se tienen las siguientes características:

Variante Eth.	Velocidad	Medio	Distancia
100Base-Fx	100 Mbps	f.o. MM OM1 1300 nm	2 Km.
100Base-Lx	100 Mbps	f.o. SM 1310 nm	15 Km.
1000Base-Sx	1 Gbps	f.o. MM OM2 850 nm	500 m.
1000Base-Lx	1 Gbps	f.o. MM OM1/OM2 1300 nm	500 m.
1000Base-Lx	1 Gbps	f.o. SM 1310 nm	10 Km.
1000Base-Zx	1 Gbps	f.o. SM 1550 nm	80 Km.
10GBase-SR/SW	10 Gbps	F.O. MM OM3 850 nm	300 m.
10GBase-LR/LW	10 Gbps	f.o. SM 1310 nm	10-25 Km.
10GBase-Er/Ew	10 Gbps	f.o. SM 1550 nm	40-80 Km.

Gráfico N° 29. Velocidades de transmisión según variantes Ethernet por tipo de FO

En el caso de la red telemática de la UNPRG, se tiene:

- Tramos con FO MM de 1300 nm del tipo OM2 la velocidad es de 1 Gbps a distancias de 500 m a 600 m
- Tramos con FO SM de 1310 nm la velocidad es de 1 Gbps a distancias de 10 Km

- En relación a la atenuación de la señal, y tomando como referencia el cuadro siguiente, se tiene que la atenuación es de:

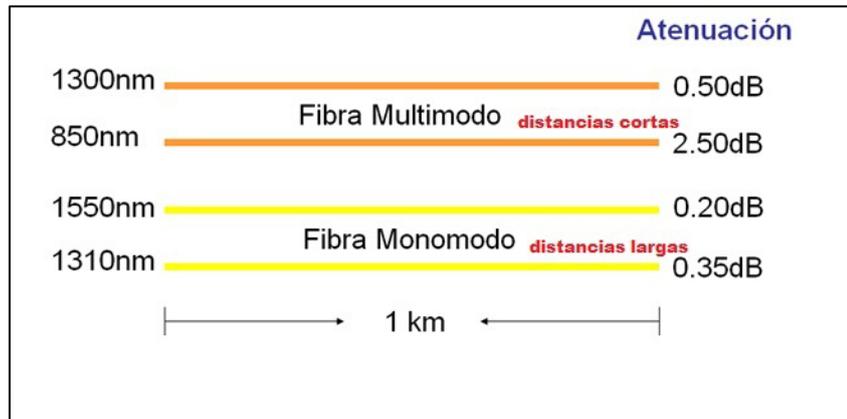


Gráfico N° 30. Atenuación de la señal según la distancia por tipo de FO

- Tramos con FO MM de 1300 nm la atenuación es de 0,50 dB a un Km
- Tramos con FO SM de 1310 nm la atenuación es de 0,35 dB a un Km

4.3.2. Cálculo de los valores de las variables de la investigación aplicando el Teorema de Shannon

a. Cálculo de la velocidad la transmisión

Para el cálculo de la capacidad teórica de transmisión se aplicará las fórmulas N° 11 y 13, es decir, el análisis de los canales de comunicación ideal y con ruido respectivamente.

Para análisis del canal sin ruido:

Se utiliza la fórmula: $C = 2Bn = 2B \log_2 M$ (bps)

Los parámetros a considerar son:

- B: ancho de banda (Hz)
- M número de niveles posibles de la señal

Tabla N° 10. Parámetros para el análisis de la velocidad de transmisión en un canal sin ruido

Parámetro	Valor	Características reales
número de niveles posibles de la señal (M)	2	Los tramos con FO MM y FO SM son canales para voz y datos Se utilizan switches para transmitir señales digitales. Por tanto, el número de niveles posibles de la señal es 2
Ancho de banda (B)	600 MHz	La FO MM de 1300 nm instalada tiene un ancho de banda de 500 a 600 MHz para 1 Km y 300 MHz para 2 KM. En este caso se toma el valor de 600 MHz porque ninguno de los tramos supera el Km

Aplicando la fórmula:

$$C = 2B \log_2 M \text{ (bps)}$$

$$C = 2 \cdot (600) \cdot \log_2(2)$$

$$C = 2 \cdot 600 \cdot 10^6$$

$$C = 1,2 \times 10^9$$

$$C = 1,2 \text{ Gbps}$$

Se tiene que para los tramos

- T – E (FICSA)
- T – L (FACFYM Laboratorio)
- T – N (FACEAC)
- T – Q (FACHSE)

La velocidad máxima de transmisión del canal sin ruido (ideal) es de 1,2 Gbps

Para el análisis del canal con ruido

Se utiliza la fórmula: $C = B \log_2 (1+S/N)$ (bps)

Para ello, se necesita conocer los siguientes parámetros:

Tabla N° 11. Parámetros para el análisis de la velocidad de transmisión en un canal con ruido

Parámetro	Valor	Observación
Ancho de banda (B)	600 MHz-Km	La FO MM de 1300 nm instalada tiene un ancho de banda de 600 MHz para 1 Km y 300 MHz para 2 KM. En este caso se toma el valor de 600 MHz porque ninguno de los tramos supera el Km
potencia de la señal (S)	5 dB (amplifican en 5 veces la señal)	En este caso la potencia de señal es de ganancia debido a la amplificación de la señal que generan los switch (transmisor) para transmitir la señal. Como todos los tramos utilizan los mismos switch, las potencias de señal son las mismas. Este dato se obtiene de las especificaciones de los equipos La potencia de señal se calcula entre dos puntos, por ejemplo T-E Se utiliza la fórmula $10 \log_{10} (p1/p2)$ dB
potencia del ruido presente en el canal (N)	10 dB	La señal recibida en los switch es una señal modificada debido a las distorsiones introducidas en la transmisión, ya sea en el switch emisor o en el receptor. No se considera: <ul style="list-style-type: none"> - Ruido térmico debido a la temperatura (despreciable porque los switch casi no tienen resistencias que generen altas temperaturas) - Ruido de intermodulación (no ocurre porque la FO instalada tiene un hilo para envío y otro para recepción. Por tanto, no ocurren frecuencias distintas en un mismo canal) - Distorsión por retardo. Este es el que se toma para el cálculo, y se debe a la variación de la velocidad, cuando varían las frecuencias en la transmisión - Atenuación, debido a las distancia (es despreciable) El cálculo se realizó solo con el ruido generado por la ganancia que genera el switch para amplificar las señales

Aplicando la fórmula:

$$C = B \log_2 (1+S/N) \text{ (bps)}$$

$$C = (600 * 10^6) * \log_2(1+10/3)$$

$$C = (600 * 10^6) * 1,4150$$

$$C = 0.8490 \text{ Gbps}$$

Se tiene que para los tramos

- T – E (FICSA)
- T – L (FACFYM Laboratorio)
- T – N (FACEAC)
- T – Q (FACHSE)

La velocidad máxima de transmisión del canal con ruido es de 0,85 Gbps

En la siguiente tabla se muestran las comparativas de las velocidades de transmisión obtenidas en la investigación, primero, con el software especializado de análisis de redes de datos y, segundo, con la aplicación de las fórmulas de la Teoría de la Información de Shannon, el cuál será nuestro modelo teórico de referencia.

Tabla N° 12. Comparativa de las velocidades de transmisión real y teórica (Shannon)

Nodo	Datos reales	Modelo Teórico de Referencia (Teoría de la Información de Shannon)		Comparativa	
	Velocidad de transmisión Gbps	Velocidad de transmisión Teórica en canal sin ruido Gbps	Velocidad de transmisión Teórica en canal con ruido Gbps	Diferencia en Velocidad de transmisión en canal sin ruido %	Diferencia en Velocidad de transmisión en canal con ruido %
A	0.516	1.2	0.85	43.00	60.71
B	1.1127	1.2	0.85	92.73	130.91
C	0.2103	1.2	0.85	17.53	24.74
D	0.6354	1.2	0.85	52.95	74.75
E	1.1778	1.2	0.85	98.15	138.56
F	0.385	1.2	0.85	32.08	45.29
G	0.1387	1.2	0.85	11.56	16.32
H	0.8908	1.2	0.85	74.23	104.80
I	0.4344	1.2	0.85	36.20	51.11
J	0.4695	1.2	0.85	39.13	55.24
K	0.1783	1.2	0.85	14.86	20.98
L	0.6273	1.2	0.85	52.28	73.80
LL	0.0869	1.2	0.85	7.24	10.22
M	0.5636	1.2	0.85	46.97	66.31
N	0.4021	1.2	0.85	33.51	47.31
O	0.0564	1.2	0.85	4.70	6.64

P	0.621	1.2	0.85	51.75	73.06
Q	0.7906	1.2	0.85	65.88	93.01
R	0.3009	1.2	0.85	25.08	35.40
S	0.3584	1.2	0.85	29.87	42.16
T	1.0603	1.2	0.85	88.36	124.74
U	1.0766	1.2	0.85	89.72	126.66
V	1.1004	1.2	0.85	91.70	129.46
X	1.1277	1.2	0.85	93.98	132.67

Para el propósito de la presente investigación, la contrastación de la hipótesis se realizó tomando como referencia los resultados de la aplicación del modelo teórico de Shannon para un canal con ruido.

b. Cálculo del uso del ancho de banda

Para el cálculo del ancho de banda utilizado teóricamente, se debe tener en cuenta que es el ancho de banda óptico (se descarta el ancho de banda eléctrico).

Para ello, se considera que:

$$\text{Ancho de banda óptico} = B * \text{longitud del cable instalado}$$

B: es el ancho de banda referencial en las especificaciones técnicas del cable. En este caso es de 600 MHz-Km.

Tabla N° 13. Cálculo del ancho de banda de los tramos de los canales de transmisión analizados

Tramo	Distancia del switch principal al switch de borde (tendido de FO en Km)	Ancho de banda óptico (en MHz)
T – E (FICSA)	0,180	108.00
T – L (FACFYM Laboratorio)	0,233	139.80
T – N (FACEAC)	0,189	113.40
T – Q (FACHSE)	0,288	172.80

En la siguiente tabla se muestran las comparativas de los anchos de banda obtenidos en la investigación, primero aplicando las fórmulas

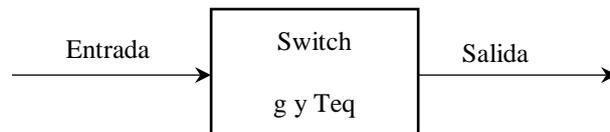
de la Teoría de la Información de Shannon; y segundo, el obtenido de las especificaciones técnicas de la FO tendida en la red telemática de la UNPRG, el cuál será nuestro modelo teórico de referencia.

Tabla N° 14. Comparativa de los ancho de banda real y teórico

Tramo	Ancho de banda Teórico (en MHz)	Ancho de banda Real (en MHz)	Diferencia (en %)
T – E (FICSA)	600	108.00	18.00
T – L (FACFYM Laboratorio)	600	139.80	23.30
T – N (FACEAC)	600	113.40	18.90
T – Q (FACHSE)	600	172.80	28.80

c. Cálculo del ruido generado en la transmisión

Dado que el switch funciona cumple una función de amplificación de la señal, el ruido que genera, es un ruido por amplificación, que depende de dos parámetros:



G: ganancia que genera el amplificador

Teq: Temperatura equivalente de ruido que modela el ruido que genera el amplificador. Viene dada por el fabricante conocido como Factor de ruido)

Por tanto, ruido (n) es:

$$n = g \cdot k \cdot T_{eq} \cdot B$$

g: ganancia que genera el amplificador

k: Constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ w/°K Hz)

B: Ancho de banda

Aplicando la fórmula, se tiene:

$$n = 3 \text{ dB} * (1,38 \times 10^{-23} \text{ w/}^\circ\text{K Hz}) * 293^\circ\text{K} * (600 \text{ MHz})$$

$$n = 0,005 \text{ dB}$$

CONCLUSIONES

1. En relación a la hipótesis

Se acepta la hipótesis nula porque se demuestra que existen diferencias en el cálculo del nivel de eficiencia real de los canales de transmisión de la red telemática de la UNPRG para la comunicación de la información con respecto a los resultados obtenidos con los cálculos aplicando el modelo teórico de Shannon.

2. En relación a la capacidad del canal de transmisión o velocidad de transmisión

- a. Los valores teóricos de referencia obtenidos para realizar la comparativa con la velocidad de transmisión real, son:
 - para el canal de transmisión sin ruido (aplicando el teorema de Nyquist) el valor teórico de la velocidad de transmisión que debe alcanzarse es de 1.2 Gbps
 - para el canal de transmisión con ruido (aplicando el teorema de Shannon-Hartley) el valor teórico de la velocidad de transmisión que debe alcanzarse es de 0.85 Gbps

- b. Las velocidades de transmisión reales, en todos los nodos analizados (switch de acceso), obtenidos con software especializado para análisis de redes de datos, ninguna supera los valores teóricos referenciales, cumpliéndose la teoría de Nyquist, que establece que los valores reales de las capacidades de los canales de comunicación tienen un límite teórico y que es difícil de superarlo, dado de que existe dependencia con otros factores como ancho de banda, ruido, etc.

- c. Se puede clasificar la eficiencia en la transmisión en tres niveles, de la siguiente manera:
 - **Eficiencia aceptable:** (color azul) en los switch de acceso identificados como nodos: B, E, H, Q, T, U, V, X (8 nodos); porque sus velocidades de transmisión son cercanas a la velocidad teórica de transmisión en un canal ideal, e incluso superan a la velocidad de transmisión teórica con ruido. Esto último significa que las ganancias generadas por los switch para amplificar la señal de entrada son efectivas.
 - **Eficiencia observable:** (color verde) en los switch de acceso identificados como nodos: A, D, I, J, L, M, P (7 nodos); porque superan el 50% de la velocidad teórica de transmisión con ruido, pero no llega a su 100%. Por

tanto, requiere hacerse un análisis para un posible rediseño de la red en esos puntos, porque no se está logrando la eficiencia esperada.

- **Deficiente:** (color rojo) en los switch de acceso identificados como nodos: C, F, G, K, LL, N, O, R, S (9 nodos); porque sus velocidades de transmisión son muy bajas en relación a los valores teóricos de referencia; por lo que se requiere un rediseño urgente de la red en estos puntos porque se está subutilizando la red o existirían deficiencias en los equipos de comunicación.

3. En relación al uso del ancho de banda

- a. Dado que el ancho de banda es una medida de la capacidad de un canal de comunicación que depende de las distancias del tendido del medio físico, en este caso la fibra óptica, los cálculos realizados para estimar el ancho de banda, se realizó para los tramos donde la red telemática tiene tendido FO MM de punto a punto.
- b. El ancho de banda utilizado para las comunicaciones entre los puntos de los tramos analizados de la red telemática en esta investigación, demuestran que el ancho de banda del tendido de FO está siendo subutilizado, debido a que en ninguno de los casos se llega a superar ni el 30% del ancho de banda del canal.

4. En relación al ruido generado en las señales

- a. Para el caso del ruido generado por los switch (en su función de amplificación) sobre la señal de entrada, se desprecia los siguientes casos:
 - Ruido térmico debido a la temperatura es despreciable, porque los switch no tienen resistencias que generen altas temperaturas.
 - Ruido de intermodulación. No ocurre porque la FO instalada tiene un hilo para envío y otro para recepción. Por tanto, no ocurren frecuencias distintas en un mismo canal.
 - Atenuación, debido a que las distancia en el tendido de la FO es despreciable
- b. Se considera el ruido generado por la ganancia que el switch para amplificar la señal recibida. En este caso, el valor obtenido es $n = 0,005$ dB, el cual es un valor despreciable.

RECOMENDACIONES

1. En la investigación se logrado ciertos resultados parciales referidos a la velocidad de transmisión y uso del ancho de banda en los principales canales de comunicación en la infraestructura conocida como red telemática de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, que demuestran deficiencias en su administración. Por lo que, se hace necesario continuar con la investigación para identificar las causas exactas de estas deficiencias.
2. La red telemática tiene otros tipos de canales de comunicación, que no conforman el backbone de las comunicaciones, cuyos medios físicos son: cable UTP, antenas, entre otros. Por lo que es necesario, continuar con la investigación para evaluar la eficiencia de estos otros canales de comunicación.

REFERENCIAS DE CONSULTA

- Chen, R. (2016). *A Brief Introduction on Shannon's Information Theory*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/294457010_A_Brief_Introduction_on_Shannon's_Information_Theory_old_version
- Cherry, C. (1956). *On human Communication*. MIT PRESS.
- Heras, M. (2013). Contribución de las técnicas de procesamiento digital de señales en el. *Tesis de maestría en Telecomunicaciones*. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Holik, F. (2018). *Teoría de la información de Claude E. Shannon*. Obtenido de Diccionario Interdisciplinar Austral:
http://dia.austral.edu.ar/Teor%C3%ADa_de_la_informaci%C3%B3n_de_Claude_E._Shannon
- López, A., Parada, A., & Simonetti, F. (1995). Teoría de la información. En *Extractado de "Introducción a la psicología de la comunicación"*. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Pérez, M. (2015). *Fundamentos básicos de la Teoría de la Información*. Obtenido de Programa de Comunicación Social y Periodismo, Universidad Subcolombiana:
<http://camelot.upf.es/digital/curs/rtf/mario.rtf>
- Serrano, M., Piñuel, J., Gracia, J., & Arias, M. (2012). *Teoría de la comunicación. epistemología y análisis de la referencia*. Madrid: Facultad de C.C. de la Información de la Universidad Complutense de Madrid.
- Shannon, C., & Weaver, W. (1949). The mathematical theory of communication. *University of Illinois Press - Urbana*, 132 pp.
- Timpson, C. (2008). Philosophical Aspects of Quantum Information Theory. *The Ashgate Companion to the New Philosophy of Physics*, pp 197-261.