UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE REDES Y

COMUNICACIONES

Diseño de una red LTE escalable para la transmisión de video IP aplicado a la
seguridad ciudadana

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero de Redes y Comunicaciones

AUTOR

Córdova Pinedo, Rayleigh ([0000-0001-9719-0274](tel:0000-0001-9719-0274))

ASESOR:

Gonzales Figueroa, Renatto Gustavo ([0000-0003-3658-3415](tel:0000-0003-3658-3415))

Lima, 10 de Mayo del 2019

*El presente trabajo está dedicado a
mi gran familia por todo el apoyo durante
este viaje y por haber sido el foco de
mi motivación diaria.*

RESUMEN

En el presente trabajo se ha diseñado una red LTE escalable que permite la transmisión de video IP en tiempo real. Este diseño ha sido desarrollado de acuerdo con el estándar 3GPP y está orientado a optimizar los servicios de video vigilancia asociados a la seguridad ciudadana del distrito de San Juan Bautista, provincia de Maynas, departamento de Loreto.

Actualmente las redes móviles en el distrito están limitadas a las periferias de la carretera Iquitos-Nauta y a las zonas públicas del aeropuerto internacional Francisco Secada Vignetta. El diseño propuesto contempla el despliegue de 6 eNodosb y un núcleo LTE. Finalmente, la solución proporciona cobertura al 100% de la zona poblada del distrito ofreciendo tasas de datos de 57.6 Mbps para tráfico de subida y 356 Mbps para tráfico de bajada.

Palabras clave: LTE; Video; IP; eNodoB; Cobertura; Transmisión; Comunicaciones

Design of a scalable LTE network for the IP video transmission applied to the citizen security

ABSTRACT

This document is about the design of scalable LTE network that allows the transmisión of real time IP video. The design has been made according the guidelines of the 3GPP standard and is oriented to the video surveillance services optimization, as part of the citizen security efforts in the district of San Juan Bautista, Maynas province in Loreto department. Actually, the mobile networks in the district have a limited footprint restricted to the surrounding zone of the Iquitos-Nauta highway and the public areas at the Francisco Secada Vignetta international airport.

The proposed design's scope includes the deployment of 6 eNodesb and a LTE core. The solution offers a geographic coverage of 100% of the inhabited area with throughput rates of 57.6 Mbps for uplink and 356 Mbps for downlink.

Keywords: LTE; Video; IP; eNodeb; Coverage; Transmission; Communications.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Tema y título	1
1.1.1	Tema.....	1
1.1.2	Título del proyecto	1
1.2	Introducción y Motivación del tema	1
1.3	Organización objetivo	3
1.4	Campo de acción en la organización objetivo.....	5
1.5	Situación problemática y problemas en el campo de acción.....	7
1.5.1	Situación problemática.....	7
1.5.2	Problema a resolver.....	10
1.6	Objetivos del proyecto general y específicos.....	11
1.6.1	Objetivo general	11
1.6.2	Objetivos específicos	11
1.7	Indicadores o mecanismos del logro de los objetivos.....	12
1.8	Justificación del proyecto.....	13
1.9	Estado del arte	14
1.9.1	Antecedentes de la tecnología LTE.....	14
1.9.2	La tecnología LTE.....	16
1.9.3	Las nuevas ideas y las futuras redes de quinta generación	20
1.9.4	La actualidad de las redes LTE en el Perú	22
1.9.5	Casos de uso de LTE para transmisión de video ip en el mundo.....	25
2.	MARCO TEÓRICO.....	26
2.1	Tecnología LTE	26
2.1.1	Arquitectura de red 3GPP	26
2.1.1.1	Equipo del usuario	27
2.1.1.2	Red de acceso	27

2.1.1.3 Red de core	28
2.1.1.3.1 Dominio CS	28
2.1.1.3.2 Dominio PS	29
2.1.2 Evolución de UTRAN a E-UTRAN	31
2.1.2.1 Mobility management entity (MME)	33
2.1.2.2 Serving gateway o S-GW	34
2.1.2.3 Packet data network (PDN) gateway o P-GW	35
2.1.2.4 Policy control rules function o PCRF.....	36
2.1.2.5 Home subscriber server o HSS.....	37
2.1.3 TDD y FDD	38
2.1.4 OFDMA	40
2.1.5 SC – FDMA	41
2.1.6 MIMO	42
2.1.7 Estructura de tramas LTE.....	43
2.1.8 Ancho de banda de transmisión	44
2.1.9 Cálculo de la cobertura del eNodoB	45
2.2 Video vigilancia	46
2.3 Protocolo IP.....	46
2.3.1 Estructura del paquete IP	46
2.3.2 Direccionamiento IP.....	48
2.4 Video vigilancia IP.....	49
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	50
3.1 Procedimiento de corroboración de falta de cobertura móvil	54
3.2 Selección de los puntos de muestra.....	54
3.2.1 Disposición geográfica de las cámaras del sistema de video vigilancia	54
3.2.2 Ubicación de los puntos de muestra.....	64
3.2.3 Perfil de los lugares de muestra	65
3.2.4 Análisis de las muestras	82
3.2.5 Conclusiones del análisis de las muestras	89

3.2.5.1 Validación del problema.....	89
3.2.5.2 Definición del requerimiento para la solución	89
4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	92
4.1 Sistema de video vigilancia IP	92
4.1.1 Selección de elementos para el sistema de video vigilancia	92
4.1.1.1 Cámaras IP.....	92
4.1.1.2 Servidor de video y streaming.....	97
4.1.1.3 Sistema de almacenamiento y storage	99
4.2 Sistema de transmisión LTE	100
4.2.1 Banda de operación	100
4.2.2 Elección del esquema de modulación para la interfaz aire	101
4.2.3 Elección de los componentes del sistema de transmisión LTE	102
4.2.3.1 Infraestructura de core y acceso LTE	102
4.2.3.2 Descripción de los componentes de la solución de core y acceso LTE	108
4.2.3.2.1 Micro core network o MCN	108
4.2.3.2.2 eNodoB Flexi Multi Radio 10 BTS	109
4.2.3.2.3 UE – Alcatel one touch W800.....	113
4.2.3.3 Ubicación de los eNodosB	115
4.3 Análisis de costos	118
4.3.1 Capex del proyecto.....	119
4.3.1.1 Costos del sistema de video vigilancia ip.....	119
4.3.1.1.1 Costos del equipamiento.....	119
4.3.1.1.2 Costos de servicios del sistema de video vigilancia	120
4.3.1.2 Costos del sistema de transmisión LTE.....	120
4.3.1.2.1 Costos de servicios del sistema de transmisión LTE.....	121
4.3.2 OPEX del proyecto	121
4.3.2.1 OPEX de la oficina de gestión del proyecto.....	122
4.3.2.2 OPEX de la solución completa.....	122
4.3.3 Resumen de costos de la solución.....	123

5. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA	124
5.1 Descripción de los métodos de validación a ejecutar.....	124
5.1.1 Cálculo de throughput para el sistema de video vigilancia ip.....	124
5.1.2 Cálculo de potencias, cobertura y throughput del sistema de transmisión lte	125
5.2 Ejecución de los procedimientos de validación	127
5.2.1 Cálculos para el sistema de video vigilancia IP	127
5.2.1.1 Cálculo de throughput de una cámara IP	127
5.2.1.2 Cálculo del throughput para los ue de los patrulleros	128
5.2.1.3 Cálculo del throughput para el gestor de video	129
5.2.1.4 Resumen del sistema de video vigilancia ip y cumplimiento con los indicadores....	130
5.2.2 Cálculos para el sistema de transmisión LTE	131
5.2.2.1 Cálculos teóricos de cobertura.....	131
5.2.2.1.1 Link budget de UPLINK	133
5.2.2.1.2 Link budget de DOWNLINK	135
5.2.2.1.3 Área teórica de cobertura del eNodoB	136
5.2.2.2 Análisis del perfil de radiación del sistema de transmisión LTE	139
5.2.2.3 Cálculos de throughput por eNodoB	145
5.2.2.3.1 Cálculos de throughput de UPLINK	145
5.2.2.3.2 Cálculos de throughput de DOWNLINK	154
5.2.2.4 Resumen del sistema de transmisión LTE y cumplimiento con los indicadores.....	156
CONCLUSIONES.....	157
RECOMENDACIONES	158
LISTA DE ABREVIATURAS.....	159
BIBLIOGRAFÍA	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Victimización en el distrito de San Juan Bautista</i>	2
Tabla 2	<i>Descripción de las zonas del distrito</i>	7
Tabla 3	<i>Datos demográficos del distrito</i>	9
Tabla 4	<i>Objetivos e indicadores del proyecto</i>	12
Tabla 5	<i>Frecuencias permitidas para los sistemas LTE</i>	18
Tabla 6	<i>Distribución de bandas del espectro radioeléctrico para comunicaciones móviles en el Perú</i>	22
Tabla 7	<i>Cantidad de usuarios por tecnología</i>	24
Tabla 8	<i>Anchos de banda de canal</i>	44
Tabla 9	<i>Resumen de cámaras por tipo y por zona</i>	63
Tabla 10	<i>Ubicación de los puntos de muestra</i>	64
Tabla 11	<i>Muestras obtenidas en cada lugar</i>	86
Tabla 12	<i>Throughput de cámara tipo fija</i>	87
Tabla 13	<i>Throughput de cámara tipo PTZ</i>	87
Tabla 14	<i>Consumo de Throughput y memoria de las cámaras</i>	88
Tabla 15	<i>Consumo de Throughput y memoria del sistema completo</i>	88
Tabla 16	<i>Requerimientos de la solución</i>	91
Tabla 17	<i>Alternativas de cámaras fijas para la solución de video vigilancia</i>	93
Tabla 18	<i>Alternativas de cámaras PTZ para la solución de video vigilancia</i>	93
Tabla 19	<i>Consumo de ancho de throughput de las cámaras fijas</i>	95
Tabla 20	<i>Consumo de throughput de las cámaras PTZ</i>	95
Tabla 21	<i>Consumo de throughput de todo el sistema de cámaras</i>	96
Tabla 22	<i>Consumo de energía por tipo de cámara</i>	96
Tabla 23	<i>Resumen de componentes de la solución de video vigilancia</i>	99
Tabla 24	<i>Requerimientos generales de la capa de core</i>	103
Tabla 25	<i>Requerimientos generales de la capa de acceso</i>	104
Tabla 26	<i>Capa de core</i>	105

Tabla 27 <i>Capa de acceso o RAN</i>	105
Tabla 28 <i>Capa de administración u OAM</i>	106
Tabla 29 <i>Especificaciones del UE Alcatel One Touch W800</i>	114
Tabla 30 <i>Especificaciones del eNodoB Flexi Multiradio 10 BTS</i>	115
Tabla 31 <i>Ubicación tentativa de los eNodosB</i>	116
Tabla 32 <i>Costos del equipamiento de video vigilancia</i>	119
Tabla 33 <i>Costos de servicios para el sistema de video vigilancia</i>	120
Tabla 34 <i>Costos del equipamiento LTE</i>	120
Tabla 35 <i>Costos de servicios del sistema LTE</i>	121
Tabla 36 <i>OPEX de la PMO</i>	122
Tabla 37 <i>OPEX de la solución completa</i>	122
Tabla 38 <i>Resumen de costos de la solución completa</i>	123
Tabla 39 <i>Cumplimiento de objetivos relacionados con el sistema de video vigilancia IP</i>	130
Tabla 40 <i>Margen de shadowing normalizado</i>	131
Tabla 41 <i>Valores de SINR para modulación 16QAM</i>	132
Tabla 42 <i>Link Budget de UPLINK</i>	134
Tabla 43 <i>Link Budget de DOWNLINK</i>	135
Tabla 44 <i>Datos totales de cobertura por eNodoB</i>	137
Tabla 45 <i>Cumplimiento de objetivos relativos al sistema de transmisión LTE</i>	156

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Diagrama de la solución propuesta	3
<i>Figura 2.</i> Mapa del distrito de San Juan Bautista dentro de la ciudad de Iquitos.	4
<i>Figura 3.</i> Zonificación del distrito de San Juan Bautista	6
<i>Figura 4.</i> Perímetro del distrito de San Juan Bautista	8
<i>Figura 5.</i> Familia de interfaces reconocidas por el IMT-2000.....	17
<i>Figura 6.</i> Visión de IMT Advanced	19
<i>Figura 7.</i> Crecimiento año por año del consumo de datos móviles	21
<i>Figura 8.</i> Velocidades de los operadores móviles en el Perú para redes LTE	23
<i>Figura 9.</i> Arquitectura básica de redes CS y PS según 3GPP.....	28
<i>Figura 10.</i> Arquitectura de red UMTS	30
<i>Figura 11.</i> Evolución de UTRAN a E-UTRAN.....	32
<i>Figura 12.</i> Arquitectura general LTE.....	38
<i>Figura 13.</i> Comparación de TDD vs FDD	39
<i>Figura 14.</i> Diferencias entre FDM y OFDM	40
<i>Figura 15.</i> Diferencias entre OFDMA y SC-FDMA	41
<i>Figura 16.</i> Diagrama de bloques de un sistema MIMO	42
<i>Figura 17.</i> Esquema de un Resource Block	43
<i>Figura 18.</i> Comparación entre ancho de banda del canal y ancho de banda de transmisión. ...	45
<i>Figura 19.</i> Composición del paquete IP	47
<i>Figura 20.</i> Componentes de una red de video vigilancia IP	49
<i>Figura 21.</i> Cobertura del operador BITEL en el distrito de San Juan Bautista	50
<i>Figura 22.</i> Cobertura del operador ENTEL en el distrito de San Juan Bautista	51
<i>Figura 23.</i> Cobertura del operador CLARO en el distrito de San Juan Bautista	52
<i>Figura 24.</i> Cobertura del operador MOVISTAR en el distrito de San Juan Bautista.....	53
<i>Figura 25.</i> Zonificación del distrito de San Juan Bautista	55
<i>Figura 26.</i> Distribución de cámaras en la zona 1	56
<i>Figura 27.</i> Distribución de cámaras en la zona 2	57

<i>Figura 28. Distribución de cámaras en la zona 3</i>	<i>58</i>
<i>Figura 29. Distribución de cámaras en la zona 4</i>	<i>59</i>
<i>Figura 30. Distribución de cámaras en la zona 5</i>	<i>60</i>
<i>Figura 31. Distribución de cámaras en la zona 6</i>	<i>61</i>
<i>Figura 32. Distribución de cámaras en la zona 7</i>	<i>62</i>
<i>Figura 33. Ubicación de los puntos de muestra en el mapa.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 34. Ubicación del lugar Margaritas</i>	<i>66</i>
<i>Figura 35. Foto del lugar Margaritas</i>	<i>67</i>
<i>Figura 36. Ubicación del lugar Otorongo</i>	<i>68</i>
<i>Figura 37. Foto del lugar Otorongo</i>	<i>69</i>
<i>Figura 38. Ubicación del lugar Parque Modelo</i>	<i>70</i>
<i>Figura 39. Foto del lugar Parque Modelo</i>	<i>71</i>
<i>Figura 40. Ubicación del lugar Salud Progreso</i>	<i>72</i>
<i>Figura 41. Foto del lugar Salud Progreso</i>	<i>73</i>
<i>Figura 42. Ubicación del lugar Monte de Dios.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 43. Foto del lugar Monte de Dios</i>	<i>75</i>
<i>Figura 44. Ubicación del lugar Ultramarinos</i>	<i>76</i>
<i>Figura 45. Foto del lugar Ultramarinos</i>	<i>77</i>
<i>Figura 46. Ubicación del lugar Aeropuerto</i>	<i>78</i>
<i>Figura 47. Foto del lugar Aeropuerto</i>	<i>79</i>
<i>Figura 48. Ubicación del lugar Participación</i>	<i>80</i>
<i>Figura 49. Foto del lugar Participación</i>	<i>81</i>
<i>Figura 50. Muestra del lugar Margaritas con operador BITEL</i>	<i>82</i>
<i>Figura 51. Muestra del lugar Margaritas con operador ENTEL.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 52. Muestra del lugar Margaritas con operador MOVISTAR.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 53. Muestra del lugar Margaritas con operador CLARO</i>	<i>85</i>
<i>Figura 54. Arquitectura de la red LTE de la municipalidad</i>	<i>107</i>
<i>Figura 55. Arquitectura del MCN.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 56. Ubicación tentativa de los eNodosB en el mapa del distrito</i>	<i>117</i>

<i>Figura 57. Área de cobertura de cada celda.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 58. Interfaz inicial de Xirio</i>	<i>139</i>
<i>Figura 59. Parámetros de entrada de Xirio</i>	<i>141</i>
<i>Figura 60. Celdas y sectores creados en Xirio.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 61. Menú para la activación del cálculo de radiación de Xirio</i>	<i>143</i>
<i>Figura 62. Diagrama de cobertura de los eNodosB</i>	<i>144</i>
<i>Figura 63. Throughput instantáneo bajo la cobertura del eNodoB.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 64. Mapa con distribución de celdas y cámaras</i>	<i>147</i>
<i>Figura 65. Cobertura de la celda 1</i>	<i>148</i>
<i>Figura 66. Cobertura de la celda 2</i>	<i>149</i>
<i>Figura 67. Cobertura de la celda 3</i>	<i>150</i>
<i>Figura 68. Cobertura de la celda 4</i>	<i>151</i>
<i>Figura 69. Cobertura de la celda 5</i>	<i>152</i>
<i>Figura 70. Cobertura de la celda 6</i>	<i>153</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Tema y título

1.1.1 Tema

Diseño de una red LTE para el transporte de video IP

1.1.2 Título del proyecto

DISEÑO DE UNA RED LTE ESCALABLE PARA LA TRANSMISIÓN DE VIDEO IP
APLICADO A LA SEGURIDAD CIUDADANA

1.2 Introducción y Motivación del tema

En los últimos tiempos la seguridad ciudadana es un tema que preocupa a la población en general, más aún en aquellos sectores donde hay poca presencia policial o de agentes de seguridad. Ante esto, las municipalidades distritales y provinciales afrontan el problema asignando recursos para tareas de vigilancia ciudadana o incluso organizando a la propia población para tener comités de autodefensa. Sin embargo, sin una adecuada distribución de los recursos, las acciones que se toman resultan no tener el efecto esperado. En la selva norte del Perú, como parte de la provincia de Maynas y contiguo a su capital Iquitos, se encuentra el distrito de San Juan Bautista. Este distrito presenta altos índices de accidentes, robo a viviendas y robo a peatones. Las acciones correctivas que tomó el municipio no son suficientes pues existe un desbalance entre los recursos con los que cuenta la municipalidad y el número de pobladores, así como una inadecuada cobertura geográfica de los servicios de seguridad ciudadana. La tabla 1 nos muestra la distribución de victimización de acuerdo con las distintas categorías de delitos ocurridos en el año 2011 según la última encuesta realizada por la entidad Ciudad Nuestra, bajo encargo de la municipalidad.

Tabla 1
Victimización en el distrito de San Juan Bautista

RESPUESTAS	TOTAL %
Robo en vivienda o local	46.9
Robo al paso	21.0
Robo de vehículo	8.6
Fraude o estafa	6.2
Atraco	4.9
Amenazas o intimidaciones	3.7
Robo de objetos, autopartes o accesorios de su vehículo	3.7
Robo en cajeros	1.2

Nota: Datos obtenidos de la encuesta Ciudad Nuestra. 2011

La motivación para realizar el presente proyecto es establecer una red móvil escalable, basada en tecnología LTE, sobre la cual se desarrolle una aplicación de transmisión de imágenes en tiempo real provenientes de cámaras de video vigilancia dispuestas a lo largo y ancho del distrito. LTE surge con las necesidades de tener una red móvil que permita reducir los costos operativos de sus propietarios, alcanzar altas velocidades de transmisión y orientar la red al transporte de paquetes IP. En el caso de este proyecto, el video que será transmitido estará precisamente en formato IP por lo que, aprovechando los 1000 Mbps de Downlink y 500 Mbps de Uplink, máximo y mínimo teóricos que ofrece una red LTE por cada usuario o equipo conectado a la red, será posible la transmisión de video en alta definición¹.

El distrito de San Juan Bautista no presenta zonas pobladas con edificaciones altas y los materiales de construcción utilizados en las viviendas facilitan la propagación de las ondas electromagnéticas. Esto sumado al hecho de que LTE hace uso de la técnica de modulación 64QAM, accede al medio basado en la técnica de OFDMA y trabaja en anchos de banda que llegan hasta los 20 MHz, nos permite obtener grandes tasas de datos que harán de la red propuesta una red escalable con capacidad de soportar la expansión del servicio de video

¹ 3GPP 2018: 1

vigilancia, así como la adición de nuevas aplicaciones orientadas a la seguridad ciudadana. Como toda red celular, la cobertura que esta red ofrecerá depende principalmente de la banda de frecuencia en la que trabajará el sistema, de las pérdidas que existen en el medio, la altura de las antenas y la altura de las construcciones. La intención del presente proyecto es abarcar el 100% de la zona habitada de modo que los servicios de video vigilancia estén accesibles para toda la población del distrito, La figura 1 nos muestra un diagrama básico de la solución que se propone en el presente trabajo.

Figura 1. Diagrama de la solución propuesta

1.3 Organización objetivo

La organización que se beneficiará del presente proyecto es la municipalidad del distrito de San Juan Bautista. Esta entidad es responsable de la administración de los recursos que hacen posible el bienestar de los casi 165 000 vecinos así como de los visitantes a sus centros recreacionales y al aeropuerto internacional ubicado en su territorio. El área bajo la

jurisdicción distrital al año 2018 abarca 19.85 Km² con una altitud promedio sobre el nivel del mar de 134 m. El distrito de San Juan Bautista se encuentra inmediatamente después de la ciudad de Iquitos entre los Km 0 y 5 de la carretera Iquitos-Nauta. Hacia el Norte limita con el río Nanay, hacia el Oeste con la zona de Pampa Chica y el distrito de Belén que son parte de la ciudad de Iquitos. Hacia el Sur limita con el río Itaya y hacia el Oeste con el cacerío de Santo Tomás. La figura 2 nos muestra un mapa del distrito.

Figura 2. Mapa del distrito de San Juan Bautista dentro de la ciudad de Iquitos.

Elaboración propia basada en: Google 2018.

Cabe resaltar que dentro del territorio que abarca el distrito de San Juan Bautista se encuentran las instalaciones del aeropuerto internacional Francisco Secada Vignetta, el cual es el principal punto de conexión de la provincia de Maynas con el resto del país, por ello su gran importancia. A continuación, se presentan la misión y visión de la organización objetivo del presente proyecto.

Visión: Asumiendo al ser humano como el objetivo y el actor principal del desarrollo: Al 2015 el distrito de San Juan Bautista, cuenta con una población que asume y practica valores; y sus capacidades integrales están fortalecidas. Además, es un importante eje comercial, industrial y turístico. Las actividades que se realizan en el territorio aprovechan sus recursos de manera sostenible y las instituciones están fortalecidas para la práctica de la ciudadanía plena, con equidad de género, liderazgos éticos y democráticos, en marco de una cultura de paz.

Misión: Brindar un servicio eficiente, con personal calificado e idóneo, con vocación de servicio; para contribuir a mejorar las condiciones de vida de los vecinos y vecinas del distrito, así como velar por la adecuada prestación de los servicios públicos, contribuyendo a ser una municipalidad autogestionaria.

Dentro de la estructura organizacional distrital la seguridad ciudadana está a cargo de la Gerencia de Operaciones y Servicios².

1.4 Campo de acción en la organización objetivo

La Gerencia de Operaciones y Servicios de la municipalidad distrital de San Juan Bautista tiene entre sus principales tareas la planificación, organización y supervisión de la seguridad ciudadana, salubridad, abastecimiento y comercio. Para brindar estos servicios, la gerencia cuenta con 11 patrulleros, 25 motocicletas y 88 agentes de serenazgo. El ámbito de acción de esta gerencia es la zona habitada del distrito, el cual se conecta con el distrito contiguo de Iquitos mediante la carretera Iquitos-Nauta.

Para entender geográficamente el alcance de la gerencia de operaciones y servicios de la municipalidad de San Juan Bautista se presenta el siguiente mapa del distrito considerando una división en zonas.

² Municipalidad Distrital de San Juan Bautista 2014: 18.

Figura 3. Zonificación del distrito de San Juan Bautista

Elaboración propia basada en: Google 2018.

Cada zona ha sido escogida de acuerdo con factores como su ubicación respecto del mapa total del distrito, cercanía a avenidas e intersecciones principales, densidad de viviendas y al nivel de rigidez de seguridad ciudadana requerido por cada una de ellas.

A partir del mapa anterior, se prepara la tabla 2 en la que se aprecia el detalle de casa una de estas zonas.

Tabla 2
Descripción de las zonas del distrito

ZONA A	Aeropuerto Internacional Francisco Secada Vignetta.
ZONA E	Zona de bosques.
ZONAS 1 Y 2	Ubicadas al Suroeste del distrito, son las que presentan problemas de Trata de personas con fines de explotación Infantil y prostitución.
ZONAS 3 Y 4	Estas zonas son las que definen el centro del distrito y están compuestas mayormente por casas de campo, clubes y zonas residenciales. Se ubican en la parte central del distrito.
ZONA 5	Ubicada al Nor-Oeste del distrito, esta zona rural presenta problemas de dificultad de acceso para los agentes de seguridad y deficiencias en el alumbrado público, sin embargo, la densidad demográfica es la más baja del distrito.
ZONA 6	Esta zona limita con el distrito de Iquitos y es la parte más alta del distrito, en la zona 6 se encuentran las villas militares del ejército y la fuerza aérea, así como 2 universidades locales.
ZONA 7	Esta zona limita con el distrito de Belén y es la que presenta mayor cantidad de casos de robos

1.5 Situación problemática y problemas en el campo de acción

1.5.1 Situación problemática

La rápida expansión urbana y la ubicación geográfica del distrito de San Juan Bautista son los primeros aspectos que se deben analizar a fin de entender la falta de cobertura de las redes móviles y la problemática de la seguridad ciudadana. Tal como se muestra en la figura 3, el distrito de San Juan Bautista tiene presencia de zonas boscosas que en algunos casos separan las zonas residenciales, esto es producto de la expansión urbana y la velocidad a la que se viene dando cercana al 10% anual³. Esta situación afecta la planificación de redes móviles debido a que la cantidad de usuarios aumenta constantemente y las zonas en donde se

³ Municipalidad Distrital de San Juan Bautista 2009: 10.

encuentran son dispersas. Adicionalmente, debido a que no existe un sistema de video vigilancia, muchas de las zonas son de alta inseguridad por el difícil acceso para las labores de patrullaje y en general, para la prestación de servicios de seguridad ciudadana.

Actualmente, las redes móviles 2G, 3G o LTE de los operadores Movistar, Claro, Entel y Bitel solo están presentes a lo largo de la carretera José Abelardo Quiñones⁴, también conocida como carretera Iquitos – Nauta, y en el área que ocupa el aeropuerto. No hay cobertura de redes móviles 4G, 3G o 2G en puntos ubicados más allá de los 100m de distancia de la carretera. Es entonces evidente que gran parte del territorio del distrito de San Juan Bautista carece de conectividad a través de redes celulares. Sin embargo, el distrito si cuenta con el despliegue de redes de transporte óptico e IP-MPLS por lo que el backhaul para redes móviles se encuentra garantizado.

Figura 4. Perímetro del distrito de San Juan Bautista

Elaboración propia basada en: Google 2018.

⁴ Nperf.com 2018.

Tomando en cuenta la ubicación del distrito y para tener una idea de qué proporción de la población se encuentra en zonas alejadas o rurales es necesario conocer sus características demográficas y su relación con la superficie que abarca el distrito.

Tabla 3
Datos demográficos del distrito

Parámetro	San Juan Bautista
Población	164 696 hab.
Población urbana	76.38%
Población Rural	23.62%
Superficie	19.85 Km ²

Nota: Elaboración propia basada en Comité Provincial de Seguridad de Maynas 2017.

Se puede observar que la densidad demográfica del distrito de San Juan Bautista es de 8297 habitantes por Km², en comparación con un distrito de una ciudad grande como es el distrito de Los olivos⁵ en Lima con un área de 18 Km² y una densidad de 20 286 habitantes por Km², se puede uno dar cuenta de que una gran parte del área del distrito es inhabitada. Esto se debe a que muchas viviendas en San Juan son casas de campo que ocupan grandes áreas. Se evidencia además que la mayor parte de la población habita en zonas urbanas, sin embargo, casi cuarenta mil personas aún viven en zonas rurales y alejadas de la carretera, las cuales carecen absolutamente de conectividad a redes fijas o móviles y son además las más afectadas por el fenómeno de la criminalidad ya que por lo general, las zonas donde habitan son de difícil acceso y donde hay poca o nula capacidad de vigilancia.

El desequilibrio entre el número de habitantes y los recursos para brindar servicios de seguridad ciudadana puede ser consecuencia de una mala asignación de presupuestos. Tal como muestra el presupuesto del año 2017 se asignó a la seguridad ciudadana S/.

⁵ Lima Cómo Vamos 2015: 3

1'483,396.00⁶. Salta a la vista que aproximadamente por cada poblador del distrito se asigna anualmente S/. 9.00 para la seguridad ciudadana, quedando en evidencia un peligroso desbalance.

El presupuesto en seguridad para el año 2017 resultó ser muy bajo para un distrito en el cual se encuentran entre otros puntos importantes, el aeropuerto principal de la región y el centro de esparcimiento más grande de la zona. Para poder darse cuenta de la deficiente asignación de recursos, se puede comparar el Distrito de San Juan Bautista, por ejemplo, con la ciudad de Yurimaguas que el año 2014 destinó 4 millones de soles para brindar el renovado servicio de seguridad ciudadana a sus 70 000 habitantes⁷. Quizá esta diferencia puede deberse a que Yurimaguas es una capital provincial, sin embargo, desde el punto de vista demográfico, el presupuesto asignado en San Juan es excesivamente bajo y no permite abastecerse de infraestructura ni personal adecuado.

1.5.2 Problema a resolver

El problema a resolver es el siguiente:

- No se cuenta con un sistema de transmisión escalable que permita el transporte de video IP en tiempo real para mejorar los servicios de seguridad ciudadana.

⁶ Comité Distrital de Seguridad Ciudadana de San Juan Bautista 2017:33

⁷ Municipalidad Provincial del Alto Amazonas 2014:83.

⁸ Roriente.org 2014.

1.6 Objetivos del proyecto general y específicos

1.6.1 Objetivo general

Diseño de una red escalable de transmisión LTE de acuerdo con el estándar 3GPP, para el transporte de video IP en tiempo real aplicada a la mejora de los servicios de seguridad ciudadana del distrito de San Juan Bautista.

1.6.2 Objetivos específicos

- Dimensionar los requerimientos de throughput de la plataforma de transmisión LTE en función del tráfico generado por video IP en calidad HD a 720p.
- Asegurar que la plataforma de transmisión LTE tenga throughput suficiente a fin de ser escalable para soportar futuros servicios asociados con la seguridad ciudadana del distrito.
- Garantizar que las características de throughput de la red de transporte LTE permitirán la transmisión
- Garantizar que las características de cobertura de la red de transporte LTE permitirán la transmisión

1.7 Indicadores o mecanismos del logro de los objetivos

Tabla 4

Objetivos e indicadores del proyecto

Objetivo Específico	Requerimientos Asociados	Métrica
Dimensionar los requerimientos de Throughput de la plataforma de video IP para transmisión de imágenes en HD a 720p.	El Throughput de uplink para cada cámara, independientemente del tipo, deberá ser de 1.49 Mbps como mínimo para soportar calidad 720p y de 50 Mbps como máximo para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP.	Mbps
	El Throughput de downlink de los UE LTE que estarán instalados en los patrulleros deberá ser como mínimo de 5.96 Mbps para soportar la visualización simultánea de hasta 4 streamings provenientes de 4 cámaras IP y como máximo de 450 Mbps para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP.	Mbps
	El Throughput de downlink requerido por el gestor de video deberá ser menor a 450 Mbps de acuerdo con el estándar 3GPP.	Mbps
Asegurar que la plataforma de transmisión LTE tenga Throughput suficiente a fin de ser escalable para soportar futuros servicios asociados con la seguridad ciudadana del distrito.	El Throughput de downlink disponible para futuros servicios deberá ser mayor a 50 Mbps	Mbps
Garantizar que las características de Throughput de la red de transporte LTE permitirán la transmisión del video IP en tiempo real	Los Throughput de uplink y downlink de un eNb deberán ser menores a 50 y 450 Mbps respectivamente para cumplir con el estándar 3GPP.	Mbps
	Los Throughput de uplink y downlink de un eNb deberán ser mayores a 29.8 y 23.84 Mbps respectivamente para soportar, en el peor de los casos, las imágenes recibidas de las cámaras IP y servir a los patrulleros.	Mbps
Garantizar que las características de ancho de cobertura de la red de transporte LTE permitirán la transmisión del video IP en tiempo real	El rango de cobertura de cada eNb deberá ser mayor a 1 Km ² y menor a 4 Km ² con el fin de tener una mejor administración de las celdas.	Km ²
	La cantidad de eNb requeridos deberá ser mayor o igual a 6 y menor a 25	Cantidad de eNb

1.8 Justificación del proyecto

Lo que se logrará con la red propuesta será garantizar una cobertura del 100% para el servicio de video vigilancia IP mediante un arreglo de celdas 4G que permitirán transmitir, hacia el centro de control de seguridad municipal, las imágenes en tiempo real captadas por cámaras dispuestas en lugares estratégicos dentro de la zona urbana. Así mismo permitirá tener disponibilidad del video en tiempo real dentro de los patrulleros municipales y mediante un sistema de gestión del video, tomar acción antes de que los incidentes generen consecuencias adversas a la población y sus bienes muebles e inmuebles.

El valor adicional que ofrece la solución de transmisión LTE a la municipalidad distrital de San Juan Bautista, se sustenta en los siguientes puntos:

- La escalabilidad que la solución ofrece permitirá a la municipalidad estar preparada para futuras aplicaciones como las siguientes:
 - Comunicación de datos y de voz entre la municipalidad y los colegios del distrito para mantener un monitoreo de la seguridad interna de las entidades.
 - Comunicación de voz con entidades de salud, defensa civil, bomberos y policía para la rápida coordinación de la atención de heridos ante incidentes.
 - Interconexión de datos con las comisarías para sincronización de bases de datos de criminalidad.
 - Red privada de comunicación de datos y voz para funcionarios de la municipalidad a fin de reducir los costos operativos.
- La solución propuesta permitirá la reducción de costos operativos propios de la seguridad ciudadana ya que teniendo visibilidad en tiempo real de todo lo que acontece en el distrito, la movilización de recursos será más eficiente significando esto ahorro de tiempo, logística y combustible

- Se reducirá la huella de carbono al tener un desplazamiento de unidades móviles controlado.
- Se podrá generar un modelo de negocio basado en la renta de la infraestructura a los operadores móviles.

1.9 Estado del arte

1.9.1 Antecedentes de la tecnología LTE

Las redes de comunicaciones celulares han evolucionado a lo largo del tiempo comenzando desde redes análogas que solo podían transmitir señales de voz hasta las redes actuales donde la ubicuidad de los datos es una realidad. Para comprender una red de comunicación LTE o de cuarta generación, es importante hacer un repaso de los antiguos estándares de comunicación generación por generación hasta tener el panorama completo de los antecedentes a esta tecnología.

La primera generación de redes móviles basadas en el arreglo de celdas tuvo origen a inicios de la década de los ochentas⁹. No se trató de un estándar de comunicaciones móviles sino de esfuerzos en paralelo de varios fabricantes de tecnología que se dieron lugar en regiones diferentes del mundo. Estas redes operaban en las bandas de 450, 800 y 900 MHz y hacían uso de anchos de banda de entre 25 y 30 KHz llegando a velocidades de transferencia de 19.2 Kbps¹⁰. Debido a las bajas velocidades que ofrecían, la única aplicación de estas redes era el transporte de voz. Las redes de primera generación más importantes fueron Hicap, desarrollada por Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en Japón, que fue la primera en introducir la técnica de acceso al medio por división de frecuencia (FDMA) el Advanced Mobile Phone System (AMPS) desarrollado por los laboratorios Bell y que fue primero

⁹ Al Agha 2016: 23.

¹⁰ Zheng, Peterson, Davie 2004: 104.

utilizado en los Estados Unidos y luego extendido Europa y Japón. Cabe resaltar que esta tecnología introdujo el concepto de Handover.

La segunda generación de redes celulares tampoco es marcada por un estándar en las telecomunicaciones sino que simplemente respondió a una mayor demanda de usuarios conectados a la red y a la implementación de nuevas aplicaciones como el Short Message Service (SMS) y la transferencia de archivos vía fax. Estas exigencias promovieron la digitalización de las redes celulares siendo necesaria la creación de protocolos de comunicación digital por parte de los fabricantes. Esto significó un problema pues los protocolos no eran compatibles entre sí con lo cual los usuarios estaban limitados al área de cobertura que cada compañía tenía desplegada con sus propias redes. Las redes 2G hacen uso de las bandas de 850, 900, 1800 y 1900 MHz con anchos de banda de canal de 45 KHz Duplex utilizando la técnica de acceso al medio por división de tiempo (TDMA)¹¹. La tecnología que dio inicio a las redes 2G tal como las conocemos fue Global System for Mobile Communications (GSM) desarrollada por el comité del Groupé Spécial Mobile de Europa, esta inició operaciones en el año 1992 con redes en la banda de 900 MHz.

GSM ofrecía una tasa de transferencia máxima de 14.4 Kbps las cuales fueron quedando rápidamente insuficientes por la cantidad de usuarios que empezó a utilizar redes móviles para comunicarse. Este aumento en la demanda también propuso el desafío de brindar mayores niveles de velocidad, tal es así que la European Telecommunications Standards Institute (ETSI) desarrolló un estándar que suponía la mejora sobre la arquitectura de la red GSM en la que se separaba la voz de los datos y a cada uno se le encaminaba por rutas diferentes. Esta tecnología se llamó General Packet Radio Service (GPRS). Las velocidades que se alcanzaron con GPRS fueron de 115 Kbps utilizando canales de 200 KHz¹². Los usuarios siguieron aumentando a inicios del nuevo siglo y con ello, una mayor capacidad para soportar nuevas aplicaciones y velocidades se hizo urgente. El mismo equipo que desarrolló GSM trabajó

¹¹ Narang 2007: 4.

¹² Narang 2004: 5.

sobre la base de GPRS y en el año 2003 liberó la tecnología Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) que alcanza los 236.8 Kbps haciendo uso de un esquema de modulación 8PSK¹³.

La tercera generación de redes de comunicaciones móviles llegó gracias a la unión de varias asociaciones de telecomunicaciones a nivel mundial en un solo ente centralizado en las oficinas de la ETSI y denominado 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Este grupo trabajó en mejoras sobre el estándar GSM en el marco de un proyecto promovido por la International Telecommunications Union (ITU) para la mejora de la performance de redes celulares en el año 2000. Las redes 3G definen nuevos segmentos del espectro para su operación: 700, 1500, 1700, 2100 y 2600 MHz se agregan a las porciones de espectro pre-existentes de las redes GSM. El estándar propuesto para iniciar las operaciones de las redes 3G fue Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS) la cual utiliza la técnica de acceso al medio por la división de código extendido (W-CDMA) y plantea dos modos de implementación: Duplexación por división de tiempo (TDD) y Duplexación por división de Frecuencia (FDD)¹⁴. UMTS alcanza velocidades desde los 64 Kbps para canales de voz y 384 Kbps para canales de datos en su primera versión o release 99 (R99) hasta los 372 Mbps en su última versión utilizando el protocolo Evolved High Speed Packet Access (HSPA+) definido por la release 7 del estándar 3GPP en el año 2009.

1.9.2 La tecnología LTE

Las redes 3G habían logrado la ubicuidad de la voz permitiendo que los usuarios puedan sostener llamadas telefónicas en cualquier lugar (donde haya cobertura de redes celulares) sin importar si se encuentran en movimiento. El próximo paso exigía permitir a los usuarios tener acceso móvil a datos IP mediante conexiones de alta velocidad y confiabilidad asegurada. La 3GPP aprovechó las bondades de FDD y MIMO definidas en la release 7 del estándar para

¹³ Narang 2004: 6.

¹⁴ Narang 2004: 69.

investigar sobre mejoras sustanciales al sistema que darían origen a la primera versión de LTE. A fines del año 2007 la Unión internacional de telecomunicaciones (ITU) publicó la versión final del documento en que vino trabajando el sub-grupo IMT-2000. Se trataba de un compendio de recomendaciones para el desarrollo de redes móviles que empezó a ser desarrollado desde inicios de aquella década, el resultado fue la Recomendación ITU-R M.1457 la cual definía las interfaces de acceso al medio para cada una de las Organizaciones Desarrolladoras de Estándar (OSD) que tenían implicancia en las redes móviles. En esta recomendación aparece la tecnología de acceso LTE (Long Term Evolution) es reconocida por primera vez como parte de la familia 3GPP al formar parte de la release 8 del estándar en la que se define la Mejora a la arquitectura del sistema de comunicaciones móviles (SAE). En el año 2009, la 3GPP da un paso más allá emitiendo la release 9 del estándar en la que se ofrecen mejoras al SAE y queda LTE completamente definida para su operación¹⁵.

Figura 5. Familia de interfaces reconocidas por el IMT-2000

Fuente: Dahlman. 2011.

¹⁵ Dahlman 2011: 6.

La Tabla 5 Nos muestra las bandas de frecuencia que pueden ser utilizadas para el despliegue de redes LTE. El ancho de banda de cada canal varía desde los 1.4 MHz hasta los 20 MHz¹⁶.

Tabla 5
Frecuencias permitidas para los sistemas LTE

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
	F _{UL_low} – F _{UL_high}	F _{DL_low} – F _{DL_high}	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894MHz	FDD
6 ¹	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
15	Reserved	Reserved	FDD
16	Reserved	Reserved	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz	FDD
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD
...			
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD

NOTE 1: Band 6 is not applicable

Nota: Fuente 3GPP 2009.

¹⁶ 3GPP 2009: 15.

Las tecnologías posteriores a la recomendación ITU-R M.1457 fueron parte de estudio del nuevo sub-grupo de investigación IMT-Advanced. Así, la release 10 de LTE, llamada LTE Advanced, formó parte de las familias reconocidas. Es en este punto, a inicios del año 2011 que se considera LTE una tecnología de cuarta generación o 4G tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Visión de IMT Advanced

Fuente: 3GPP

Las releases 11, 12 y 13 del estándar 3GPP introducen mejoras a la tecnología LTE pero no hay un cambio de gran impacto en cuanto a interfaces o arquitectura. En este punto el avance logrado ha permitido la ubicuidad de los datos IP haciendo posible que cada usuario tenga el servicio de llamadas de voz sea donde sea y también acceso a internet y datos IP sin importar el lugar geográfico. El mayor avance logrado en estas últimas releases es el hecho de que los eNodosb logran velocidades de bajada de hasta 1 Gbps de DL y 500 Mbps UL mediante el uso de acceso basado en MIMO 8x8 para DL, MIMO 4x4 para UL, la técnica de Carrier aggregation, etc. Sin embargo, en la actualidad los fabricantes han llegado como máximo a los 450 Mbps prácticos para DL por lo cual a lo largo del presente trabajo, utilizaremos este valor como el throughput máximo de DL para cualquier sistema. Las ventajas de un sistema de transmisión LTE son:

- Ofrece altas velocidades de transmisión que pueden llegar hasta 450 Mbps de DL y 50 Mbps de UL.
- Es la tecnología de redes móviles más desarrollada y vigente
- El costo de implementación de una red LTE es más bajo que el de otros sistemas de transmisión inalámbrica similares como WIMAX.
- La tecnología LTE se encuentra ya madura en cuanto a especificaciones por parte de la organización 3GPP, esto la hace la red end to end más rápida que se tiene actualmente.

La principal desventaja de un sistema LTE es que los terminales consumen mayor cantidad de energía respecto de terminales de otras tecnologías de acceso inalámbrico como WIFI.

1.9.3 Las nuevas ideas y las futuras redes de quinta generación

La release 14 del estándar 3GPP, publicada a mediados del 2017, define los primeros lineamientos funcionales para el desarrollo de las redes móviles de quinta generación o redes 5G. Si bien hasta el momento todas las tecnologías móviles han estado orientadas a brindar conectividad de las personas a redes de voz y datos, la quinta generación de las redes móviles propone un escenario más ambicioso en el cual las redes estén preparadas para interconectar personas, máquinas y objetos en una red alta velocidad, baja latencia, gran confiabilidad y escalabilidad infinita. 5G va más allá de las comunicaciones y significa una nueva filosofía en la manera en que nos conectamos con el mundo y las cosas, es un cambio de paradigma tal que sienta las bases para el desarrollo de la nueva revolución industrial o Industria 4.0¹⁷ ¹⁸. Los principales motivadores del desarrollo de la tecnología 5G son los siguientes:

¹⁷ Ustandag 2017: 4.

¹⁸ Nokia 2017.

- Para el año 2025 se estiman 50 000 000 000 de objetos conectados a la internet.
- Se necesitan mayores velocidades de conexión inalámbrica del orden de los Gbps.
- Se necesita una red confiable para conectar máquinas de misión crítica.
- Se necesita un ambiente que permita comunicación masiva entre máquinas.
- El consumo de datos se estima que crecerá de 4 Hexabytes en el 2018 a 12 Hexabytes en el 2020.
- Los operadores necesitan incrementar las Ganancias Promedio por Usuario (ARPU)

Figura 7. Crecimiento año por año del consumo de datos móviles

Fuente: Nokia 2018.

La release 15 del estándar 3GPP de Marzo 2018, establece la capa de acceso al medio de las redes 5G la cual podría trabajar haciendo uso de una arquitectura de core 4G, en Junio del mismo año se terminó de definir los aspectos funcionales de la tecnología y en Setiembre se culminó la definición del core 5G con lo que a partir de ese momento se pueden desarrollar las redes 5G de inicio a fin o end to end (E2E). 5G agrega 3 nuevos segmentos del espectro que son las bandas de 3500 MHz, haciendo uso de canales desde los 20 hasta los 100 MHz y alcanzando velocidades de 100 Mbps, la banda de 28 GHz y la banda de 39 GHz, haciendo

uso de canales de hasta 1GHz con velocidades de hasta 10 Gbps con una modulación de 256QAM^{19 20}.

1.9.4 La actualidad de las redes LTE en el Perú

En la actualidad el espectro radioeléctrico en el Perú se encuentra repartido entre los distintos operadores móviles que tienen presencia local. La tabla 6 nos muestra la distribución del espectro y el detalle de las tecnologías que son desplegadas para cada banda.

Tabla 6

Distribución de bandas del espectro radioeléctrico para comunicaciones móviles en el Perú

Banda	Rango de Frecuencias (MHz)		Portadoras	BW del canal	Operador	Tecnología	ALCANCE
	UPLINK	DOWNLINK					
700-A	699 - 716	729 - 746	2	17	ENTEL	LTE	NACIONAL
700-B	777 - 787	746 - 756	2	10	CLARO	LTE	NACIONAL
700-C	788 - 798	758 - 768	2	10	TELEFONICA	LTE	NACIONAL
850-A	824 - 835	869 - 880	2	11	TELEFONICA	2G	NACIONAL
850-A2	845 - 846.5	890 - 891.5	2	1.5	TELEFONICA	3G	NACIONAL
850-B	835 - 845	880 - 890	2	10	CLARO	3G	NACIONAL
850-B2	846.5 - 849	891.5 - 894	2	2.5	CLARO	3G	NACIONAL
900-A	899 - 915	944 - 960	2	16	BITEL	4G	LIMA Y CALLAO
900-B	902 - 915	947 - 960	2	13	BITEL	3G	OTRAS CIUDADES
1700-A	1710 - 1730	2110 - 2130	2	20	TELEFONICA	LTE	NACIONAL
1700-B	1730 - 1750	2130 - 2150	2	20	ENTEL	LTE	NACIONAL
1900-A	1850 - 1865	1930 - 1945	2	15	CLARO	LTE	NACIONAL
1900-D	1865 - 1870	1945 - 1950	2	5	ENTEL	3G	NACIONAL
1900-B	1870 - 1882.5	1950 - 1962.5	2	12.5	TELEFÓNICA	2G	NACIONAL
1900-E	1882.5 - 1895	1962.5 - 1975	2	12.5	ENTEL	2G	NACIONAL
1900-F	1895 - 1897.5	1975 - 1977.5	2	2.5	CLARO	LTE	NACIONAL
1900-C	1897.5 - 1900	1977.5 - 1990	2	12.5	BITEL	3G	NACIONAL

¹⁹ Xiang 2017: 402.

²⁰ ETSI 2018: 14.

Nota: Elaboración propia basada en MTC 2017.

Podemos apreciar que son cuatro los operadores que tienen asignada una porción del espectro en el Perú: Claro del grupo América Móvil, Movistar de Telefónica, Bitel de Viettel Communications y Entel, subsidiaria peruana de Entel Chile. La figura 8 nos muestra las velocidades que ofrecen estos operadores para la tecnología LTE en el Perú.

Figura 8. Velocidades de los operadores móviles en el Perú para redes LTE

Fuente: RPP 2018.

Se extrae de la figura 8 que Movistar y Entel ofrecen las más altas velocidades, sin embargo, el otro factor importante para el usuario a la hora de decidir por cuál de los operadores optar es la disponibilidad de la red. Entel encabeza esta lista alcanzando un 84.6% de disponibilidad²¹, esto puede deberse a que toda la infraestructura de red de Entel es nueva pues desde los tendidos de fibra óptica, hasta las redes móviles que ofrece han sido instaladas a partir de la llegada de este operador al Perú en Agosto del año 2014.

Si bien la tecnología predominante en el mundo actualmente es LTE, aún las redes 2G son utilizadas sobre todo en zonas remotas o con perfiles muy básicos de usuarios. Estos escenarios por lo general solo requieren del tráfico de voz. La tabla 7 nos muestra la cantidad de usuarios por cada una de las tecnologías móviles en el Perú sobre un total de 39 millones de conexiones que existen en la actualidad.

Tabla 7
Cantidad de usuarios por tecnología

Tecnología	Nº de Conexiones (millones)	Porcentaje sobre el total de usuarios
2G	12	31%
3G	18	46%
LTE	9	22%

Nota: Elaboración propia basada en GESTIÓN 2018.

Se puede apreciar que solo el 22% de las conexiones en el Perú son a través de redes LTE, esto se debe principalmente al alto costo que en un inicio tenían los equipos terminales con soporte de esta tecnología y a que la mayor cantidad de terminales que se compran en el Perú siguen siendo básicos para servicios prepago²² los cuales alcanzan un 51% del mercado. Sin embargo, este año 2018 se ha iniciado una explosión de ventas en el mercado de smartphones

²¹ RPP 2018

²² Gestión 2018.

con soporte de LTE, el año 2014 se importaba 1 millón de este tipo de equipos, para fines del año 2018 se estima que la importación llegue a los 10 millones de dispositivos²³.

1.9.5 Casos de uso de LTE para transmisión de video ip en el mundo

La aplicación de redes LTE para aplicaciones de video vigilancia es un tema que recién el año 2018 se empezó a desarrollar. Actualmente solo existe un proyecto a nivel mundial para esta aplicación. Se trata de un trial desplegado en Korea por parte del fabricante Nokia que engloba entre un conjunto más amplio de soluciones el acceso LTE para cámaras de video vigilancia²⁴. Si bien este trial es de una gran envergadura considerando la demografía del país asiático, su extrapolación a países en desarrollo como el Perú es posible y al ser una tecnología tan reciente resulta ideal plantear escenarios de alcance pequeño, como el caso del distrito de San Juan Bautista, para validar su eficiencia y en caso de ser exitoso, poder ampliar esta escala en beneficio de los ciudadanos.

²³ Gestión 2017.

²⁴ Nokia 2018.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Tecnología LTE

LTE fue creada por la 3GPP como evolución a las tecnologías móviles de tercera generación. LTE es una tecnología de transmisión de datos que permite tener altas velocidades de transmisión de datos con una baja latencia²⁵. Para servicios que requieren el tráfico de señales de voz y video y calidad de servicio esta tecnología es la más avanzada en cuanto al acceso masivo inalámbrico. La arquitectura de una red LTE ha evolucionado a partir de la arquitectura general de 3GPP.

El uso optimizado del espectro por parte del sistema LTE se debe que emplea una técnica de acceso múltiple en la capa física, llamada OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) en el Downlink, en la que divide el canal en un conjunto de subportadoras. SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiplexing Access) es una variante de OFDMA con un reducido pico de potencia de la señal que se utiliza en el Uplink. Finalmente, otro aspecto importante que ayuda a optimizar LTE es el uso de arreglos de antenas MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output). MIMO permite a los equipos terminales y a los emisores de señales tener múltiples antenas, de esta forma se mejora la calidad de la comunicación.

2.1.1 Arquitectura de red 3GPP

La arquitectura de red 3GPP está compuesta por 2 componentes principales, el primero es la red en sí misma que se divide de forma lógica en una infraestructura de núcleo o core (Core Network, CN) y una de red de acceso (Access Network, AN). El segundo componente es el Equipo de Usuario (User Equipment, UE).

²⁵ Cox 2012: 1.

2.1.1.1 Equipo del usuario

El equipo de usuario puede ser un teléfono móvil o un terminal denominado mobile equipment (ME). Este equipo deberá contar con una tarjeta UICC (Universal Integrated Circuit Card). La tarjeta UICC o SIM (Subscriber Identity Module) en sistemas GSM y USIM (Universal SIM) en sistemas UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) y LTE. Esta tarjeta almacena la información del usuario y mantiene un registro de los procedimientos habilitados por la subscripción del usuario a los servicios proporcionados por la red²⁶. El hecho de vincular una tarjeta a un equipo permite que un usuario (identificado a través de la SIM/USIM) pueda utilizar diferentes terminales para acceder a la red.

2.1.1.2 Red de acceso

3GPP define tres tipos de redes de acceso: GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network), UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) y E-UTRAN (Evolved UTRAN). Las redes de acceso GERAN y UTRAN forman parte del sistema 3G UMTS mientras que E-UTRAN es la red de acceso del sistema LTE la letra E antepuesta indica que se trata de la evolución de la red de acceso UTRAN²⁷. Cada red de acceso define su propia interfaz aérea para la comunicación con los equipos de usuario. En este sentido, GERAN implementa acceso basado en TDMA, UTRAN utiliza acceso basado en WCDMA, finalmente E-UTRAN implementa el acceso mediante OFDMA.

²⁶ Milla 2013: 22.

²⁷ Cox 2012: 2.

2.1.1.3 Red de core

La red de acceso se comunica con la red de core mediante interfaces AN-CN. La red de core de LTE define dos dominios: el dominio de conmutación de circuitos (CS) y el dominio de conmutación de paquetes (PS). Adicionalmente la red de core define el subsistema IP de multimedia o IMS.

Figura 9. Arquitectura básica de redes CS y PS según 3GPP

Fuente: Cox 2012: 2.

En la figura anterior se aprecia el diagrama de bloques de la arquitectura básica 3GPP. Se aprecia que la red de acceso tiene conectividad con ambos dominios de la red de core.

2.1.1.3.1 Dominio CS

El dominio CS contiene todos los elementos que participan en la provisión de servicios de telecomunicaciones basados en conmutación de circuitos por ejemplo, los servicios de

telefonía y videoconferencia en redes UMTS²⁸. El dominio de circuitos de la red de core es accesible a través de las redes de acceso UTRAN y GERAN. En el caso de la E-UTRAN es distinto pues no se encuentra contemplado el acceso al dominio CS ya que, al ser un sistema totalmente orientado a IP, todos los servicios se proporcionan a través del dominio PS.

2.1.1.3.2 Dominio PS

El dominio PS incluye todos los componentes de la red de core que participan en el ofrecimiento de servicios de telecomunicaciones basados en conmutación de paquetes. La información de cada usuario es estructurada en paquetes de datos que pasan por múltiples interfaces, equipos y enlaces en su camino por la red²⁹. Existen sin embargo dos implementaciones distintas para el acceso a paquetes: GPRS (General Packet Radio System) y EPC (Evolved Packet Core).

GPRS es la implementación del dominio PS desarrollada para redes GSM y que además se utiliza en la actualidad para UMTS. Como ya se mencionó anteriormente, estos servicios de conectividad por paquetes de GPRS son accesibles tanto a través de UTRAN como de GERAN. Por otro lado, se define para LTE una última implementación del dominio PS, esta es la denominada EPC³⁰. Esta es una implementación evolucionada de GPRS que ha sido mejorada para brindar servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN.

El EPC también ha sido creado para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP, como las ya mencionadas UTRAN y GERAN; así como desde redes no 3GPP, como WiMAX. En la red troncal también se despliegan componentes para soportar funcionalidades asociadas a los diferentes dominios. Un claro ejemplo de esta diversidad de servicios soportados es el HSS (Home Subscriber Server) que posee la base de

²⁸ Milla 2013: 22.

²⁹ Milla 2013: 24.

³⁰ Cox 2012: 6.

datos con información de los usuarios del sistema³¹. Sobre el HSS se sustenta el subsistema la operación del PS, CS y el IMS.

El último componente de la red troncal o de core, el subsistema IMS es el encargado de la provisión de servicios IP multimedia basados en protocolo SIP (Session Initiation Protocol) de IETF (Internet Engineering Task Force 2). El subsistema IMS es responsable de la señalización requerida por los servicios multimedia y utiliza para su transporte los mecanismos de transferencia proporcionados por el dominio PS³². En la figura 10 se muestra la arquitectura de la red UMTS.

Figura 10. Arquitectura de red UMTS

Fuente: Milla 2013: 25.

³¹ Milla 2013: 23.

³² Scribd 2011: 2

La arquitectura de red de 3GPP se divide entre el dispositivo de usuario, el Core Network (que se encarga de realizar el control de llamadas y de gestionar todo lo relativo a la movilidad) y de la red de acceso (que controla la transmisión de paquetes vía radio y administra los recursos disponibles).

2.1.2 Evolución de UTRAN a E-UTRAN

Para entender la arquitectura general de LTE es preciso haber explicado la arquitectura 3GPP. En un inicio, las redes UMTS requerían de un componente llamado RNC (Radio Network Controller) para controlar múltiples estaciones base o Nodos B a través de la interfaz IuB. Sin embargo, este despliegue no permitía que exista comunicación directa entre las estaciones base debido a que las funcionalidades que requerían interacción eran resueltas a través de la RNC. Es así como se migra de una UTRAN a una E-UTRAN para eliminar la capa RNC y permitir que exista una comunicación directa entre las estaciones base.

Figura 11. Evolución de UTRAN a E-UTRAN

Fuente: Milla 2013: 25.

Se aprecia en la figura 11 que es más sencillo de implementar E-UTRAN que utiliza acceso a la interfaz aire a través de OFDMA. El único elemento ahora es el eNodeB el cual se conecta directamente al EPC a través de un elemento llamado MME (Mobility Management Entity) con quien define una interfaz llamada S1 y con otro eNodeB mediante una interfaz denominada X2. De este modo las optimizaciones se distribuyen entre el eNodeB y la red de core³³. La conexión directa entre eNodosB reduce la tasa de paquetes perdidos en los móviles cuando se hace handoff. Los eNodeB permiten que los protocolos, de plano usuario y plano de control, puedan comunicarse desde el UE hacia el EPC y viceversa. Por último, el E-UTRAN está dividido en dos capas: el Radio Network Layer (RNL) y la Transport Network Layer (TNL).

³³ Marcano 2010: 21.

A continuación, se definen los elementos o funciones de la red LTE.

2.1.2.1 Mobility management entity (MME)

Desde la perspectiva de la Red Central, el MME es el nodo principal para el control del acceso LTE en la red de la Municipalidad Distrital de San Juan Bautista. Selecciona el GW de servicio para un UE durante la conexión inicial y también durante el traspaso entre las subredes LTE. Es responsable de los procedimientos de localización y búsqueda para los UEs en modo inactivo y también de la activación y desactivación de portadores en nombre del UE. El MME, a través de la interacción con el HSS es responsable de autenticar al usuario final.

Principales funciones del MME:

- Punto de referencia S1-MME hacia el E-UTRAN basado en S1-AP / SCTP
- Señalización de Non-Access-Stratum (NAS)
- Punto de referencia S6a hacia el HSS para la transferencia de datos de suscripción y autenticación basados en el protocolo Diameter / SCTP
- Punto de referencia S10 hacia otra MME para reubicación y transferencia de información MME a MME basada en el protocolo GTP-C / UDP
- Punto de referencia S11 hacia el SGW basado en el protocolo GTP-C / UDP
- Procedimiento de selección de P-GW y S-GW compatible con MME
- PDN tipo IPv4 e IPv6 a UE
- Comparación del tipo PDN solicitado por el UE con el tipo de PDN almacenado en los datos de suscripción recibidos desde el HSS para una APN determinada
- Conectividad de múltiples PDN simultáneas a una o más PDN
- Mecanismos para proteger criptográficamente la señalización NAS intercambiada entre el UE y MME
- Procedimiento de verificación de identidad ME
- Asignación y reasignación de GUTI

- Actualización de área de seguimiento (TAU) con / sin cambio de MME
- eNodeB y MME iniciado el procedimiento de liberación de S1
- Procedimiento de separación iniciado por MME implícito y explícito
- Procedimiento de separación iniciado por HSS
- Modificación de portador iniciada por PGW con / sin actualización de QoS de portador
- PGW iniciado la desactivación del portador
- Procedimientos de traspaso basados en X2 y S1
- Mapeo entre los parámetros EPS y QoS
- Compatibilidad automática con conmutación por error para la política de redundancia de HA 1 + 1

2.1.2.2 Serving gateway o S-GW

El Serving Gateway es un elemento de red que gestiona la ruta de datos del usuario (portadores de datos / data bearers) dentro del EPC. Se conecta a través de la interfaz S1-U hacia eNodeB y recibe paquetes de datos tipo uplink desde un punto y transmite paquetes de datos de tipo downlink y luego transmite paquete de datos dentro del EPC a través de la interfaz S5 hacia o desde el P-GW.

El S-GW es controlado por el MME a través de la interfaz S11. En determinado momento, el UE está conectado al EPC a través de un solo Serving-GW. El S-GW también actúa como el anclaje de movilidad del user plane durante el handover entre eNodeB.

Principales funciones del S-GW:

- Interfaz S-GW y E-UTRAN (S1-U) según 3GPP TS 29.281
- Protocolo GTPv1-U para transportar paquetes portadores entre eNodeB y SGW sobre la interfaz S1-U

- Protocolo GTPv2-C para transportar mensajes de señalización entre S-GW y P-GW sobre la interfaz S5
- Protocolo de túnel GPRS para el plano de usuario (GTPv1-U) sobre la interfaz S5
- Posibilidad de establecimiento de túnel portador con múltiples P-GW
- Procedimientos de traspaso basados en X2 y S1
- Protocolo GTPv2-C para transportar mensajes de señalización entre MME y S-GW sobre la interfaz S11
- E-UTRAN iniciado el procedimiento UE attach
- Procedimiento de separación UE, MME, S-GW y HSS iniciado
- Procedimiento de liberación S1
- HSS iniciado la modificación de QoS suscrita para un S5 basado en GTP
- Compatibilidad automática con conmutación por error para la política de redundancia de HA 1 + 1

2.1.2.3 Packet data network (PDN) gateway o P-GW

El PDN Gateway proporciona la conexión entre EPC y otras redes de datos, como, por ejemplo, la red de aplicaciones de la municipalidad. El P-GW también asigna una dirección IP al UE.

Principales funciones del P-GW:

- Función de Policy Enforcement
- Políticas de control sobre la interfaz Gx para el PCRF
- Protocolo GTPv2-C para transportar mensajes de señalización entre S-GW y P-GW sobre S5
- Protocolo de túnel GPRS para el user plan (GTPv1-U) sobre la interfaz S5
- Interfaz SGi sobre protocolo de aplicación sobre IP

- Configuración y asignación de parámetros de direcciones IPv4 al UE durante la activación predeterminada del portador (default bearer)
- Sesiones de Gx para recuperar las políticas del PCRF antes de que se establezca la sesión de IP CAN
- Procedimiento de unión UE
- Procedimiento de actualización del área de seguimiento con / sin cambio S-GW
- Procedimiento de separación P-GW
- Activación / modificación / eliminación del default bearer
- Procedimiento de solicitud de servicio desencadenado por UE / red
- Compatibilidad automática con conmutación por error para la política de redundancia de HA 1 + 1

2.1.2.4 Policy control rules function o PCRF

El Policy Control Rules Function (PCRF) proporciona detección de flujo de servicio datos y políticas de aplicación para portadores dedicados (dedicated bearers) estáticos y dinámicos.

Principales funciones del PCRF:

- Interfaces diameter Gx (3GPP TS 29.212) para inter-comunicación con P-GW y AF (Application Function), como, por ejemplo: IMS
- Crear / eliminar portadores dedicados (dedicated bearers)
- Repositorio de perfil de suscripción (SPR)
- Servicios basados en políticas basados en el perfil del suscriptor y QoS compatibles
- Política basada en APN
- Gestión de grupos de suscriptores
- Gestión de paquete de servicios

- Compatibilidad automática con conmutación por error para la política de redundancia de HA 1 + 1

2.1.2.5 Home subscriber server o HSS

El HSS es una base de datos que contiene información relacionada con el usuario y el suscriptor. También proporciona funciones de soporte en gestión de movilidad, configuración de llamada y sesión, autenticación y autorización de usuario.

Principales funciones del HSS:

- Interfaz diameter S6a según el 3GPP TS 29.272 y RFC 3588 para la transferencia de datos de suscripción y autenticación para autenticar / autorizar el acceso del usuario.
- Backup de la base de datos implementada tanto para configuración cuanto para aprovisionamiento de las SIM cards. Los backups son encriptados y pueden ser usados para restablecer las configuraciones relacionadas y las tarjetas SIM aprovisionadas en caso de fallas de hardware o aprovisionamiento de un nuevo HSS.
- Autenticación para acceso LTE utilizando el algoritmo Milenage (3GPP TS 25.206)
- “Health check” automático y recopilación de datos
- Registro implícito
- Gestión de perfil de usuario EPC y autorización de servicio
- Configuración EPC APN
- Gestión de movilidad EPC
- EPS User location and State Information Support
- Authentication Vector Generation

De esta manera, en la siguiente imagen, se muestra en términos generales la arquitectura de LTE.

Figura 12. Arquitectura general LTE

Fuente: Milla 2013: 26.

2.1.3 TDD y FDD

Recordemos que la primera aplicación de las redes celulares fue la transmisión de voz. Originalmente la voz se transmitía en tramas tipo El donde cada canal de voz ocupaba 64 Kbps. El año 1996 la ITU-T publicó la recomendación del algoritmo G.729 el cual utilizaba la predicción lineal con excitación por código algebraico de estructura conjugada (CS-ACELP) para comprimir las señales de voz hasta los 8 Kbps³⁴. Como la naturaleza de la voz es estable y balanceada en ambos sentidos, la mejor manera de transmitirla en un espectro de redes celulares era a través de la técnica de Frequency Division Duplexing (FDD). FDD utilizaba segmentos del espectro distintos para los canales de uplink y de downlink. A partir de que 3GPP inició los estudios para las redes de tercera generación, la necesidad de transmitir datos se hizo cada vez más urgente. La naturaleza de los datos, a diferencia de la voz, es inestable y

³⁴ ITU-T 1996.

por ráfagas por tanto continuar con segmentos estáticos de espectro no proponía una solución eficiente para la transmisión de datos. La técnica de Time Division Duplexing (TDD) permitía el uso de un segmento más pequeño del espectro para ser asignado a las portadoras de uplink o downlink en momentos distintos³⁵. La siguiente figura nos plantea las diferencias entre TDD y FDD.

Figura 13. Comparación de TDD vs FDD

Fuente: Huawei 2018

Con el advenimiento de UMTS, se definieron los 2 modos de operación FDD y TDD para la UTRA de las redes celulares 3G.

³⁵ Goosen 2006: 1.

2.1.4 OFDMA

OFDMA es una variante de OFDM que permite la coexistencia de subportadoras de información. OFDMA ayuda a optimizar el ancho de banda en la transmisión de datos, esto se logra mediante una técnica de multicanalización basada en el uso de varias subportadoras. Estas subportadoras son elegidas de tal modo que no haya interferencia espectral. El estándar IEEE 802.16e tiene dos capas físicas basadas en OFDM: una que usa OFDM como tal, y otra que usa una variante de esta OFDMA, donde varios usuarios comparten un símbolo OFDM³⁶. La técnica OFDM es similar a FDM, sin embargo, mientras FDM debe dejar una banda de guarda entre canales, OFDM por su parte acerca los canales lo más posible hasta superponerlos. Esto se logra mediante la selección de frecuencias ortogonales en el sentido matemático; permitiendo así que sus espectros se superpongan sin interferir.

En LTE, OFDM divide la portadora principal en múltiples sub portadoras de 15KHz, luego las modula utilizando formatos QPSK, 16-QAM, o 64-QAM. OFDMA asigna a cada usuario el ancho de banda necesitado para su transmisión. Las sub portadoras no asignadas son sencillamente deshabilitadas³⁷.

Figura 14. Diferencias entre FDM y OFDM

Fuente: Milla 2013: 28.

³⁶ Soltani 2009: 1.

³⁷ Anritsu 2015: 4.

2.1.5 SC – FDMA

Simple Carrier Frequency Division Multiple Access es una variante de OFDMA. Posee características similares como el hecho de presentar robustez ante los trayectos múltiples, alta eficiencia espectral, capacidad de reducir la Interferencia Intersimbólica y una implementación sea sencilla. Además, ofrece la capacidad de ahorrar energía mediante el uso de PAPR (Peak to Average Power Ratio)³⁸. Como ya se mencionó, esta es la tecnología de acceso utilizada para el uplink en un sistema LTE.

Figura 15. Diferencias entre OFDMA y SC-FDMA

Fuente: Milla 2013: 28.

³⁸ Marcano 2010: 22.

2.1.6 MIMO

Las antenas en arreglos MIMO son de mucha importancia en un despliegue LTE. MIMO hace referencia al uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor a fin de multiplicar la capacidad de transmisión y recepción de señales³⁹. La figura 16 nos muestra el diagrama de bloques de un sistema MIMO.

Figura 16. Diagrama de bloques de un sistema MIMO

Fuente: Biglieri, Calderbank, Constantinides 2010:4.

Se observa que la información a ser enviada es codificada y pasa por un proceso de interleaving. Para esto, los códigos de interleaving son mapeados en símbolos que pueden ser, por ejemplo, símbolos QAM los cuales luego ingresarán a un encoder espacio-temporal a fin de poder ser finalmente enviados a los receptores a través del arreglo de antenas. El proceso inverso ocurrirá en el receptor.

³⁹ Cox 2012: 253.

2.1.7 Estructura de tramas LTE

La unidad básica de tiempo para LTE es el time slot o T_s . La duración de un T_s viene dada por: $T_s = 1/(15\,000 \times 2048) = 32.6\text{ ns}$. Las transmisiones en downlink y uplink se organizan en frames de duración $T_f = 307\,200\ T_s$. De este modo se tiene que un frame tiene una duración de 10 ms. Cada uno de estos frames se divide en 10 sub-frames los cuales están compuestos por 2 slots de 0.5 ms. Cada uno de estos slots es llamado Resource Block (RB)⁴⁰. En LTE, la unidad básica de modulación es el Resource Element (RE). Cada RE es una pequeña subportadora de 15 KHz por símbolo. Al agruparse, los RE forman los RB.

Figura 17. Esquema de un Resource Block

Fuente: Anritsu 2015:7.

⁴⁰ Anritsu 2015: 6.

La cantidad de símbolos depende del Prefijo Cíclico (CP) utilizado. Utilizando un CP normal, cada slot está compuesto por 7 símbolos.

2.1.8 Ancho de banda de transmisión

Para LTE se definen los siguientes anchos de banda de canal en MHz: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20. Estos anchos de banda son los anchos de banda físicos de la interfaz aire, sin embargo, la capacidad de transmisión de los sistemas LTE viene definida por el ancho de banda de transmisión. Este se define como el ancho de banda activo y habilitado para ser usado en la comunicación; es decir, es el número de RB activos en una transmisión. El aumento del ancho de banda de transmisión supone que la cantidad de RB aumenta. El máximo Ancho de Banda ocupado se halla multiplicando el número de Resource Blocks por 180 kHz. Así se obtiene la siguiente tabla que indica el ancho de banda de transmisión en función de los RB y del ancho de banda del canal.

Tabla 8
Anchos de banda de canal

Channel Bandwidth (MHz)	Maximum Number of Resource Blocks (Transmission Bandwidth Configuration)	Maximum Occupied Bandwidth (MHz)
1.4	6	1.08
3	15	2.7
5	25	4.5
10	50	9.0
15	75	13.5
20	100	18.0

Nota: Fuente Anritsu 2015: 7.

Para el caso del presente diseño, se utilizará un ancho de banda de canal de 20 MHz lo cual permite un ancho de banda de transmisión de 18 MHz.

Figura 18. Comparación entre ancho de banda del canal y ancho de banda de transmisión.

Fuente: Anritsu 2015: 7.

2.1.9 Cálculo de la cobertura del eNodeB

Para realizar el cálculo de cobertura del eNodeB es necesario empezar calculando las potencias mínimas requeridas por el transmisor y receptor en el sistema de comunicaciones. Este cálculo se denomina Link Budget y para el caso del presente proyecto se utilizan parámetros de entrada como los datos de los fabricantes de módems LTE, los datos de los fabricantes de eNodosB y parámetros del entorno como la pérdida por penetración causada por

el efecto de shadowing⁴¹. El estudio del Link Budget nos permite calcular la cobertura máxima de un sistema radiante tomando como métrica el radio de cobertura circular.

2.2 Video vigilancia

Un sistema de video vigilancia permite obtener imágenes en tiempo real mediante un arreglo de cámaras dispuestas en lugares, ya sea que se traten de interiores o exteriores, y llevarlas a través de algún medio hacia una central en donde éstas serán analizadas o grabadas bajo demanda. Este sistema puede ser analógico o digital y permite dos tipos de transmisión: inalámbrica o a través del uso de cableado⁴².

2.3 Protocolo IP

IP o Protocolo IP es un protocolo que funciona sobre la tercera capa del modelo OSI. Este protocolo ofrece información de direccionamiento y control que permiten a los paquetes de datos ser ruteados a través de redes. Dentro del conjunto de documentos de la IETF, IP se encuentra descrito en la RFC 791 . El uso del protocolo IP en conjunto con el protocolo TCP o Protocolo de Control de Transmisión, el mismo que funciona sobre la cuarta capa del modelo OSI, ha permitido la existencia y la masificación de la Internet.

2.3.1 Estructura del paquete IP

Para fines del presente proyecto es importante detallar la composición de un paquete IP de modo tal que se pueda reconocer uno de los parámetros más importantes que hacen posible el enrutamiento de los datos, la dirección IP. La siguiente imagen nos muestra la estructura de un paquete IP.

⁴¹ Montenegro 2005: 20.

⁴² Ratcliffe 2011:15.

Figura 19. Composición del paquete IP

Fuente: Cisco 1999: 271.

De la figura anterior podemos distinguir 14 campos los cuales se detallan a continuación.

- Version o versión: Indica la versión del protocolo IP utilizado.
- IHL o longitud de cabecera: Indica la longitud de la cabecera en palabras de 32 bits.
- Type of service o tipo de servicio: Indica cómo se manejarán los datos por parte de los protocolos de capa superior.
- Total Length o longitud total: Especifica el tamaño total en bytes del paquete IP incluyendo los datos y la cabecera.
- Identification o Identificador de paquete: Contiene un número entero que identifica a cada datagrama. Este campo permite la reconstrucción de los datos una vez llegados al destino.

- **Flags o banderas:** Es un campo con una longitud de 3 bits donde el primero siempre deberá ser 0 y los dos últimos indican si existen o no más fragmentos de un mismo datagrama que falten enviar.
- **Fragment Offset o Desfase de fragmentación:** Indica la posición de un datagrama respecto del inicio del mismo de modo que ayuda a la recomposición de la información.
- **Time to Live o Tiempo de vida:** Es un contador que se va decrementando para evitar que los paquetes se encuentren dentro de bucles. Al llegar a 0, el paquete es descartado.
- **Protocol o Protocolo:** Indica el protocolo de capa superior que recibirá el paquete
- **Header Checksum o Comprobación de suma de cabecera:** Ayuda a asegurar la integridad de la cabecera.
- **Source Address o dirección de fuente:** Especifica el nodo que envía la información
- **Destination Address o dirección destino:** Especifica el nodo que recibe la información
- **Options u opciones:** Permite a IP soportar varias opciones como seguridad
- **Data o datos:** Contiene la información correspondiente a la capa superior.

2.3.2 Direccionamiento IP

Es el mecanismo que nos permite asociar un identificador a un nodo o equipo de red. Durante el desarrollo de este diseño utilizaremos la versión 4 del protocolo IP. El identificador de cualquier equipo a nivel de la capa IP es la dirección IP, la cual tiene una longitud de 32 bits. Para redes privadas, como es el caso de la red de la solución propuesta en el presente documento, se utilizará uno de los ocho bloques que IANA ofrece para redes privadas⁴³. De

⁴³ Merit 1993: 4.

esta manera se dispone de 131 072 direcciones IP para ser distribuidas entre los distintos elementos que forman parte de la red, este aspecto está alineado con la escalabilidad que se plantea para el sistema de transmisión LTE del presente diseño.

2.4 Video vigilancia IP

Un sistema de Video Vigilancia IP es un sistema de video vigilancia que procesa y transmite información de voz y video en formato digital y lo transmite a través de redes IP. Un típico diseño de este sistema es el que se muestra a continuación.

Figura 20. Componentes de una red de video vigilancia IP

Fuente Elaboración propia basada en: Nilsson 2008: 9.

Como se aprecia en el gráfico anterior, el uso de equipos analógicos como las cámaras pueden formar parte de un sistema de video vigilancia IP siempre y cuando las imágenes que capten sean posteriormente digitalizadas a través de encoders o codificadores. La transmisión de estas imágenes para la solución resultante del presente diseño, se basará sobre el sistema LTE a fin de garantizar delay del orden de los 10 ms, es decir, esta transmisión LTE permitirá la transmisión en tiempo real del video.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como se mencionó en capítulos anteriores, el problema que motiva el presente trabajo es la carencia de un sistema de transmisión escalable que permita el transporte de video IP en tiempo real para mejorar los servicios de seguridad ciudadana. Para el caso puntual del distrito de San Juan Bautista, como también se mencionó anteriormente, los servicios de comunicaciones móviles presentes se limitan al trazado de la carretera Iquitos – Nauta.

A continuación, se muestran los diagramas de cobertura de los cuatro operadores en el distrito, en color verde claro se muestra la cobertura de redes 3G, en color naranja la cobertura de redes LTE y en color rojo la cobertura de las redes LTE Advanced.

Figura 21. Cobertura del operador BITEL en el distrito de San Juan Bautista

Fuente: NPerf 2018.

Figura 22. Cobertura del operador ENTEL en el distrito de San Juan Bautista

Fuente: NPerf 2018.

Figura 23. Cobertura del operador CLARO en el distrito de San Juan Bautista

Fuente: NPerf 2018.

Figura 24. Cobertura del operador MOVISTAR en el distrito de San Juan Bautista

Fuente: NPerf 2018.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el problema que motiva el presente trabajo es la carencia de un sistema de transmisión escalable que permita el transporte de video IP en tiempo real para mejorar los servicios de seguridad ciudadana. Para el caso puntual del distrito de San Juan Bautista, como también se mencionó anteriormente, los servicios de comunicaciones móviles presentes se limitan al trazado de la carretera Iquitos – Nauta.

3.1 Procedimiento de corroboración de falta de cobertura móvil

Con la finalidad de corroborar la falta de cobertura en el distrito se considerará la zona donde se encuentren desplegados los principales equipos a los que proveerá conectividad la red LTE propuesta, se trata de las cámaras del servicio de video vigilancia. Se escogerá ocho sitios con alta concentración de cámaras para tomar muestras de throughput de downlink, throughput de uplink y delay para cada uno de los 4 operadores.

3.2 Selección de los puntos de muestra

De acuerdo con el método propuesto para confirmar la falta de cobertura móvil dentro del distrito, se tomaron muestras de performance de redes móviles en 8 puntos del distrito los cuales se muestran en la siguiente tabla. La selección de estos puntos o lugares se hizo considerando que deberán estar ubicados en la zona de influencia del sistema de video vigilancia tal como se mostró anteriormente.

3.2.1 Disposición geográfica de las cámaras del sistema de video vigilancia

De acuerdo con el plan de seguridad del distrito de San Juan Bautista, las cámaras utilizadas serán de 2 tipos: tipo fija y tipo PTZ. Para permitir una mejor ubicación de las cámaras se presenta el siguiente mapa que divide el distrito en 9 zonas notables.

Figura 25. Zonificación del distrito de San Juan Bautista

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2018.

Sobre esta división, se presenta la distribución de las cámaras en las imágenes siguientes:

Figura 26. Distribución de cámaras en la zona 1

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2018.

Esta zona se encuentra delimitada por las instalaciones del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana por el oeste, la margen sur de la Av. Participación, la carretera Iquitos-Nauta hacia el norte, mientras que por el este termina en el cruce entre la calle Iberia y la Av. José Abelardo Quiñones.

Figura 27. Distribución de cámaras en la zona 2

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2018.

La segunda zona está centrada en el cruce de la carretera Iquitos-Nauta y la Av. Participación. Abarca 1.5 Km a la redonda de esta intersección, por el norte hasta el aeropuerto y por el este con el centro de acopio de material reciclable de San Juan.

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2018.

58

Figura 29. Distribución de cámaras en la zona 4

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2018.

Esta amplia zona está limitada hacia el sur por la parte posterior del centro recreacional El Bosque, por el oeste con el aeropuerto Secada Vignetta, por el norte con los bosques y hacia el este alcanza hasta la Universidad Científica del Perú.

Figura 30. Distribución de cámaras en la zona 5

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2018.

Esta zona comprende la franja entre el Aeropuerto Secada Vignetta y el río Nanay.

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2015.

61

Figura 32. Distribución de cámaras en la zona 7

Fuente: Elaboración propia basada en: Google 2015.

Esta zona comprende margen sur de la carretera Iquitos-nauta desde la Universidad científica del Perú hasta las instalaciones del Gobierno Regional de Loreto, limita por el sur hasta las zonas boscosas del sur.

La ubicación de cada una de las cámaras responde al criterio de que cada una de ellas debe instalarse en puntos críticos que requieran de monitoreo visual, esta es una solución costo-efectiva para la documentación del flujo de personas y vehículos⁴⁴. De acuerdo a la disposición de cámaras propuesta se genera la siguiente tabla que nos resume la cantidad de cámaras requeridas por cada uno de los sitios y posteriormente se analizará las características de estas cámaras para definir el tipo de cada una.

Tabla 9
Resumen de cámaras por tipo y por zona

ZONA	CANTIDADES	
	CÁMARA TIPO X	CÁMARA TIPO Y
1	14	5
2	14	5
3	13	4
4	19	10
5	6	8
6	16	9
7	29	10
TOTALES	111	51

⁴⁴ Zeljkovic 2014: 233

3.2.2 Ubicación de los puntos de muestra

Como se mencionó anteriormente, los puntos de muestra consideran la cercanía a las cámaras de video vigilancia desplegadas en el distrito. Así, se seleccionaron los siguientes 8 puntos para obtener las muestras de performance de las redes móviles de los cuatro operadores presentes en el distrito.

Tabla 10
Ubicación de los puntos de muestra

LUGAR	COORDENADAS	UBICACIÓN
MARGARITAS	-3.773583, -73.287563	ZONA 4
OTORONGO	-3.764230, -73.280899	ZONA 6
PARQUE MODELO	-3.779691, -73.283249	ZONA 3
SALUD PROGRESO	-3.787982, -73.289158	ZONA 2
MONTE DE DIOS	-3.774129, -73.278150	ZONA 7
ULTRAMARINOS	-3.767655, -73.294101	ZONA 5
AEROPUERTO	-3.785367, -73.303332	ZONA A
PARTICIPACIÓN	-3.798606, -73.311180	ZONA 1

Los datos que se tomarán en consideración serán el throughput de downlink, throughput de uplink y la latencia de la señal para cada uno de los sitios. Para tener una referencia, se presenta la ubicación de los 8 puntos sobre el mapa del distrito de San Juan Bautista.

Figura 33. Ubicación de los puntos de muestra en el mapa

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

3.2.3 Perfil de los lugares de muestra

A continuación, presentamos el perfil de cada lugar de donde se obtuvieron las muestras:

a) Lugar Margaritas:

Se ubica una zona residencial ubicada a solo 70m de la carretera José Abelardo Quiñones y a una cuadra de la plaza principal del distrito de San Juan Bautista. Las construcciones cercanas son predominantemente de material noble y en su gran mayoría son solo de 1 piso de altura.

Figura 34. Ubicación del lugar Margaritas

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 35. Foto del lugar Margaritas

Fuente: Elaboración propia

b) Lugar Otorongo:

Se encuentra en la zona nor-oriental del distrito de San Juan Bautista. Se ubica a 600m de la carretera Jose Abelardo Quiñones y a 350m de la municipalidad. Las construcciones aledañas varían entre material noble y madera y muy pocas superan 1 piso de altura.

Figura 36. Ubicación del lugar Otorongo

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 37. Foto del lugar Otorongo

Fuente: Elaboración propia

c) Lugar Parque Modelo:

Se encuentra en la zona centro-sur del distrito. Se ubica a 650m de la carretera Jose Abelardo Quiñones y a 600m de la Av. Participación. Las construcciones aledañas si bien son de material noble, ninguna supera el piso de altura.

Figura 38. Ubicación del lugar Parque Modelo

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 39. Foto del lugar Parque Modelo

Fuente: Elaboración propia

d) Lugar Salud Progreso:

Ubicado al centro-sur del distrito, a 250m hacia el sur de la Av. Participación. Las construcciones aledañas son predominantemente de madera y un solo piso de altura. Hay presencia de árboles que no superan los 15m de altura.

Figura 40. Ubicación del lugar Salud Progreso

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 41. Foto del lugar Salud Progreso

Fuente: Elaboración propia

e) Lugar Monte de Dios:

Ubicado al Oriente del distrito, a 350m hacia el sur de la Av. Participación. Las construcciones aledañas son predominantemente de madera y un solo piso de altura. Esta es una de las zonas que presentan mayor índice de delincuencia del distrito.

IMAGEN 3.22 – Ubicación del lugar Monte de Dios

Figura 42. Ubicación del lugar Monte de Dios

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 43. Foto del lugar Monte de Dios

Fuente: Elaboración propia

f) Lugar Ultramarinos

Ubicado al norte del distrito, a 1.4 Km de la carretera Jose Abelardo Quiñones. Las construcciones aledañas son predominantemente de madera y un solo piso de altura. Es una zona que limita con los bosques y que cuenta con densidad demográfica es muy baja

Figura 44. Ubicación del lugar Ultramarinos

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 45. Foto del lugar Ultramarinos

Fuente: Elaboración propia

g) Lugar Aeropuerto:

Ubicado al nor-oeste del distrito, conectado directamente con la carretera Jose Abelardo Quiñones. Ocupa una gran extensión de 4.5 Km² y tiene un flujo de pasajeros de 972 145 pasajeros anuales⁴⁵.

Figura 46. Ubicación del lugar Aeropuerto

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

⁴⁵ CORPAC 2018.

Figura 47. Foto del lugar Aeropuerto

Fuente: Elaboración propia

h) Lugar Participación:

Ubicado al sur-oeste del distrito, conectado directamente con la carretera Jose Abelardo Quiñones. La arquitectura de la zona comprende casas de no más de 1 piso y construidas en su mayoría de madera.

Figura 48. Ubicación del lugar Participación

Fuente: Elaboración propia basada en Google 2018

Figura 49. Foto del lugar Participación

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Análisis de las muestras

Se procedió a hacer la medición de muestras para los 4 operadores en cada uno de los 8 lugares y estos fueron los resultados.

Figura 50. Muestra del lugar Margaritas con operador BITEL

Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Muestra del lugar Margaritas con operador ENTEL

Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Muestra del lugar Margaritas con operador MOVISTAR

Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Muestra del lugar Margaritas con operador CLARO

Fuente: Elaboración propia

De esta manera se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 11
Muestras obtenidas en cada lugar

LUGAR	BITEL			ENTEL			MOVISTAR			CLARO		
	DL	UL	DLY	DL	UL	DLY	DL	UL	DLY	DL	UL	DLY
Unidad	Kbps	Kbps	s	Kbps	Kbps	s	Kbps	Kbps	s	Kbps	Kbps	s
MARGARITAS	190	3.3	1.7	142	0.3	1.1	148	0.9	0.6	102	0.9	0.8
OTORONGO	808	372	0.5	450	84	0.6	762	220	0.6	674	108	0.7
PARQUE MODELO	672	308	0.4	184	74	0.4	320	76	1	284	102	0.8
SALUD PROGRESO	204	60	0.8	272	44	1	176	46	0.4	266	88	1
MONTE DE DIOS	828	262	1.2	260	76	0.8	182	34	0.8	186	86	1.2
ULTRAMARINOS	166	72	1	120	36	2.4	148	44	1.2	0	0	0
AEROPUERTO	860	262	0.4	672	132	0.6	638	232	0.8	840	326	0.6
PARTICIPACIÓN	128	56	0.8	108	0	1	142	34	1	174	38	1.4

Se puede apreciar que los valores de throughput no llegan 1Mbps y que los valores más altos se obtuvieron en celdas ubicadas en zonas cercanas a la ciudad de Iquitos o en el aeropuerto. Para verificar si los valores obtenidos son suficientes para soportar la transmisión de video IP proveniente de las cámaras de video vigilancia se calculará el throughput requerido por cada cámara de acuerdo al modelo fija o PTZ tomando como ejemplo las cámaras Q1765-LE y Q6045 MKII de la marca Axis las cuales soportan video en calidad 720p pero con características discontinuadas, lo cual propone para este análisis el menor valor posible para el throughput de UL.

Tabla 12
Throughput de cámara tipo fija

Name	Model	Quantity	Scenario
Cámara Fija	AXIS Q1765-LE	111	Schoolyard

Profile: Custom ...

	☒ Viewing	☒ Continuous Recording	☒ Event Recording
Frame Rate	18	18	18
Resolution	720p	720p	720p
Video Encoding	H.264	H.264	H.264
Compression	10	10	10
Audio	Off	Off	Off
Recording		24 h	20%
Bandwidth	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s

Done

Nota: Fuente Axis 2017.

Tabla 13
Throughput de cámara tipo PTZ

Name	Model	Quantity	Scenario
Cámara PTZ	AXIS Q604S Mk II	52	Schoolyard

Profile: Custom ...

	☒ Viewing	☒ Continuous Recording	☒ Event Recording
Frame Rate	18	18	18
Resolution	720p	720p	720p
Video Encoding	H.264	H.264	H.264
Compression	10	10	10
Audio	Off	Off	Off
Recording		24 h	20%
Bandwidth	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s

Done

Nota: Fuente Axis 2017.

Como resultado del análisis de consumo de throughput que arroja el software AXIS design tool se obtienen las siguientes tablas. La primera muestra el consumo por cada tipo de cámara y el aporte en bytes para la cantidad de bytes necesarios de almacenamiento, la segunda brinda el dato del throughput total que se deberá considerar para la conectividad global del sistema.

Tabla 14
Consumo de Throughput y memoria de las cámaras

AXIS Design Tool BANDWIDTH ESTIMATE				
Project: New Project		Date: 17/3/2016	Storage: 7 days			
Name	Model	Qty	View	Rec	Event	Storage
Cámara Fija	AXIS Q1765-LE	1	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s	113 GB
Cámara PTZ	AXIS Q6045 Mk II	1	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s	1.49 MBit/s	113 GB
Project Summary		2	2.99 MBit/s	2.99 MBit/s	2.99 MBit/s	226 GB

Nota: Fuente Axis 2017.

Tabla 15
Consumo de Throughput y memoria del sistema completo

AXIS Design Tool BANDWIDTH ESTIMATE				
Project: New Project		Date: 17/3/2016	Storage: 7 days			
Name	Model	Qty	View	Rec	Event	Storage
Cámara Fija	AXIS Q1765-LE	111	166 MBit/s	166 MBit/s	166 MBit/s	12.5 TB
Cámara PTZ	AXIS Q6045 Mk II	51	76.2 MBit/s	76.2 MBit/s	76.2 MBit/s	5.76 TB
Project Summary		162	242 MBit/s	242 MBit/s	242 MBit/s	18.3 TB

Nota: Fuente Axis 2014.

Se puede apreciar que para el caso de las cámaras fijas y PTZ, se requerirá por cada una un throughput de 1.49 Mbps. En total, se requerirá asegurar un throughput de 242 Mbps para la central de gestión de video en la cual además se deberá instalar un sistema de almacenamiento con capacidad de al menos 128.1 TB para mantener un registro de eventos de hasta 7 días.

3.2.5 Conclusiones del análisis de las muestras

3.2.5.1 Validación del problema

Se ha calculado que para cada cámara se requiere al menos 1.49 Mbps de throughput, el mismo que deberá ser soportado por el uplink de cada celda que se despliegue como parte de la solución LTE. Para el caso de la zona 4, de acuerdo con nuestra división del distrito, hay 27 cámaras desplegadas en un área de 3.5 Km², esto significa que en el caso de que una celda sea desplegada con esa cobertura, esta deberá soportar al menos 40.23 Mbps de UL. Como hemos visto en el análisis de las 8 muestras anteriores ninguna llega a los 1 Mbps quedando demostrado que con la infraestructura de redes móviles que brindan servicio en la actualidad, es imposible soportar el transporte de las cámaras de video vigilancia que serán desplegadas en el distrito. Es necesario realizar un despliegue optimizado.

3.2.5.2 Definición del requerimiento para la solución

En promedio cada una de las zonas definidas, por la división del distrito que se muestra en la imagen 11.5, ocupa un área de 3Km² y alberga 20 cámaras IP del sistema de video vigilancia⁴⁶
⁴⁷. Al ser las cámaras elementos de ubicación fija, para fines de administración y para evitar que, ante la caída de una celda, todas las cámaras bajo su zona de cobertura pierdan conectividad se define el requerimiento de al menos 2 sectores de celdas distintas cubran una misma zona con excepción de la zona E que está conformada por bosques. Es decir, un

⁴⁶ Google 2018.

⁴⁷ Comité Distrital de Seguridad de San Juan Bautista 2017.

mínimo de 16 sectores distribuidos en al menos 6 eNodosb deben considerarse como parte del diseño. Se ha definido anteriormente que el throughput mínimo requerido por cada cámara para transmisión a 720p es de 1.49 Mbps. Del mismo modo, en los patrulleros municipales se deberá tener la capacidad de ver en tiempo real las imágenes captadas hasta por 4 cámaras simultáneamente con el fin de cubrir sus zonas de vigilancia por cuadrantes (norte, sur, este y oeste de un lugar específico de interés). Esto quiere decir que la capacidad de downlink para cada patrullero debe ser, en un instante determinado, como mínimo de 5.96 Mbps. En un escenario donde se requiera la intervención de un patrullero por cuadrante, y estando todos bajo la zona de cobertura de un mismo eNodoB, la capacidad de downlink de este equipo deberá ser de 23.84 Mbps.

En la tabla siguiente se resumen los requerimientos de la solución en función de los requerimientos específicos y considerando todos los datos analizados en los capítulos previos.

Tabla 16
Requerimientos de la solución

Objetivo Específico	Requerimientos Asociados
Dimensionar los requerimientos de Throughput de la plataforma de video IP para transmisión de imágenes en HD a 720p.	El Throughput de uplink para cada cámara, independientemente del tipo, deberá ser de 1.49 Mbps como mínimo para soportar calidad 720p y de 50 Mbps como máximo para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP.
	El Throughput de downlink de los UE LTE que estarán instalados en los patrulleros deberá ser como mínimo de 5.96 Mbps para soportar la visualización simultánea de hasta 4 streamings provenientes de 4 cámaras IP y como máximo de 450 Mbps para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP.
	El Throughput de downlink requerido por el gestor de video deberá ser menor a 450 Mbps de acuerdo con el estándar 3GPP .
Asegurar que la plataforma de transmisión LTE tenga Throughput suficiente a fin de ser escalable para soportar futuros servicios asociados con la seguridad ciudadana del distrito.	El Throughput de downlink disponible para futuros servicios deberá ser mayor a 50 Mbps
Garantizar que las características de Throughput de la red de transporte LTE permitirán la transmisión del video IP en tiempo real	Los Throughput de uplink y downlink de un eNb deberán ser menores a 50 y 450 Mbps respectivamente para cumplir con el estándar 3GPP.
	Los Throughput de uplink y downlink de un eNb deberán ser mayores a 29.8 y 23.84 Mbps respectivamente para soportar, en el peor de los casos, las imágenes recibidas de las cámaras IP y servir a los patrulleros.
Garantizar que las características de ancho de cobertura de la red de transporte LTE permitirán la transmisión del video IP en tiempo real	El rango de cobertura de cada eNb deberá ser mayor a 1 Km ² y menor a 4 Km ² con el fin de tener una mejor administración de las celdas.
	La cantidad de eNb requeridos deberá ser mayor o igual a 6 y menor a 25

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En el presente capítulo se identificarán los elementos que forman parte de la solución propuesta. Se realizará un análisis de los requerimientos técnicos para determinar cada componente y finalmente se definirán los recursos necesarios para el despliegue y operación de la solución.

4.1 Sistema de video vigilancia IP

4.1.1 Selección de elementos para el sistema de video vigilancia

4.1.1.1 Cámaras IP

De acuerdo con los requerimientos del plan local provincial de seguridad ciudadana y los datos obtenidos en la sección anterior se buscó en el mercado algunas alternativas de cámaras que dieron como resultado las siguientes tablas:

Tabla 17

Alternativas de cámaras fijas para la solución de video vigilancia

MARCA	MODELO	Rango Temp	RESOLUCIÓN	FPS	ZOOM OPT	ZOOM ELE	PRECIO (USD)
D-LINK	DCS-7513	-30 a 50 °C	16:9 - 1920 x 1080, 1280 x 720, 800 x 450, 640 x 360, 480 x 270, 320 x 176, 176 x 144 4:3 - 1440 x 1080, 1280 x 960, 1024 x 768, 800 x 600, 640 x 480, 320 x 240, 176 x 144	hasta 60 fps	N.A.	10X	700
AXIS	Q1615-E Mk II	-40 a 60 °C	HDTV 720p 100/120 imágenes por segundo (sin WDR): de 1280x720 a 160x90 HDTV 1080p 25/30 imágenes por segundo (WDR): de 1920x1080 a 160x90 HDTV 1080p 50/60 imágenes por segundo (sin WDR): De 1920x1080 a 160x90	hasta 120 fps	20X	15X	1300
CISCO	6500PD	-10 a 50 °C	1920 x 1080 1536 x 864 1472 x 832 1280 x 720 1024 x 576 960 x 544 768 x 432 704 x 400 640 x 368 352 x 208 320 x 192 192 x 112 160 x 96	hasta 30 fps	10X	10X	1250

Tabla 18

Alternativas de cámaras PTZ para la solución de video vigilancia

MARCA	MODELO	SENSOR	RESOLUCIÓN	FPS	ZOOM OPT	ZOOM ELE	PRECIO (USD)
D-LINK	DCS-4633EV	-30 a 50 °C	16:9 - 1920 x 1080, 1280 x 720, 640 x 360 4:3 - 2048 x 1536, 1440 x 1080, 1280 x 960, 800 x 600, 640 x 480	hasta 30 fps	N.A.	10 X	322
AXIS	Q6000-E Mk II	-40 a 60 °C	Objetivo estándar: 4 x objetivos de 1280x720 (HDTV 720p) a 320x180 Predeterminado: 960x720 Vista cuádruple: De 1920x1440 (4:3) a 320x180 Objetivos opcionales: 4 x objetivos de 1920x1080 (HDTV 1080p) a 480x270 Predeterminado: 960x720	hasta 30 fps	40 X	384 X	1621
CISCO	7530PD IP	-40 a 50°C	2560 x 1920 1920 x 1080 1536 x 864 1472 x 832 1280 x 720 1024 x 576 960 x 544 768 x 432 704 x 400 640 x 368 352 x 208 320 x 192 192 x 112 160 x 96	hasta 30 fps	20X	10 X	1870

Un primer aspecto importante para tomar en cuenta en la elección de las cámaras es la temperatura. San Juan Bautista presenta una temperatura anual promedio de 32°C. Durante el día, la exposición al sol y la capacidad calorífica de los materiales de la cubierta de las cámaras puede resultar perjudicial para el funcionamiento de las mismas⁴⁸. De los modelos de cámaras escogidos, los modelos de Axis tienen 10°C más de tolerancia que sus competidores.

Otro aspecto importante para elegir las cámaras de la solución es el hecho de contar con zoom, debido a que la aplicación de estas cámaras es la video vigilancia, es imprescindible que las cámaras tengan una buena capacidad de acercamiento para poder detectar los detalles de lo que acontece en las calles. Para esto las cámaras de video vigilancia usualmente cuentan con 2 tipos de zoom: el zoom óptico que es la capacidad de acercamiento físico que posee la óptica de las cámaras y el zoom digital o eléctrico que se logra mediante algoritmos digitales de procesamiento de las imágenes⁴⁹. El zoom óptico tiene una mayor calidad pues no hay tratamiento de la señal captada por el lente, con lo cual, no existen problemas de pérdida de resolución o calidad.

En función de esto, se desestima la opción de las cámaras D-LINK ya que no tienen capacidad de zoom óptico sino más bien, solamente un zoom digital que acerca solo 10 veces la imagen. Es notoria también la diferencia entre el zoom óptico que ofrecen las cámaras Axis sobre las cámaras Cisco llegando a duplicar su capacidad, sin embargo, a nivel de precios es donde se llega a la conclusión de que las cámaras de la marca española son más convenientes que las de los americanos de Cisco. Para poder tomar la decisión final, es necesario corroborar que las cámaras de Axis cumplen con los requerimientos de throughput definidos anteriormente. Además, es necesario verificar que el streaming combinado de todas las cámaras cumple con las especificaciones de throughput del estándar 3GPP. Para ello, la marca ofrece una calculadora de throughput donde los inputs y outputs se muestran en las siguientes tablas.

⁴⁸ PUCP 2018.

⁴⁹ Caputo 2008: 56.

Tabla 19
Consumo de ancho de throughput de las cámaras fijas

Nombre	Modelo	Cantidad	Escenario
CAMARA FIJA	AXIS Q1615-E Mk II	111	Cruce
Perfil			
Personalizado ...			
☒ Visualización	☒ Grabación continua	☐ Grabación de eventos	
Velocidad de imagen 24	1	30	
Resolución 720p	VGA	VGA	
Codificación de vídeo H.264	H.264	H.264	
Compresión 10	10	30	
Audio Desactivado	Desactivado	Desactivado	
Grabación	24 h	20%	
Ancho de banda	2.14 MBit/s	62.7 KBit/s	0 Bit/s
<button>Hecho</button>			

Nota: Fuente Axis 2018.

Tabla 20
Consumo de throughput de las cámaras PTZ

Nombre	Modelo	Cantidad	Escenario
CAMARA PTZ	AXIS Q6000-E Mk II 60Hz	51	Cruce
Perfil			
Personalizado ...			
☒ Visualización	☒ Grabación continua	☐ Grabación de eventos	
Velocidad de imagen 24	18	30	
Resolución 720p	VGA	VGA	
Codificación de vídeo H.264	H.264	H.264	
Compresión 10	30	30	
Audio Desactivado	Desactivado	Desactivado	
Grabación	24 h	20%	
Ancho de banda	2.14 MBit/s	339 KBit/s	0 Bit/s
<button>Hecho</button>			

Nota: Fuente Axis 2018.

Tabla 21
Consumo de throughput de todo el sistema de cámaras

AXIS Design Tool
INFORME DE BANDA ANCHA

Proyecto: MUNICIPALIDAD SAN JUAN BAUTISTA Fecha: 12/10/2018 Almacenamiento: 7 días

Nombre	Modelo	Nº	Ver	Grabar	Evento	Almacenamiento
CAMARA FIJA	AXIS Q1615-E Mk II	111	237 MBit/s	6.96 MBit/s	0 Bit/s	526 GB
CAMARA PTZ	AXIS Q6000-E Mk II 60Hz	51	109 MBit/s	17.3 MBit/s	0 Bit/s	1.31 TB
Resumen de proyecto		162	346 MBit/s	24.2 MBit/s	0 Bit/s	1.83 TB

Aviso importante: La herramienta de diseño Axis se proporciona a modo de referencia. Las estimaciones y recomendaciones generadas por la utilización de la herramienta de diseño Axis resultan de un número limitado de situaciones de prueba y conclusiones de las mismas por parte de Axis. El usuario de la herramienta de diseño Axis (el "Usuario") reconoce y acepta que cada instalación de un sistema de cámara es única y que los resultados reales medidos desde el sistema del Usuario serán distintos a las estimaciones generadas por la herramienta de diseño Axis. Por lo tanto, las estimaciones generadas por la herramienta de diseño Axis se proporcionan con la condición de que el Usuario realizará sus propias determinaciones en cuanto a la idoneidad para los fines específicos. Axis y/o sus representantes no se harán responsables en ningún caso de los daños de cualquier tipo derivados de la utilización o dependientes de los resultados producidos por la herramienta de diseño Axis. **NOTA:** Las recomendaciones de hardware o software de Axis Camera Station son válidas hasta un total de cien (100) canales para un sistema, independientemente del hecho de que la herramienta de diseño Axis permite definir más de 100 canales para un sistema.

Nota: Fuente Axis 2018.

Se puede apreciar que las cámaras haciendo streaming con calidad 720p, a 24 fps, utilizando codificación H.264 y compresión nivel 10, consumen 2.14 Mbps lo cual está dentro del rango ideal y con solo 1% de desviación sobre el valor teórico calculado considerando 20 fps. Adicionalmente, queda en evidencia que todo el sistema de cámaras ocupará un throughput de 346 Mbps, es decir, el servidor de video recibirá datos a una tasa de 346 Mbps el cual es el valor de throughput de Downlink que soportará el eNodeB que le brinde cobertura. Este valor está por debajo de los 450 Mbps prácticos a los que llegan los equipos LTE en la actualidad. Finalmente se concluye que estas cámaras son eficientes y cumplen con los requisitos establecidos. A continuación, para efectos informativos se presenta la tabla de consumo de energía:

Tabla 22
Consumo de energía por tipo de cámara

Parámetro	Cámara fija	Cámara PTZ
Consumo de potencia	12.95 W	75 W
Voltaje de Alimentación	115 -230 V AC	28 V DC

Nota: Fuente Axis 2018.

La selección en cuanto a las cámaras IP entonces corresponde al modelo Q 1615-E MK II de Axis para las cámaras fijas y al modelo Q 6000-E MK II de Axis para las cámaras tipo PTZ.

4.1.1.2 Servidor de video y streaming

Este equipo es el encargado de recopilar las señales de video captadas por las cámaras IP, las comprime en caso de ser necesario y les da formato de modo que puedan ser distribuidas a los operadores de la central de seguridad y transmitidas a los patrulleros bajo demanda. Para de la presente solución es necesario que el servidor de video sea capaz de transmitir video en tiempo real. Existen productos de software de streaming en el mercado como Flash Media Server, Genetec, Red 5, Wowza Media System y Unreal Media Server.

Debido a que se escogió trabajar con cámaras fijas y PTZ de la marca Axis, es conveniente que el sistema de streaming y gestión del video sea de un fabricante compatible con esta marca. En ese sentido, se escogió la solución OMNICAST versión NOVA de la marca GENETEC de acuerdo con lo que nos propone la marca de las cámaras. A continuación, se presentan las principales características del sistema escogido.

- Video Unificado y Control de Acceso: Unifica los eventos de control de acceso y alarmas con el sistema de video. Consolida las alertas de seguridad dentro de una intuitiva interfaz de cliente, y toma ventaja de una vista sincronizada de video y control de acceso seguimiento y notificación de eventos.
- Funcionalidad de Federación: Observa sitios remotos independientemente como si fueran parte de un solo sistema virtual, con esto se logra la mejora de las operaciones en general y sobre todo a nivel de seguridad.
- Gestión unificada de amenazas: Cambia instantáneamente las configuraciones del sistema de seguridad, incluida la calidad de grabación o el acceso a la cámara específica, en respuesta a

las cambiantes condiciones de seguridad y las amenazas potenciales en base a los ajustes predefinidos.

- **Monitoreo de seguridad remota:** Configura fácilmente una pantalla de vídeo compuesta por múltiples pantallas estándar, lo que permite supervisar las entidades, el control directo y la reproducción de video proveniente de muchas cámaras en una sola pantalla.
- **Gestión de alarmas:** Permite configurar las alarmas y los flujos de trabajo basados en una multitud de eventos del sistema, tales como alarmas de la detección y puerta en movimiento. En base a estas entradas, genera las respuestas para sus operadores.
- **Marca de agua de video:** Agrega una firma digital a cada fotograma de vídeo grabado para asegurar su autenticidad y para que el vídeo pueda ser admisible en la corte.
- **Centro de seguridad móvil:** Permite monitorear video en vivo, responder a las alertas de control de acceso, y compartir vídeo en directo con los demás individuos desde su teléfono inteligente mientras se trabaja en tareas rutinarias o responde a una situación crítica.

El sistema viene en un servidor de misión crítica con las siguientes características:

- **ESPACIO EN RACK:** 5 RU
- **PROCESADOR:** Xeon E5-2630V3
- **RAM:** 16 GB
- **OS:** Server 2012 R2
- **SLOTS DE MEMORIA:** Máximo de 24 DE 6 TB
- **Puertos de red:** 4 de 1GbE
- **Energía:** 110 - 220 VAC

4.1.1.3 Sistema de almacenamiento y storage

Se vio anteriormente que la capacidad de almacenamiento del sistema, a fin de permitir el registro de todas las cámaras por un plazo de 7 días es de 1.87 Tb. Tal como se muestra en las características técnicas del servidor de video, este soporta 24 slots con capacidad de manejar 6 Tb cada uno. Esto quiere decir que el sistema tiene una capacidad total de 144 Tb. Por lo que bastará con equipar el servidor con un único blade de 6 Tb.

Finalmente se resume la solución de video vigilancia en la siguiente tabla.

Tabla 23

Resumen de componentes de la solución de video vigilancia

ELEMENTO		MARCA	MODELO	CANTIDAD
CÁMARAS	TIPO FIJAS	AXIS	Q 1615-E MK II	11
	TIPO PTZ	AXIS	Q 6000-E MK II	51
SISTEMA DE GESTIÓN DE VIDEO Y STREAMING		GENETEC	OMNICAST NOVA	1
SISTEMA DE ALMACENAMIENTO		GENETEC	OMNICAST NOVA	2

4.2 Sistema de transmisión LTE

4.2.1 Banda de operación

Como se vio anteriormente, en el Perú la tecnología LTE se encuentra aplicada en tres bandas del espectro radioeléctrico, estas son la banda 700 MHz, banda 1700-2100 o AWS y la banda 1900 MHz. La banda de 1900 MHz en sus segmentos A y F tiene un ancho de canal de 15 y 2.5 MHz respectivamente para las comunicaciones LTE. Estas son provistas por el operador Claro. Sin embargo, los segmentos cercanos son utilizados por todos los demás operadores para transmitir diferentes tipos de servicios⁵⁰. El operador Claro utiliza estos segmentos para la transmisión de voz y datos LTE para aplicaciones de comunicaciones masivas prepago y post pago, por tanto, utiliza esquemas de modulación robustos con el fin de ofrecer mayores niveles de throughput a sus usuarios. Sin embargo, los segmentos adyacentes a las que trabaja Claro presentan un riesgo latente de interferencia debido precisamente a la alta densidad de símbolos por bit que emplean las modulaciones robustas de mayor orden⁵¹. Por este motivo, se descarta utilizar la banda de 1900 MHz. En la banda de 700 MHz los operadores Movistar y Claro tienen 10 MHz de ancho de banda cada uno, mientras que Entel opera con 17 MHz, es decir, tres operadores operan en los tres segmentos de esa banda.

La banda AWS es una banda nueva que fue adjudicada en el año 2013 a Americatel, ahora Entel, y a Telefónica del Perú para ser operada durante 20 años. A cada operador se le otorgaron 20 MHz de ancho de banda, por este motivo es que se elige trabajar el presente diseño sobre la banda AWS en comparación con los 10 o 17 MHz a los que se limita el funcionamiento de la banda de 700 MHz. Finalmente, para decidir respecto del operador con el que se recomendará coordinar el proyecto de implementación y operación del presente diseño, se toma en cuenta la capilaridad de las redes basadas en cableado de cobre para el distrito. Telefónica del Perú tiene más del 70% de líneas fijas en el departamento de Loreto,

⁵⁰ MTC 2017.

⁵¹ Le Tien 2008:1.

esto es 26 600 abonados fijos de los 38 000 de acuerdo con las estadísticas del MTC al 2016⁵². Por este motivo se decidirá recomendar a la municipalidad distrital de San Juan Bautista desarrollar el presente diseño con el operador Telefónica del Perú utilizando la banda AWS (1710 – 2110) MHz.

4.2.2 Elección del esquema de modulación para la interfaz aire

Al ser este un diseño para una aplicación de LTE en una zona con tan poca interferencia, debido a la ausencia de edificios u obstáculos para la línea de vista, no se requiere un esquema de modulación robusto o de alto orden. Como hemos visto anteriormente, LTE soporta modulaciones tipo QPSK, 16-QAM, 64-QAM y superiores. Se sabe además que mientras más alto sea el orden de la modulación, se enviarán más códigos por bit lo cual aumenta la capacidad de transporte de datos, pero hace a la señal vulnerable ante interferencias y ruido causando la reducción del rango de cobertura de las celdas^{53 54}.

Considerando que la eficiencia espectral que ofrece es la mayor soportada por OFDM, se elegiría el esquema de modulación QPSK, sin embargo, también es necesario tomar en cuenta que la infraestructura urbana, es decir, los materiales de construcción y la altura de los edificios en el distrito no presentan grandes pérdidas de potencia para la señal. Siendo así, se escogerá un esquema de modulación intermedio, en este caso 16QAM la cual nos brinda 4 bits por símbolo.

⁵² MTC 2017: 10.

⁵³ Le Tien 2008: 1.

⁵⁴ Nuaymi 2007: 47.

4.2.3 Elección de los componentes del sistema de transmisión LTE

4.2.3.1 Infraestructura de core y acceso LTE

El diseño de la red de transporte LTE para la Municipalidad Distrital de San Juan Bautista y el soporte para la introducción gradual de las nuevas tecnologías como IOT y BIG Data, así como de futuras aplicaciones, son mejoras naturales necesarias para cumplir con uno de los objetivos específicos del presente diseño y con los requerimientos de los habitantes del distrito no solo en materia de comunicaciones sino también en materia de seguridad, educación, salud, etc. Para poder realizar los cálculos posteriores de cobertura es necesario definir un fabricante de equipos de telecomunicaciones de modo que todos los parámetros utilizados guarden relación con características existentes en el mercado y que la solución, desde un punto de vista global, cumpla con las exigencias funcionales y de seguridad que exige el estado peruano para el despliegue de este tipo de redes.

A manera de establecer un marco comparativo entre las distintas marcas se establecen los siguientes criterios como requerimientos técnicos generales.

Tabla 24
Requerimientos generales de la capa de core

REQUERIMIENTOS GENERALES PARA LA CAPA DE CORE
El fabricante debe formar parte de la cadena de proveedores de Telefónica del Perú
El fabricante deberá garantizar que su solución cumpla con el estándar 3GPP rel 13 o superior.
Con el fin de garantizar la interoperabilidad entre los componentes, el fabricante deberá soportar la red de comunicaciones de extremo a extremo, desde la capa de core asta la capa de acceso
Con el fin de garantizar la disponibilidad de la red, el fabricante deberá presentar una solución geo redundante a nivel de la capa de core
Con el fin de cumplir con el requerimiento de soporte de crecimiento en usuarios y aplicaciones futuras, la solución deberá soportar por lo menos el 90% de la población del distrito (148 500 hab) sin necesidad de agregar nuevo hardware, una utilización de al menos el 5% de conexiones concurrentes (8250) y 50 eNodosB como mínimo.
La solución deberá tener mecanismos de QoS para garantizar en cualquier momento, el tráfico de video vigilancia.
Con el fin de soportar futuras aplicaciones de voz y datos para funcionarios públicos, la solución deberá estar preparada para ser multi estándar y multi frecuencia sin necesidad de agregar hardware adicional.
La solución deberá permitir la creación de múltiples VLANs en capa 2 en un mismo CPE con segregación de calidad de servicio a nivel de aplicaciones. Podrá usar otro tipo de protocolo como, L2TP, GRE pero obligatoriamente deberá soportar transmisión broadcast
Con el fin de optimizar el uso de energía y espacio, la solución de core propuesta deberá consumir menos de 4KW y deberá ocupar como máximo 1 unidad de rack.

Tabla 25

Requerimientos generales de la capa de acceso

REQUERIMIENTOS GENERALES PARA LA CAPA DE ACCESO
Debido al clima del distrito, los EnodosB deberán soportar temperaturas de hasta 55º C
Los cables que se utilicen para interconectar los equipos outdoor e indoor deberán de ser tipo outdoor tipo apantallado con protección contra interferencias electromagnéticas y protector de línea pues en temporada de lluvias, el distrito es sometido constantemente a tormentas eléctricas.
Los EnodosB deberán operar en cualquier frecuencia asignada por el Estado Peruano para servicios de 4G/LTE y que utilizan los Operadores actualmente, y que sea compatible con 3GPP
Los EnodosB deberán soportar agregación de portadoras
Los EnodosB deberán tener una disponibilidad del 99.95%
Los EnodosB deberán soportar 450 Mbps de DL y 50 Mbps de UL
Co-localizado con cada eNodoB, el fabricante deberá proporcionar además un equipo router de la misma marca desde el cual se configurará una VPN capa 2 o 3 que terminará en el router que se instalará en el centro de control y video de la municipalidad

En la actualidad, los proveedores de Telefónica del Perú para tecnologías móviles son Ericsson, Huawei y Nokia. De estos tres fabricantes solo Nokia y Huawei ofrecen soluciones extremo a extremo incluyendo los routers co-localizados en los sitios del cliente para garantizar la total interoperabilidad de la red. Por temas de ahorro de energía y espacio en los centros de datos de la municipalidad distrital de San Juan Bautista, se elige al proveedor Nokia debido a que es el único que ofrece una solución de core que ocupa solo 1 unidad de rack para el core y consume solo 3795 Watts. Además, soporta 150 000 usuarios registrados y una simultaneidad de hasta 10 000 usuarios concurrentes ocupando un máximo de 50 eNodosB.

La solución de Nokia se divide en capas de la siguiente manera:

Tabla 26
Capa de core

Nombre del sistema	Modelo	Versión 3GPP	Características
Micro Core Network – MNC	MCN 17	13	Función de HSS (Subscriber Authentication y Subscriber Profile Management), PCRF (Provee reglas, políticas y QoS Management) de acuerdo al estándar 3GPP. Función de MME & S/PGW

Nota: Creación propia basada en Nokia 2018.

Tabla 27
Capa de acceso o RAN

Nombre del sistema	Modelo	Versión 3GPP	Características
Single Band Macro (3-Sector)	FRPA	13	FRPA/B 6TX RFM - AirScale - band 4 AWS

Nota: Creación propia basada en Nokia 2018.

Tabla 28
Capa de administración u OAM

Nombre del sistema	Modelo	Versión 3GPP	Características
NetAct	Compact	N/A	Proporciona mediación para informes LTE RAN y normalización de datos de red. Así como visión E2E de la red LTE y sus componentes.
NFM-P	5620 SAM	N/A	El NFM-P gestiona directamente los routers colocados con los eNodosB y está integrado en NetAct a través de la interfaz hacia el norte al módulo NetAct iSDK.

Nota: Creación propia basada en Nokia 2018.

La arquitectura de red propuesta, está de acuerdo con todos los estándares del mercado con base en las normas del 3GPP para despliegue de redes LTE de misión crítica. Así también, cumple con todos los protocolos de red estándares de mercado, también con base en el 3GPP, que permiten interoperabilidad con las distintas tecnologías y dispositivos disponibles en el mercado. Permitiendo así que la Municipalidad Distrital de San Juan Bautista pueda desplegar nuevas soluciones en su red de acuerdo al ecosistema disponible para la banda en cuestión.

Así como es manifestado en los requerimientos generales, La Municipalidad tendrá disponibles recursos de su propio core y RAN, así como cualquier otro elemento necesario para armar la red LTE privada, siendo innecesaria cualquier tipo de interconexión con redes externas a la red LAN municipal.

Figura 54. Arquitectura de la red LTE de la municipalidad

Creación propia basada en Nokia 2018.

4.2.3.2 Descripción de los componentes de la solución de core y acceso LTE

4.2.3.2.1 Micro core network o MCN

El MME, S-GW y P-GW, HSS y PCRF son funciones de red virtualizadas (VNF) disponibles en la plataforma MCN. Una vez desplegados, las VNF componen un Evolved Packet Core (EPC), cuya funcionalidad en la red de la municipalidad distrital de San Juan Bautista será soportada en un solo sistema independiente y redundante.

El Micro Core Network (MCN) entrega un Serving Gateway (S-GW), un Packet Data Network Gateway (P-GW), funciones de MME, HSS y PCRF en un formato compacto utilizando los flujos de software de grado de operador desarrollados para operadores de red móvil. MCN se entrega en un servidor comercial de alta calidad (COTS) de 4,45 cm / 1,75 pulgadas (1 RU) que se puede montar en un rack o gabinete estándar de 48,26 cm / 19 pulgadas. El MCN es compatible con el servidor de AirFrame Compute Node 6 Set, con los siguientes atributos:

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2680v3 (14 Core, 2,4 GHz, 120 W)
- Memoria de 128 GB DDR4
- 3 x 800 GB Disco Duro en modo RAID 1 utilizando el controlador Broadcom SAS3008
- 2 x 470 W fuentes de alimentación de CA redundantes de rápida instalación
- 2 puertos integrados de 10Gbps (10GE) SFP+

La arquitectura general del MCN así como sus interfaces internas y externas se muestran en la siguiente imagen:

Figura 55. Arquitectura del MCN

Creación propia basada en Nokia 2018.

4.2.3.2.2 eNodeB Flexi Multi Radio 10 BTS

La Flexi Multiradio 10 BTS está compuesta del Módulo de Sistema y de los diversos modelos de Módulos de RF y Cabezas Remotas de Radio (RRH por sus siglas en inglés “Radio Remote Head”). La arquitectura de la Flexi Multiradio 10 BTS está alineada con las características, requerimientos y funcionalidades de la 3GPP en su versión 12 y posteriores, proporcionando una plataforma a futuro para sistemas de radio avanzados. Aunado a lo anterior, la arquitectura es capaz de soportar las interfaces más comunes entre los módulos y las funciones definidas por la OBSAI (por sus siglas en inglés “Open Base Station Architecture Initiative”).

La plataforma Flexi Multiradio 10 BTS ofrece una capacidad flexible gracias a la utilización de los sub-módulos de extensión de capacidad (opcionales y no incluidos en esta oferta), los cuales son insertados dentro del Módulo de Sistema FSMF. Esto permitiría a la municipalidad aumentar la capacidad de su red de manera flexible y rentable de acuerdo a sus necesidades. Gracias a su posición de líder en el mercado, la Flexi Multiradio 10 BTS es capaz de proporcionar altos rendimientos de banda ancha móvil a un bajo costo, convirtiéndose así en una inversión a futuro.

La Flexi Multiradio 10 BTS soporta interfaces con redes 3G y 2G. Además, utiliza transporte basado en Ethernet, con soluciones de seguridad y sincronización basadas en TDM, señal de 2.048 MHz, sincronía por Ethernet, sincronización sobre paquetes (ToP por sus siglas en inglés “Timing over Packet”), GPS y GLONASS, entre otros. Las Flexi radios que se empelarán para el presente diseño comprenden los siguientes módulos:

MÓDULO DE SISTEMA FSMF:

El Módulo de Sistema FSMF es un módulo de 3U de ambiente Outdoor altamente integrado, perteneciente a la solución de la Flexi Multiradio 10 BTS. Dentro de sus funcionalidades se encuentran, el control de las telecomunicaciones, la operación y mantenimiento del sistema, la aplicación de banda base, la transmisión y la distribución de la potencia. El Módulo de Sistema también puede estar equipado con sub-módulos de extensión de capacidad (opcionales) los cuales brindan capacidad y potencia de procesamiento adicional y/o soporte de diferentes tecnologías de acceso de radio. La adición de los sub-módulos de capacidad en campo no afecta el tráfico en curso.

En la red LTE propuesta para la municipalidad, un Módulo de Sistema FSMF proporciona una capacidad de hardware de banda base para hasta tres celdas LTE con un ancho de banda de 20 MHz (3x20 MHz), con 450 Mbps en DL y 150 Mbps en UL, con soporte de MIMO.

El Módulo de Sistema FSMF se encuentra optimizado para el transporte sobre Ethernet, además de que el hardware soporta las siguientes funcionalidades de transporte:

- 1 x Puerto Ethernet 100/1000Base-T
- 1 x SFP óptico opcional (dependiendo de la configuración)
- Diferentes métodos de sincronía, entre los que resaltan, Protocolo IEEE1588-2008, Synchronous Ethernet, 1PPS y 2.048 MHz
- Interfaces integradas S1/X2 sobre Ethernet
- Capacidad del HW de 2Gbps DL+UL

UNIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA FPFC:

El módulo FPFC es una unidad de distribución de energía o PDU (por sus siglas en inglés “Power Distribution Unit”) externa e independiente, de 19 pulgadas de ancho y 2U, para ambientes Outdoor. La FPFC es de uso general y posee una protección Clase II para subidas de voltaje, con un nivel de protección de 15 KA. En caso de que la FPFC esté ubicada a más de diez metros (32.81 pies) de distancia del dispositivo alimentado se podría requerir el uso de unidades externas para la protección de subidas de voltaje (por ejemplo, unidades FSEP o FSES de Nokia).

La FPFC cuenta con seis puertos de salida para Módulos de RF, Cabezas Remotas de Radio, Módulos de Sistema o cualquier dispositivo en sitio que sea alimentado con -48V de DC. También se puede utilizar en la parte superior del mástil de una antena como dispositivo de distribución de energía. Posee una alarma externa para indicar la condición del dispositivo de protección contra subidas de voltaje u OVP (por sus siglas en inglés, “Over Voltage Protection”). Con la finalidad de tener más de seis salidas de energía, es posible interconectar dos FPFCs utilizando la misma fuente de energía.

MÓDULO DE RF PARA 6TX EN BANDA 1700 - 2100 MHz FRPB:

La solución de Nokia para la red LTE en la banda AWS de la municipalidad distrital de San Juan Bautista incluye el Módulo de RF de 6TX con seis amplificadores ópticos (PAs por sus siglas en inglés Power Amplifiers), FRPB.

El Módulo de RF FRPA soporta uno, dos o tres sectores con un ancho de banda de 35 MHz y con una potencia de salida de hasta 40+40 W con 2TX MIMO en los conectores de la antena de la estación base. Desde la perspectiva de HW puede ser utilizado como un RRH de tres sectores de alta potencia, con una configuración máxima de 4x40 W con 4TX MIMO y 4RX (4TX MIMO y 4RX son distintas funcionalidades de SW).

El Módulo de RF FRPB proporciona una potencia de salida de 6x40 W y soporta la sub-banda baja de 35 MHz de la banda X estandarizada por la 3GPP en los 1700 y 2100 MHz, además de contar con las siguientes características:

- Soporta las configuraciones 1, 1+1 o 1+1+1 celdas de LTE @ máx. 20 MHz de ancho de banda y 2TX MIMO/ 2RX
- Soporta las configuraciones 2x20 MHz + 1x10 MHz, 2x15 MHz, 3x10 MHz
- Soporta la funcionalidad “Operator Sharing”
- Ancho de Banda de 20 MHz, UL 2110-2130 MHz
- Ancho de Banda de DL de 20 MHz, de 1710 -17230 MHz
- 8, 20 o 40 W con modo 1TX por sector (mediante licencias de SW)
- 8+8, 20+20 o 40+40 W con modo 2TX por sector (mediante licencias de SW de potencia y MIMO)
- HW preparado para soportar 1 sector 40+40 W 4TX MIMO/4RX
- Soporte de enlaces ópticos de 6 Gbps (OBSAI)
- Conector RET

Cabe mencionar que el Módulo de RF FRPB puede ser utilizado como sitio “feederless” (cable óptico y de DC de hasta 200 m) en lugar de utilizar 3 RRH’s para soportar la configuración 1+1+1 con 2TX MIMO.

Finalmente, se resume la componente de radio de la solución con las siguientes características:

eNodoB:

- Versión de Software FDD LTE 18A
- Soporte de 3 sectores de 120° en la banda de 7100 – 2100 MHz, 40 W de potencia, 25 MHz de ancho de banda y soporte MIMO 2x2
- Sincronización mediante GPS con antena receptora externa FYGB
- Se asumen 50 m entre el Módulo de Sistema FSMF y el Módulo de RF FRPA
- 60 usuarios Conectados por sitio
- Throughput de 450 Mbps en DL y 50 Mbps en UL
- Cableado RJ45 de 15 m para backhaul (FTCR)
- Soporte de Modulación QPSK y superiores

4.2.3.2.3 UE – Alcatel one touch W800

Estos equipos son módem LTE que irán conectados en las computadoras dentro de las unidades de patrullaje y dentro del centro de gestión de imágenes de la municipalidad. Soportan los siguientes estándares: FDD LTE, DC-HSPA+, HSPA+, HSUPA, HSDPA, UMTS, EDGE, GRPS en bandas 700/800/850/900/AWS/1800/1900/2100/2600 MHz. Se conectan a las computadoras mediante un puerto USB versión 2.0 en adelante.

A continuación, se presentan los cuadros las principales especificaciones ofrecidas por los fabricantes de cada elemento de la capa de acceso de la solución LTE, los eNodosB NOKIA y los UE Alcatel One Touch.

Tabla 29
Especificaciones del UE Alcatel One Touch W800

MODEM LTE (ALCATEL ONE TOUCH W8000)			
TRANSMISIÓN		RECEPCIÓN	
Max. Potencia de TX	25 dbM	Cabecera de CTRL Channel	1 db
Ganancia	0 Dbi	Ruido térmico	-102.8 db
Pérdida natural	0 dbi	Ruido del receptor	-95 dbm
EIRP	21 dbm	SINR	-8 db
		Pérdida Natural	0 db
		D.E. de Fading	8 db
		Margen de interferencia	3 db
		Sensitividad	-106.8 dbm
		Figura de Ruido	8 db

Nota: Creación propia basada en Alcatel 2018.

Tabla 30
Especificaciones del eNodeB Flexi Multiradio 10 BTS

eNodeB (NOKIA Flexi Multi Radio 10 BTS)			
TRANSMISIÓN		RECEPCIÓN	
Max. Potencia de TX	49 dbm	Ganancia de Antena	20 dbi
Ganancia	20 dbi	Ganancia de MHA	3 db
Pérdida de cable	1 db	Ganancia de soft handover	0 db
EIRP	60 dbm	D.E. Shadowing	6 db
		Ruido Térmico	-122 db
		Ruido de Receptor	-120 dbm
		SINR	-5 db
		Margen de Interferencia	0.5 db
		Pérdidas del cable	0 db
		Sensitividad	-128 dbm
		Figura de Ruido del eNodeB	1 db
		Margen de rápido desvanecimiento	0 db
		Maxima pérdida Permitida	170 dbm

Nota: Creación propia basada en Alcatel 2018.

4.2.3.3 Ubicación de los eNodosB

Debido a que existen pocas construcciones de más de dos pisos en el distrito y al hecho de que la mayoría de las casas tienen paredes de madera es posible despreciar las pérdidas de potencia en la señal relacionadas con estos. Siendo así, se facilita la elección de lugares donde se pueden instalar las antenas LTE. Para tal fin, se escogió seis puntos que cumplen con las siguientes características:

- Están muy cercanos a puntos de interconexión con redes IP-MPLS de Telefónica del Perú.

- Presentan infraestructura alta sobre la cual se puede instalar mástiles o presentan espacio suficiente para implementar torres ventadas.
- No se encuentran rodeados de edificios altos.
- La distancia entre un sitio y otro debe estar en el rango entre el radio mínimo y máximo de cobertura de los eNodosB.

La siguiente tabla muestra la ubicación de los lugares escogidos:

Tabla 31
Ubicación tentativa de los eNodosB

TIPO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD
CELDA 1	MUNICIPALIDAD DE SAN JUAN BAUTISTA	-3.770829	-73.280397
CELDA 2	CASA ALTA	-3.773836	-73.267257
CELDA 3	SANTO TOMAS	-3.774803	-73.299701
CELDA 4	SUR CENTRO	-3.78497	-73.28669
CELDA 5	AEROPUERTO	-3.784576	-73.302356
CELDA 6	SERENAZGO POLICÍA MUNICIPAL PARTICIPACIÓN	-3.799184	-73.306864

A continuación, se presenta la ubicación de estos sitios respecto del mapa del distrito de San Juan Bautista.

Figura 56. Ubicación tentativa de los eNodosB en el mapa del distrito

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Análisis de costos

Para determinar el costo total del proyecto se analizará el CAPEX (Capital Expenditures) y el OPEX (Operation Expenditures). El primero se refiere a los gastos o inversiones de capital mientras que el segundo hace referencia a los gastos comunes durante la operación y el mantenimiento. Si bien la implementación del proyecto no forma parte del alcance de este trabajo, es parte importante del diseño calcular los recursos humanos y materiales que se requerirán de modo que se pueda cuantificar el CAPEX y OPEX que implica la implementación y operación de la solución propuesta.

La componente de video vigilancia será una inversión directa de la municipalidad en el sentido de que realizará la compra a los proveedores de esta solución tanto de productos como de servicios.

Para la componente de transmisiones LTE, el espectro radioeléctrico para el caso de la banda 1700 MHz y 2100 MHz está bajo administración de Telefónica del Perú y serán ellos quienes deben operar las telecomunicaciones que se sustenten en esa banda, la infraestructura de red necesariamente debe ser inversión del operador⁵⁵. Tal como figura en el contrato de concesión única para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones y asignación del bloque A de la banda 1710-1770 MHz y 2110 - 2170 MHz a nivel nacional, firmado entre el estado peruano y Telefónica Móviles la cláusula 8 de Obligaciones y derechos de la sociedad concesionaria, en su punto 8.2; Inicio de la prestación del servicio concedido, página 21 indica que son responsabilidad del operador: la instalación, operación y administración de los servicios de telecomunicaciones. Para fines de establecer el monto referencial con el que la municipalidad de San Juan Bautista deberá solicitar este servicio puntual de interconexión de cámaras, unidades de patrullaje y centro de control, se presentan también los costos de productos y servicios del sistema de transmisión LTE.

⁵⁵ PROINVERSIÓN 2013: 21.

4.3.1 Capex del proyecto

Todos los costos que se presentan en adelante se encuentran expresados en USD y no incluyen IGV.

4.3.1.1 Costos del sistema de video vigilancia ip

4.3.1.1.1 Costos del equipamiento

Tabla 32

Costos del equipamiento de video vigilancia

ITEM	DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
1	CÁMARA FIJA	AXIS	Q1615-E Mk II	111	\$ 1,300.00	\$ 144,300.00
2	CÁMARA PTZ	AXIS	Q6000-E Mk II	51	\$ 1,621.00	\$ 82,671.00
3	SERVIDOR VIDEO: PLATAFORMA	GENETEC O&M HP	OMNICAST NOVA BCD524-GN-130-144TB	1	\$120,000.00	\$ 120,000.00
4	GESTOR DE VIDEO: BLADES	HP	761497-001 6TB 7.2K RPM 3.5" SAS 6G HDD	22	\$ 562.34	\$ 12,371.48
5	GESTOR DE VIDEO: LICENCIAMIENTO	GENETEC	Lic. Gen Smart Recovery	1	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00
6	GESTOR DE VIDEO: LICENCIAMIENTO	GENETEC	Lic. Gen Smart VMC	1	\$ 8,640.00	\$ 8,640.00
7	GESTOR DE VIDEO: LICENCIAMIENTO	GENETEC	Lic. Gen Smart Connect	162	\$ 7.45	\$ 1,206.90
8	GESTOR DE VIDEO: LICENCIAMIENTO	GENETEC	Lic. Gen Smart Control	162	\$ 7.45	\$ 1,206.90
9	LICENCIAS DE USUARIO	GENETEC	WORKSTATION SMARTVIEW	25	\$ 15.25	\$ 381.25
10	MONITORES	AOC	AOC 50	13	\$ 480.00	\$ 6,240.00
11	WORKSTATIONS	HP	HP Z240 WORKSTATION inc. SO WIN PRO	5	\$ 1,280.00	\$ 6,400.00
12	LAPTOPS	HP	HP EliteBook 850 inc. SO WIN 7	20	\$ 1,000.00	\$ 20,000.00
13	SWITCHES	CISCO	Switch Cisco 3560-24PST-L	2	\$ 2,300.00	\$ 4,600.00

TOTAL EQUIPAMIENTO DEL SISTEMA DE VIDEO VIGILANCIA	\$ 415,417.53
---	----------------------

Nota: Elaboración propia basada en cotización de Axis

4.3.1.1.2 Costos de servicios del sistema de video vigilancia

Tabla 33

Costos de servicios para el sistema de video vigilancia

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
16	Technical Site Surveys	162	\$ 372.00	\$ 60,264.00
17	Servicios Profesionales HLD y LLD	1	\$ 12,307.69	\$ 12,307.69
18	Instalación de Cámaras	162	\$ 518.00	\$ 83,916.00
19	Instalación del centro de control	1	\$ 4,000.00	\$ 4,000.00
20	Comisionamiento del sistema	1	\$ 5,000.00	\$ 5,000.00
21	Entrenamiento	1	\$ 8,000.00	\$ 8,000.00
TOTAL SERVICIOS DEL SISTEMA DE VIDEO VIGILANCIA				\$ 173,487.69

Nota: Elaboración propia basada en cotización de Axis

4.3.1.2 Costos del sistema de transmisión LTE

Tabla 34

Costos del equipamiento LTE

ITEM	DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
1	GESTOR: SERVIDOR NOKIA LTE OMS	NOKIA O&M HP	DL 360	1	\$ 2,500.00	\$ 2,500.00
2	GESTOR: SW NOKIA LTE OMS R18	NOKIA	OMS REL 18	1	\$ 12,200.00	\$ 12,200.00
3	CORE: HARDWARE	NOKIA	MCN RED CONFIG	1	\$ 412,000.00	\$ 412,000.00
4	CORE: SOFTWARE	NOKIA	MCN REL 18	1	\$ 15,000.00	\$ 15,000.00
5	CORE: LICENCIAMIENTO	NOKIA	eNb LTU	6	\$ 12,000.00	\$ 72,000.00
6	CORE: HABILITADOR DE GEO REDUNDANCIA	NOKIA	MCN REL 18	1	\$ 42,000.00	\$ 42,000.00
7	CORE: HABILITADOR DE GESTION DE RAN	NOKIA	MCN REL 18	1	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
8	CORE: DATA CENER HW	NOKIA	MCN RED CONFIG DC	1	\$ 120,000.00	\$ 120,000.00
9	eNb: MÓDULO DE BANDA BASE	NOKIA	LTE Flexi FDD BTS SM HW	6	\$ 4,500.00	\$ 27,000.00
10	eNb: MÓDULOS RF	NOKIA	LTE Flexi FDD BTS RF HW	18	\$ 4,000.00	\$ 72,000.00
11	eNb: SW BASE DE ENODOB	NOKIA	Essential Package FDD LTE SW	6	\$ 3,000.00	\$ 18,000.00
12	eNb: SW DE SINCRONIZACIÓN	NOKIA	GPS Synchronization SW	6	\$ 600.00	\$ 3,600.00
13	eNb: SW DE CAPACIDAD	NOKIA	Capacity Licenses SW	120	\$ 20.00	\$ 2,400.00
14	eNb: SW DE QoS	NOKIA	QoS SW	6	\$ 600.00	\$ 3,600.00
15	eNb: Antenas	KATHERIN	XXPol (Integrated FlexRET, replaceable) AWS	36	\$ 2,500.00	\$ 90,000.00
16	UE – Alcatel One Touch W800	ALCATEL-ONE TOUCH	W800	185	\$ 79.00	\$ 14,615.00
17	CEL SITE ROUTER	NOKIA	SAR-A	8	\$ 2,325.00	\$ 18,600.00
TOTAL EQUIPAMIENTO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN LTE					\$ 945,515.00	

Nota: Elaboración propia basada en cotización de Nokia

4.3.1.2.1 Costos de servicios del sistema de transmisión LTE

Tabla 35

Costos de servicios del sistema LTE

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
18	Technical Site Surveys	7	\$ 472.00	\$ 3,304.00
19	Servicios Profesionales HLD y LLD	1	\$ 12,307.69	\$ 12,307.69
18	Instalación Y Comisionamiento del core	1	\$ 8,000.00	\$ 8,000.00
19	Instalación Y Comisionamiento de eNb Y CS	6	\$ 12,000.00	\$ 72,000.00
20	Materiales de Instalación	1		\$ -
21	Integración de los sistemas	1	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00
22	Optimización RF	1	\$ 40,000.00	\$ 40,000.00
23	Drive testing	1	\$ 18,000.00	\$ 18,000.00
24	Entrenamiento	1	\$ 12,000.00	\$ 12,000.00
TOTAL SERVICIOS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN LTE				\$ 245,611.69

Nota: Elaboración propia basada en cotización de Nokia

4.3.2 OPEX del proyecto

Se presupuesta que el proyecto de implementación de la solución tomará seis meses. Las estimaciones consideran que el despliegue del sistema de video vigilancia durará 5 meses y el despliegue del sistema de transmisión LTE 6 meses desarrollándose ambos en paralelo y teniendo como punto final, la aceptación total del sistema integrado. Se recomienda a la municipalidad de San Juan Bautista que, sin embargo, se asegure de que el soporte brindado por los fabricantes sea por el lapso de al menos de un año. El cálculo del Opex entonces se realiza considerando el primer año a partir de que se emiten las órdenes de compra por parte de la municipalidad. Todos los costos son calculados en USD y no incluyen IGV.

4.3.2.1 OPEX de la oficina de gestión del proyecto

Tabla 36
OPEX de la PMO

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
1	Gerente de Proyecto	1	\$49,000.00	\$49,000.00
2	Gestor de Calidad	1	\$24,500.00	\$24,500.00
3	gerente técnico del Proyecto	1	\$42,000.00	\$42,000.00
4	Jefe de Proyecto de video vigilancia	1	\$30,000.00	\$30,000.00
5	Jefe de Proyecto de red de transmisión LTE	1	\$35,000.00	\$35,000.00
6	Supervisores de campo video vigilancia	3	\$16,000.00	\$48,000.00
7	Supervisores de campo LTE	3	\$20,000.00	\$60,000.00
TOTAL SERVICIOS PMO				\$288,500.00

Nota: Elaboración propia basada en cotizaciones de Axis y Nokia

4.3.2.2 OPEX de la solución completa

Tabla 37
OPEX de la solución completa

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNIT	COSTO TOTAL
1	Jefe del área de transmisiones Inalámbricas (AÑO1)	1	\$72,000.00	\$72,000.00
2	Analistas de transmisiones inalámbricas (AÑO1)	2	\$48,000.00	\$96,000.00
3	Administrador del sistema de video vigilancia (AÑO1)	1	\$72,000.00	\$72,000.00
4	Técnico del sistema de video vigilancia (AÑO1)	1	\$36,000.00	\$36,000.00
5	Soporte Técnico del sistema de video vigilancia (AÑO 1)	1	\$5,420.80	\$5,420.80
6	Soporte Técnico de la solución LTE (AÑO 1)	3	\$12,366.50	\$37,099.50
OPEX DE LA SOLUCIÓN				\$318,520.30

Nota: Elaboración propia basada en cotizaciones de Axis y Nokia

4.3.3 Resumen de costos de la solución

Tabla 38

Resumen de costos de la solución completa

TIPO	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
C A P E X	SISTEMA DE VIDEO VIGILANCIA IP: EQUIPAMIENTO	\$ 415,417.53
	SISTEMA DE VIDEO VIGILANCIA IP: SERVICIOS	\$ 173,487.69
	SISTEMA DE TRANSMISIÓN LTE: EQUIPAMIENTO	\$ 945,515.00
	SISTEMA DE TRANSMISIÓN LTE: SERVICIOS	\$ 245,611.69
TOTAL CAPEX		\$ 1,780,031.91

TIPO	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
O P E X	RECURSOS PROPIOS MDSJB	\$276,000.00
	PMO	\$288,500.00
	SERVICIOS DE SOPORTE VIDEO VIGILANCIA IP	\$5,420.80
	SERVICIOS DE SOPORTE LTE	\$37,099.50
TOTAL OPEX		\$ 607,020.30

5. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

5.1 Descripción de los métodos de validación a ejecutar

A lo largo del desarrollo de la presente propuesta se han presentado dos sistemas, el primero, el sistema de video vigilancia IP, representa la aplicación final y el fundamento del por qué diseñar un sistema de transmisión basado en tecnología LTE, los resultados que se obtendrán del análisis de throughput de este sistema precisamente son datos importantes para determinar la viabilidad de aquella red de transmisión. Se partirá entonces del análisis de consumo de datos y almacenamiento requerido por las cámaras de video vigilancia IP, el consumo de datos requerido en las unidades móviles de seguridad ciudadana y los requerimientos de throughput y almacenamiento del sistema de gestión del video, luego se finalizará con un estudio de potencias y cobertura requeridos para los eNodosb.

A continuación, se describen los métodos de validación de la solución propuesta en relación con los indicadores de logro definidos para el presente proyecto.

5.1.1 Cálculo de throughput para el sistema de video vigilancia ip

Para realizar el estudio de cómo el diseño propuesto para el sistema de video vigilancia IP cumple con los objetivos del proyecto se propone el cálculo teórico del consumo de datos por cada cámara considerando como datos de entrada el tamaño de cada frame, la frecuencia de muestreo, la resolución deseada y el método de compresión a utilizar. Los resultados no deben ser muy distintos de los que se obtuvieron utilizando los simuladores de la marca elegida y que se muestran en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 del presente documento.

5.1.2 Cálculo de potencias, cobertura y throughput del sistema de transmisión lte

Estos cálculos consideran dos etapas. La primera es el cálculo teórico de cobertura del eNodoB y la segunda es el análisis del perfil de radiación de los eNodosB tal como se plantea su distribución a lo largo del distrito de San Juan Bautista.

Para realizar el cálculo teórico de cobertura del eNodoB se empezará calculando las potencias mínimas requeridas por el transmisor y receptor en el sistema de comunicaciones. Este cálculo se denomina Link Budget y para el caso del presente proyecto se utilizan como parámetros de entrada los datos de los fabricantes de módems LTE, los datos de los fabricantes de eNodosB y parámetros del entorno como la pérdida por penetración causada por el efecto de shadowing⁵⁶. El estudio del Link Budget nos permite calcular la cobertura máxima de un sistema radiante tomando como métrica el radio de cobertura circular.

El primer paso para realizar este cálculo será establecer las pérdidas por propagación en el espacio libre. El Shadowing o enmascaramiento, es un fenómeno producido por una falta de línea de vista directa a causa de los obstáculos que interfieren en el trayecto de propagación⁵⁷. Al ser cada uno de estos obstáculos de una densidad distinta y aleatoria, el valor del enmascaramiento también será aleatorio y provocará cambios en la media de la potencia de la señal recibida. Aplicando el teorema del límite central el enmascaramiento se comportará como una distribución Gaussiana. En este caso al desarrollar el proyecto en la selva, no hay construcciones importantes que obstaculicen la línea de vista y que impidan la penetración de la señal celular ya que las alturas de los edificios en su gran mayoría no sobrepasan los 4 m y el material de construcción más común es la madera. El resultado de este estudio nos arrojará el área de cobertura de cada eNodoB y así, en relación con el área total del distrito de San Juan Bautista, nos permitirá estimar la cantidad necesaria de estas celdas LTE.

⁵⁶ Montenegro 2005: 20.

⁵⁷ Goldsmith 2005: 27.

Para realizar el análisis del perfil de radiación del sistema de transmisión LTE propuesto se utilizará la distribución tentativa que se definió en la imagen 4.4. Con el fin de validar que esta elección es correcta existen varios métodos entre los que destaca el uso de herramientas de diseño como Radiogis, LinkPlanner, Spider de Nokia, Xirio, entre otros. También es posible hacer el cálculo manual utilizando modelos de propagación empíricos como el modelo Hata que distingue entre tamaños de ciudades o zonas rurales y urbanas para sus cálculos o el modelo Lee que ajusta las predicciones de acuerdo con rectas de predicción lineal. También es posible utilizar modelos semi empíricos como el Cost 231 que toma en consideración las características topográficas del terreno y la altura de las antenas para sus cálculos, o determinísticos que se basan en la teoría de rayos para los cálculos.

Para el presente trabajo, se hizo uso de la herramienta Xirio Online la cual permite realizar la configuración sector por sector de cada eNodeB. Xirio hace uso de un motor de altimetría mundial llamado Aptica, con este motor determina el ancho de las calles, la altura de los edificios y la topografía del lugar para realizar los cálculos y diagramas de cobertura.

El cálculo del throughput de cada eNodeB es un procedimiento posterior al despliegue de la red, se utilizan los drive tests que consisten en montar sobre una unidad móvil, un terminal LTE con capacidad de análisis de distintos parámetros como ancho de banda, latencia, jitter y potencia de recepción entre otros. Como el presente proyecto plantea solamente el diseño y no la implementación de la red LTE el cálculo se hará de manera teórica en función de la cobertura del eNodeB y los elementos que se conecten a la red bajo la influencia de la misma.

5.2 Ejecución de los procedimientos de validación

5.2.1 Cálculos para el sistema de video vigilancia IP

5.2.1.1 Cálculo de throughput de una cámara IP

Se ha establecido anteriormente por el requerimiento de HD para las imágenes de la solución, que la definición requerida para las cámaras de video es de 720p, la cual maneja 720 líneas horizontales. Se define entonces la cantidad de píxels que emplea un cuadro en este tipo de definición.

$$R = 1280 \cdot 720 \text{ pix}$$

$$R = 921\,600 \text{ pix}$$

Cada pixel se codifica con 8 bits o 1 byte, sin embargo, al utilizar un codificador H.264, se puede decir que por cada pixel se requieren solo 0.14 bits⁵⁸. Entonces un frame completo ocupa:

$$FS = 0.14 \cdot 921\,600 = 129\,024 \text{ bits}$$

Considerando una tasa de cuadros FPS de 20 c/s, el throughput requerido por cada cámara se calcula:

$$BW(Mbps) = \frac{FS(Kb) \cdot 1024 \cdot 8 \cdot FPS}{1000000}$$

⁵⁸ Diepold 2005: 204.

$$BW(Mbps) = \frac{129 \cdot 1024 \cdot 8 \cdot 20}{1000000}$$

$$BW = 21.14 \text{ Mbps}$$

Para optimizar el throughput, adicionalmente haremos uso del nivel de compresión 10 que aproximadamente reduce el tamaño de un frame a su décima parte⁵⁹. Con esto tenemos finalmente el throughput real por cada cámara.

$$BW_c = 2.114 \text{ Mbps}$$

De esta manera cumplimos con el requerimiento mínimo de 1.49 Mbps para soportar video en calidad 720p de alta definición y estamos por debajo de los 50 Mbps que establece para el uplink el estándar 3GPP.

5.2.1.2 Cálculo del throughput para los ue de los patrulleros

Hemos definido que cada patrullero tendrá visibilidad simultánea de los cuatro cuadrantes respecto de su ubicación para fines de optimización de las labores de patrullaje. Siendo así, los UE instalados en cada unidad deberán soportar el streaming de 4 cámaras a la vez.

$$STR_p = 4 \cdot BW_c$$

$$STR_p = 8.456 \text{ Mbps}$$

De esta manera se cumple que el throughput de DL para cada UE instalado en los patrulleros cumple con los requerimientos de la tabla 1.4 que indica que el throughput de downlink de los UE LTE que estarán instalados en los patrulleros deberá ser como mínimo de 5.96 Mbps para

⁵⁹ JVSG 2018.

soportar la visualización simultánea de hasta 4 streamings provenientes de 4 cámaras IP y como máximo de 450 Mbps para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP rel 10.

5.2.1.3 Cálculo del throughput para el gestor de video

El gestor de video deberá soportar la carga de todas las cámaras en simultáneo, el ráfico que consumirá se define por:

$$\text{Traf} = \text{cam} \cdot \text{BWc}$$

$$\text{Traf} = 162 \cdot 2.114 \text{ Mbps}$$

$$\text{Traf} = 342.468 \text{ Mbps}$$

Si bien el gestor de video se encontrará en las instalaciones de la municipalidad y contará con acceso a banda ancha fija a través de las redes IP-MPLS del proveedor de servicios, es necesario que en un futuro pueda implementarse un canal de conectividad redundante móvil mediante protocolo IP. Siendo así al ser el throughput de 342.468 Mbps se cumple con el indicador de logro que menciona que el throughput de downlink requerido por el gestor de video deberá ser menor a 450 Mbps de acuerdo con el estándar 3GPP.

5.2.1.4 Resumen del sistema de video vigilancia ip y cumplimiento con los indicadores

De acuerdo con la tabla 4 que nos muestra los objetivos del proyecto y los indicadores de logro tenemos la siguiente tabla:

Tabla 39

Cumplimiento de objetivos relacionados con el sistema de video vigilancia IP

Objetivo Específico	Indicador de logro	Valor conseguido en Mbps	Cumplimiento
Dimensionar los requerimientos de throughput de la plataforma de video IP para transmisión de imágenes en HD a 720p.	El throughput de uplink para cada cámara, independientemente del tipo, deberá ser de 1.49 Mbps como mínimo para soportar calidad 720p y de 50 Mbps como máximo para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP.	2.114	Cumple
	El throughput de downlink de los UE LTE que estarán instalados en los patrulleros deberá ser como mínimo de 5.96 Mbps para soportar la visualización simultánea de hasta 4 streamings provenientes de 4 cámaras IP y como máximo de 450 Mbps para cumplir con las especificaciones del estándar 3GPP.	8.456	Cumple
	El throughput de downlink requerido por el gestor de video deberá ser menor a 450 Mbps de acuerdo con el estándar 3GPP .	342.468	Cumple

5.2.2 Cálculos para el sistema de transmisión LTE

5.2.2.1 Cálculos teóricos de cobertura

Considerando la geografía del distrito de San Juan Bautista y las características estructurales de las construcciones, se puede definir el efecto de shadowing con un valor de cobertura de casi el 100% por lo que se utilizará para los cálculos un valor práctico de 95%.

La siguiente tabla muestra los valores de shadowing, también llamado Log normal, en relación a la probabilidad de cobertura.

Tabla 40
Margen de shadowing normalizado

MARGEN DE SHADOWING NORMALIZADO	PROBABILIDAD DE COBERTURA
1.2	88.49%
1.25	89.44%
1.3	90.32%
1.35	91.15%
1.4	91.92%
1.45	92.65%
1.5	93.32%
1.55	93.94%
1.6	94.52%
1.65	95.05%

Nota: basado en Milla 2012

Como se ha establecido utilizar una probabilidad de cobertura del 95%, el valor más cercano del margen de shadowing normalizado es de 1.65. Con este valor se calcula el margen de Log Normal el cual es un parámetro importante para el Link Budget.

$$MdSh(dB) = MdShN \cdot \sigma(MdSh)$$

$$MdSh(dB) = 1.65 \cdot 8Db = 13.2dB$$

Será necesario tener los datos de relación señal-ruido (SINR) y code rate del esquema de modulación que utilizaremos ya que estos son importantes para los cálculos posteriores de cobertura.

De acuerdo con la herramienta de cálculo que ofrece la IEEE para el SINR en relación al esquema de modulación, obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 41
Valores de SINR para modulación 16QAM

MODULACIÓN 16QAM		
CODE RATE	SINR (dB)	IM (dB)
1/2	7.9	3
2/3	11.3	
3/4	12.2	
4/5	12.8	

Nota: Basado en IEEE 2018.

Se aprecia que los valores mínimo y máximo para el SINR son de 7.9 y 12.8 dB respectivamente. Con estos valores, se calculará la sensibilidad máxima y mínima que deberá tener el receptor de los equipos de transmisión LTE.

5.2.2.1.1 Link budget de UPLINK

Utilizamos la fórmula para el cálculo del piso de ruido y sensibilidad del receptor⁶⁰:

$$S=K+T+10\cdot\log(B)+NF+SINR+IM-Mint-3$$

Donde:

K: Piso de ruido en el éter⁶¹ = -174 dBm

T: Temperatura Promedio en K normalizada

B: Ancho de banda del receptor

NF: Figura de ruido del receptor

SINR: Relación señal ruido

Mint: Margen de Interferencia

IM: Margen de Implementación

Tomando como temperatura promedio en el distrito de San Juan Bautista los 30°C, tenemos:

$$\begin{aligned}t &= 30 + 273 \text{ K} \\t &= 303 \text{ K}\end{aligned}$$

Normalizando:

$$\begin{aligned}T &= 10 \cdot \log(303) \\T &= 24.8\end{aligned}$$

Se obtiene que:

$$S = -174 + 24.8 + 10 \cdot \log(20 \cdot 10^6) + 1 + SINR + 3 - 0.5 - 3$$

Anteriormente, en la tabla 12.8 se observa que para un valor de IM de 2.5 en modulación 16QAM tenemos un valor máximo y un valor mínimo de SINR: 12.8 y 7.9 respectivamente, con estos datos, procedemos a hacer el cálculo de los casos máximo y mínimo:

$$\begin{aligned}S_{min} &= -174 + 24.8 + 10 \cdot \log(20 \cdot 10^6) + 1 + 7.9 + 3 - 0.5 - 3 \\S_{min} &= -107.53 \text{ dBm} \\S_{max} &= -174 + 24.8 + 10 \cdot \log(20 \cdot 10^6) + 1 + 12.8 + 2.5 - 0.5 - 3\end{aligned}$$

⁶⁰ Mazar 2016: 173.

⁶¹ Sikula 2005: 284.

$$S_{\max} = -102.637 \text{ dBm}$$

Se procede ahora al cálculo de la pérdida en el espacio que viene definida por la fórmula⁶²:

$$L = P_{tx} - S_{rx} - P_{cc} + G_a - M_{dsh} - P_{int} - P_{mat} + MHA$$

Donde:

P_{tx} : Potencia de Transmisión

S_{rx} : Sensibilidad del receptor

P_{cc} : Pérdida por cables y conectores

G_a : Ganancia de la antena

M_{dsh} : Margen de Shadowing

P_{int} : Pérdida de Interferencia

P_{mat} : Pérdida por Materiales

MHA : Margen del amplificador de cabecera.

$$L_{\max} = 25 + 107.53 - 0 + 20 - 13.2 - 0.5 - 5 + 2.5 = 136.33$$

$$L_{\min} = 25 + 102.637 - 0 + 20 - 13.2 - 0.5 - 5 + 2.5 = 131.43$$

Finalmente, para el Uplink se resume la siguiente tabla:

Tabla 42
Link Budget de UPLINK

Característica	Min (dBm)	Max (dBm)
Sensibilidad del receptor	-102.637	-107.53
Pérdida en el espacio	131.43	136.33

⁶² ITU-T 1994: 3.

5.2.2.1.2 Link budget de DOWNLINK

Partiendo de la expresión:

$$S = K + T + 10 \cdot \log(B) + NF + SINR + IM - Mint - 3$$

Tenemos:

$$\begin{aligned} S_{min} &= -174 + 24.8 + 10 \cdot \log(20 \cdot 10^6) + 8 + SINR + 3 - 0.5 - 3 - 3 \\ S_{min} &= -103.53 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{max} &= -174 + 24.8 + 10 \cdot \log(20 \cdot 10^6) + 8 + SINR + 3 - 0.5 - 3 - 3 \\ S_{max} &= -98.63 \text{ dBm} \end{aligned}$$

Se calcula ahora las pérdidas en el espacio:

$$L = P_{tx} - S_{rx} - P_{cc} + G_a - M_{dsh} - P_{int} - P_{mat} + MHA$$

Obteniendo los siguientes valores:

$$L_{max} = 49 + 103.53 - 1 + 20 - 13.2 - 0.5 - 0 + 3 = 160.83$$

$$L_{min} = 49 + 98.63 - 1 + 20 - 13.2 - 0.5 - 0 + 3 = 155.93$$

Finalmente, para el Downlink se resume la siguiente tabla:

Tabla 43
Link Budget de DOWNLINK

Característica	Min (dBm)	Max (dBm)
Sensibilidad del receptor	-103.53	-98.63
Pérdida en el espacio	155.93	160.83

5.2.2.1.3 Área teórica de cobertura del eNodoB

Se utilizará como base para el cálculo de la cobertura teórico los datos obtenidos para el uplink, esto debido a que es posible realizar mejoras posteriores en el sistema de transmisión LTE para mejorar las potencias de entrega en los eNodosb, en el caso contrario, en los UE no es posible debido a que los terminales vienen con una configuración de hardware pre-establecida y cualquier cambio significaría cambiar por completo el equipo.

Como alternativa para calcular las pérdidas en el espacio, la 3GPP recomienda el uso de la siguiente fórmula:

$$L=40\cdot(1-0.004\cdot Aa)\cdot\log(R)-18\cdot\log(Aa)+21\cdot\log(f)+80$$

Donde:

L: Pérdida en el espacio

Aa: Altura promedio del edificio + Altura promedio de la antena (m)

R: Radio de cobertura (Km)

f: frecuencia (MHz)

Como ya se ha analizado anteriormente, el distrito cuenta en su mayoría con edificaciones que no superan un piso de altura (3m). El edificio de la municipalidad es de tres pisos y una altura de 9m, se plantea la instalación de una torre ventada de 6m de altura sobre el techo de la institución, la cual será administrada por la misma. Siendo así, Aa tendrá un valor máximo de 15m y este será el valor utilizado para los cálculos.

Se estableció que el sistema de transmisión LTE trabajará en banda AWS por lo que f tomará valores de 1700 para uplink y 2100 para downlink. Para este caso puntual, al trabajar con Telefónica del Perú como Carrier, se utilizarán los 1720 MHz para el cálculo de la cobertura ya que es el punto medio del espectro uplink en AWS que le corresponde.

Se obtiene que:

$$L=40\cdot(1-0.004\cdot 15)\cdot\log(R)-18\cdot\log(15)+21\cdot\log(1720)+80$$

De esta manera se obtienen los valores máximo y mínimo para el radio de cobertura:

$$R_{\max} = 1.79 \text{ Km y } R_{\min} = 1.33 \text{ Km}$$

Finalmente se resume:

Tabla 44
Datos totales de cobertura por eNodeB

Característica	Min	Max
Sensibilidad del receptor	-107.53	-102.63
Pérdida en el espacio	131.43	136.33
Radio de cobertura	1.33 Km	1.79 Km

A pesar de que en la práctica el eNodeB utiliza 3 sectores de 120° cada uno para brindar cobertura móvil a los usuarios, el área de cobertura teórico de un eNodeB se considera de tipo hexagonal⁶³. Utilizamos esta aproximación para calcular el área de cobertura del eNodeB en función de sus radios máximo y mínimo.

⁶³ Krishnamachari 2009: 207.

Figura 57. Área de cobertura de cada celda

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos entonces:

$$A = \frac{(6 \cdot R) \cdot \left(\left(\frac{R}{2} \right) \cdot \sqrt{3} \right)}{2}$$

Simplificando:

$$A = \frac{3 \cdot R^2 \cdot \sqrt{3}}{2}$$

Como tenemos valores máximo y mínimo para el radio:

$$A = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot (R_{\max})^2 - (R_{\min})^2}{2}$$

Así, el área de cobertura del eNodoB será de: 3.78 Km², de esta manera se cumple con el requisito que establece que el rango de cobertura de cada eNb deberá ser mayor a 1 Km² y menor a 4 Km² con el fin de tener una mejor administración de las celdas. Siendo el área del distrito de 19.85 Km², se requerirán 6 eNodosb para brindar de cobertura al distrito. De esta manera se cumple con el último requisito que establecía que al menos 16 sectores distribuidos en 6 eNodosb como mínimo debían formar parte del diseño.

5.2.2.2 Análisis del perfil de radiación del sistema de transmisión LTE

Como ya se mencionó anteriormente, se ha decidido utilizar la herramienta de simulación en línea Xirio. Esta herramienta requiere la creación de un estudio sobre el cuál realizar el análisis. Una vez creado un estudio será necesario realizar la creación de cada sector manualmente introduciendo valores como frecuencia de transmisión y de la celda, frecuencia de transmisión y altura del UE, valores de azimuth y elevación para cada sector, potencias de transmisión y recepción de celdas y UEs, etc.

The screenshot shows a web browser window titled "Create new study - Google Chrome" with the URL "www.xirio-online.com/CreateNewStudy.aspx?&wizard=true". The page header includes "Online Professional Simulation of Radioelectric Coverage" and the "XIRIO online" logo. The main heading is "Create new study".

Create new study

Choose a study type

- Link
- Coverage**
- Indoor coverage
- Multitransmitter coverage
- Transport network

Coverage study:
This study shows strength of the signal generated by a transmitter, in terms of electrical field or power, at all points inside the area selected by the user.
[Read more](#)

Select a service or technology

Category: Mobile Service
Subcategory: LTE - FDD
Service: LTE - FDD 20 MHz

Wizard mode Accept

The wizard mode will allow you to create coverage studies easily. It also lets you create multiple sectors on the same site.

Figura 58. Interfaz inicial de Xirio

Fuente: Xirio 2018

Se elige la opción de cobertura multitransmisor y se selecciona que se trabajará un diseño LTE – FDD con ancho de banda de 20 MHz.

A continuación, se crea un estudio de cobertura nuevo y se comienzan a crear todos los sectores uno por uno. La imagen siguiente muestra cuáles son los parámetros exactos que solicita la herramienta en función del diseño que ya se ha establecido y las características de los eNodosb.

XIRIO online

Sector properties

Sector

Name: 1-0
Station:
PCI:
Priority: 0

Site

Site:
Coordinates:
Latitude: 03°45'14.95"S
Longitude: 073°16'49.43"W

Radio parameters

System type: Standard
Antenna: 3G/4G Antenna 17.5 dBi
Antenna height: 15 m
Azimuth: 0 [0.000]
Downtilt: 0 [-90.00]

Transmission frequencies

Frequencies: 2120 Mhz
Polarization: Vertical

Feeder

Feeder length: 0 m
Feeder losses: 0.00 dB
Passive losses: 1 dB
Power: 40 dBm

LTE parameters

The following parameters are specific for making the individual estimation of coverage. These would not be applied to the detailed analysis of capacity / coverage of the LTE network.

Scheduler

ICIC Configuration:
Network ICIC type: Dynamic
Dynamic ICIC efficiency: 50 %
☐ Consider station ICIC

Downlink parameters

Pb Configuration: Configuration 1
Pa: 0 dB
PDCCH number of symbols: 1
MIMO DL: MIMO 2x2
MIMO gain DL: 1.7 dB
☒ Consider antenna diversity gain
Traffic load: 70 %

Figura 59. Parámetros de entrada de Xirio

Fuente: Xirio 2018

En el caso de la imagen se creó el primer sector de la celda 1 o eNodoB 1, se debe recordar que cada celda posee 3 sectores por lo que, al momento de crearlos, se debe colocar el dato correcto de azimut: 0°, 120° o 240° según sea el caso.

Una vez se terminan de crear todos los sectores, la ventana principal de Xirio muestra todas las celdas y sectores creados.

Figura 60. Celdas y sectores creados en Xirio

Fuente: Xirio 2018

Finalmente se selecciona el menú de acciones posibles debajo del cuadro de navegación, se opta por cálculo del estudio de cobertura en su versión gratuita que brindará el mapa de cobertura del sistema de eNodosb desplegados en el distrito.

Figura 61. Menú para la activación del cálculo de radiación de Xirio

Fuente: Xirio 2018

La imagen siguiente muestra la cobertura del sistema de eNodosb desplegados en el distrito, a mayor intensidad del color verde, mayor será la potencia de la señal. En azul se muestran las zonas que no cuentan con cobertura producto del despliegue planteado en el presente trabajo.

Figura 62. Diagrama de cobertura de los eNodosB

Fuente: Xirio 2018

Se aprecia que prácticamente el 100% de la zona poblada del distrito cuenta con buena cobertura de la red LTE. Esto comprueba que el despliegue de los eNodosB que forman parte de la solución es adecuado.

Con esto se demuestra que el área de cobertura teórico por cada eNodoB es de 3.78 Km² y es suficiente para permitir el despliegue de 6 eNodosb.

Se cumple entonces con el indicador de logro que establece que el rango de cobertura de cada eNb deberá ser mayor a 1 Km² y menor a 4 Km² con el fin de tener una mejor administración de las celdas. También se cumple con el indicador de logro para el cual la cantidad de eNb requeridos deberá ser mayor o igual a 6 y menor a 25.

5.2.2.3 Cálculos de throughput por eNodeB

5.2.2.3.1 Cálculos de throughput de UPLINK

Tal como se definió al principio del presente capítulo, el cálculo del throughput de uplink y downlink para cada eNodeB se realizará en función del área de cobertura y los elementos fijos y móviles que se encuentren bajo ella. Sabemos que el radio teórico de cobertura para cada eNodeB es de 1.56 Km (promedio entre los radios teóricos calculados), sin embargo, para fines prácticos es necesario considerar que el throughput de cada celda sufre una disminución debido a las cabeceras adicionales que agrega el tipo de modulación que en este caso es 16QAM y las correcciones de errores. Estos factores, mientras más lejano está el UE al eNodeB, afecta en gran medida a la calidad de la señal y potencia recibida⁶⁴. Por esto es necesario utilizar el concepto de Throughput promedio del sector.

El throughput promedio del sector es el promedio del throughput enviado y recibido a cada UE ya sea fijo o móvil que se encuentra dentro del área de cobertura del eNodeB. La Next Generation Mobile Networks Alliance (NGMN) ha estandarizado el uso del throughput promedio del sector como el valor más realista para los cálculos de capacidad de celdas.

⁶⁴ Motorola 2008: 4.

Figura 63. Throughput instantáneo bajo la cobertura del eNodeB

Fuente: Motorola 2018.

Para garantizar una buena calidad de señal en nuestro sistema de transmisión LTE, utilizaremos una cobertura del 60% respecto de la cobertura teórica. Así, el radio de cobertura que utilizaremos para los cálculos de throughput de los eNodosb será de:

$$1.56\text{Km} \cdot 0.6 = 0.94\text{Km}$$

Así, tomando en cuenta el plano del distrito de San Juan Bautista, la distribución de las cámaras y de las celdas se verá gráficamente cuál es el throughput que soporta cada eNodoB.

Figura 64. Mapa con distribución de celdas y cámaras

Figura 65. Cobertura de la celda 1

De esta imagen podemos observar que en promedio, la celda 1 brinda servicio a 38 cámaras contando incluso aquellas que también se encuentran bajo la cobertura teórica de otras celdas.

Figura 66. Cobertura de la celda 2

De esta imagen podemos observar que en promedio, la celda 2 brinda servicio a 19 cámaras contando incluso aquellas que también se encuentran bajo la cobertura teórica de otras celdas.

Figura 67. Cobertura de la celda 3

De esta imagen podemos observar que en promedio, la celda 3 brinda servicio a 17 cámaras contando incluso aquellas que también se encuentran bajo la cobertura teórica de otras celdas.

Figura 68. Cobertura de la celda 4

De esta imagen podemos observar que en promedio, la celda 4 brinda servicio a 25 cámaras contando incluso aquellas que también se encuentran bajo la cobertura teórica de otras celdas.

Figura 69. Cobertura de la celda 5

De esta imagen podemos observar que en promedio, la celda 5 brinda servicio a 11 cámaras contando incluso aquellas que también se encuentran bajo la cobertura teórica de otras celdas.

Figura 70. Cobertura de la celda 6

De esta imagen podemos observar que en promedio, la celda 6 brinda servicio a 16 cámaras contando incluso aquellas que también se encuentran bajo la cobertura teórica de otras celdas. En resumen, se ha considerado que las 6 celdas solo garantizan el 60% de área de cobertura para fines prácticos del cálculo de throughput promedio de cada celda. En promedio y considerando el peor de los casos en el que también brindan servicio a cámaras que deberían estar bajo influencia de otras celdas adyacentes, cada celda brinda servicio a 21 cámaras del sistema de video vigilancia. Esto significa que el uplink que soporta en promedio cada celda es de:

$$21 \cdot 2.14 \text{ Mbps} = 44.94 \text{ Mbps}$$

Mediante este valor cumplimos con el indicador de logro que exige que el throughput de uplink de un eNb deberá ser menor a 50 Mbps para cumplir con el estándar 3GPP. Así mismo

cumplimos con el indicador de logro que establece un mínimo de 29.8 Mbps para soportar las imágenes provenientes de las cámaras de video vigilancia.

5.2.2.3.2 Cálculos de throughput de DOWNLINK

A Nivel de downlink, existen solo 2 escenarios en los que el valor de throughput es máximo. El primer escenario es el del eNodeB 1 o celda 1, el cual tiene bajo su cobertura al centro de control y seguridad, donde se encuentra instalado el gestor de video. Hemos mencionado que en un futuro se aconseja implementar un canal de conectividad redundante basada en LTE, siendo así en el caso más pesimista cuando dentro de la cobertura de la celda 1 además se encuentren las 11 unidades de patrullaje de la municipalidad, el throughput de downlink requerido sería:

$$11(8.546 \text{ Mbps}) + 342.468 \text{ Mbps} = 436.474 \text{ Mbps}$$

Mediante este valor cumplimos con el indicador de logro que exige que el throughput de downlink de un eNb deberá ser menor a 450 Mbps para cumplir con el estándar 3GPP.

El segundo escenario es el de un eNodeB distinto al 1. En el caso menos optimista, bajo el área de cobertura de este tipo de celdas se encontrarán los 11 patrulleros. Así, el throughput de downlink del eNodeB sería de:

$$11(8.546 \text{ Mbps}) = 94 \text{ Mbps}$$

Con este valor cumplimos con el indicador de logro que establece un mínimo de 23.84 Mbps para servir a los patrulleros.

Para futuras aplicaciones, en el caso de las celdas distintas a la celda 1, se garantizará un throughput de downlink disponible de:

$$450 \text{ Mbps} - 94 \text{ Mbps} = 356 \text{ Mbps}$$

En el caso de la celda 1, en el escenario menos optimista solo se garantizará un throughput de downlink disponible de:

$$450 \text{ Mbps} - 436.474 \text{ Mbps} = 13.5 \text{ Mbps}$$

Para garantizar que se tenga disponibilidad a futuro de 50 Mbps para aplicaciones, se debería considerar que el throughput disponible para los patrulleros es de:

$$400 \text{ Mbps} - 342.468 \text{ Mbps} = 57.53 \text{ Mbps}$$

Calculamos el número de patrulleros para los que se garantizará conectividad:

$$57.53 \text{ Mbps} / 8.546 \text{ Mbps} = 6.7$$

Lo cual significa que para el caso de la celda 1, solo mientras haya 6 patrulleros dentro de su área de cobertura, además del gestor de video en conectividad redundante, se garantiza 50 Mbps para futuras aplicaciones. Este es un escenario real en el que más de la mitad de los patrulleros se encuentran en un radio de 1.56 Km o 3.78 Km². Se considera entonces que se cumple con el último indicador de logro que establece que el throughput de downlink disponible para futuros servicios deberá ser mayor a 50 Mbps.

5.2.2.4 Resumen del sistema de transmisión LTE y cumplimiento con los indicadores

Tabla 45

Cumplimiento de objetivos relativos al sistema de transmisión LTE

Objetivo Específico	Indicador de logro	Valor conseguido	Cumplimiento
Garantizar que las características de Throughput de la red de transporte LTE permitirán la transmisión del video IP en tiempo real	Los Throughput de uplink y downlink de un eNb deberán ser menores a 50 y 450 Mbps respectivamente para cumplir con el estándar 3GPP.	44.94 Mbps de Uplink y 436.474 Mbps en el caso menos optimista o 94 Mbps en un caso normal	Cumple
	Los Throughput de uplink y downlink de un eNb deberán ser mayores a 29.8 y 23.84 Mbps respectivamente para soportar, en el peor de los casos, las imágenes recibidas de las cámaras IP y servir a los patrulleros.	44.94 Mbps de Uplink y 436.474 Mbps en el caso menos optimista o 94 Mbps en un caso normal	Cumple
Garantizar que las características de ancho de cobertura de la red de transporte LTE permitirán la transmisión del video IP en tiempo real	El rango de cobertura de cada eNb deberá ser mayor a 1 Km2 y menor a 4 Km2 con el fin de tener una mejor administración de las celdas.	3.78 Km2	Cumple
	La cantidad de eNb requeridos deberá ser mayor o igual a 6 y menor a 25	6	Cumple
Asegurar que la plataforma de transmisión LTE tenga Throughput suficiente a fin de ser escalable para soportar futuros servicios asociados con la seguridad ciudadana del distrito.	El Throughput de downlink disponible para futuros servicios deberá ser mayor a 50 Mbps	356 Mbps en el escenario más optimista, 57.6 Mbps en un escenario normal	Cumple

CONCLUSIONES

- a) Para el presente proyecto se utilizó abundante información técnica y teórica respecto de los sistemas de video IP como por ejemplo varios capítulos del libro de video vigilancia Anthony Caputo de donde se obtuvo importante información respecto de componentes y protocolos. Las hojas de datos y herramientas de cálculo del fabricante Axis ayudaron en el dimensionamiento de la solución completa de video vigilancia.
- b) Para la tecnología LTE, se obtuvo abundante información que enriqueció este documento y que permite un acercamiento a la tecnología para después ahondar en técnicas que optimizan el uso del espectro radioeléctrico y que la organización 3GPP hizo suyas al momento de diseñar este avanzado método de comunicación inalámbrica.
- c) El cálculo de linkbudget nos ayudará a determinar la cobertura teórica de los eNodosB al momento de diseñar una red LTE, el uso de herramientas de simulación nos permite tener una visión más cercana al patrón de radiación real de nuestro sistema de transmisión LTE.
- d) La red LTE diseñada ofrecerá la cobertura que permitirá un servicio de video vigilancia y patrullaje eficiente y reduciendo el impacto ambiental en una zona tan delicada como en donde se emplaza el distrito de San Juan Bautista.

RECOMENDACIONES

- a) Implementar los subsistemas IMS, PCRF y OCS que brindarían las bases para el desarrollo de la transmisión de voz. Se requerirá cálculo de canales de voz con la utilización de las tablas Erlang sin embargo, la robustez de este diseño inicial permitirá una fácil adaptación de los nuevos componentes que se encuentren necesarios posteriormente.
- b) Aprovechar las capacidades y escalabilidad de esta red para interconectar las entidades públicas del distrito como comisarías, hospitales, colegios, cuerpo de bomberos, defensa civil, etc.
- c) Investigar sobre los despliegues 3X de modo que se pueda aprovechar a futuro el throughput que ofrece el Massive Broad band integrando el core 4G con una RAN 5G.

LISTA DE ABREVIATURAS

3GPP: Third Generation Partnership Project
CYMK: Cyan Magenta Yellow Key color model
E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDM: Frequency Division Multiplexing
FDMA: Frequency Division Multi Access
GERAN: GSM EDGE Radio Access network
GSM: Global System for Mobile
HSS: Home Subscriber Server
HTTP: Hypertext Transfer protocol
HTTPS: Hyper Text Transfer protocol Secure
IANA: Internet Assigned Numbers Authority
IEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF: Internet Engineering Task Force
IMS: IP Multimedia Subsystem
LTE: Long Term Evolution
LTE: Long Term Evolution
MIMO: Multiple Input Multiple Output
MPEG: Moving Picture Experts Group
OCS: Online Charging System
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMS: Orthogonal Frequency Division Multi Access
OSI: Open Systems Interconnection
PCRF: Policy and Charging rules function
PMBOK: Project Management Base of Knowledge
RAN: Radio Access Network
RFC: Request for Comment
RGB: Red Green Blue color model

RNC: Radio Network Controller

RTMP: Real Time messaging Protocol

RTP: Real time Transport Protocol

RTSP: Real time Streaming Protocol

SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multi Access

SIM: Subscriber Identity Module

SLA: Service level agreement

SMTP: Simple Mail transfer protocol

TCP: Transmission Control protocol

UICC: Universal integrated Circuit Card

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network

BIBLIOGRAFÍA

1. 3GPP (2018) <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>
2. 3GPP (2009) 3GPP TS 36.101 V9.16.0. Valbonne: 3GPP.
3. AL AGHA, Khaldoun (2016) Wireless and Mobile Networks. Londres: Wiley
4. APROBACIÓN DEL PROYECTO DE SEGURIDAD CIUDADANA YURIMAGUAS 2014 (Consulta: 28 de Agosto).
(<http://www.roriente.org/2014/04/24/proyecto-de-seguridad-ciudadana-de-municipio-fue-aprobado-por-ministerio-del-interior/>)
5. AXIS (2018) AXIS Design Tool (consulta: 18 de febrero)
(http://www.axis.com/products/video/design_tool/)
6. AXIS (2018) AXIS Q1755/-E Network Cameras (consulta: 17 de febrero)
(http://www.axis.com/files/datasheet/ds_q1755_58205_en_1407_lo.pdf)
7. AXIS (2018) AXIS Q60-C PTZ Dome Network Cameras (consulta: 17 de febrero)
(http://www.axis.com/en/files/datasheet/ds_q6042c_q6044c_q6045c_54849_en_1312_lo.pdf)
8. CAPUTO, Anthony (2008) Digital Video Surveillance and Security. Oxford: Elsevier
9. CELLULAR NEWS (2010) <http://www.cellular-news.com/story/Contracts/46265.php>
(consulta 4 de Marzo). (<http://www.cellular-news.com/story/Contracts/46265.php>).
10. CISCO (2018) Cisco Broadband Wireless Gateway (consulta 21 de febrero)
(http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/broadband-wireless-gateway/product_data_sheet0900aecd806cdb72.pdf).
11. CISCO (2018) Cisco BWX 8300 Series Broadband Wireless Access System (Consulta 21 de febrero) (http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/bwx-8300-series-broadband-wireless-access-system/data_sheet_c78-470408.pdf).
12. CIUDAD NUESTRA (2011) Primera encuesta nacional urbana de victimización. Iquitos: PUCP.

13. COMITÉ PROVINCIAL DE SEGURIDAD DE MAYNAS (2011) Plan local provincial de seguridad ciudadana. Iquitos: Municipalidad provincial de Maynas.
14. COMITÉ DISTRITAL DE SEGURIDAD DE SAN JUAN BAUTISTA (2017) Plan anual de seguridad ciudadana 2017
15. CÓRDOVA, Jorge (2018) Entrevista personal con el autor. 17 de Febrero.
16. CORNELL UNIVERSITY (2014) VALORACIÓN DE LA CALIDAD DE LA IMAGEN (Consulta 12 de Marzo)
(<https://www.library.cornell.edu/preservation/tutorial-spanish/quality/quality-03.html>).
17. CORPAC (2016) Movimiento General Aeropuertario 2016 (consulta 5 de Noviembre)
<http://www.corpac.gob.pe/Main.asp?T=5274>
18. COX, Chris (2012) An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. Chichester : Wiley.
19. DAHLMAN, Erik (2011) 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Massachusetts : Elsevier.
20. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE COLOMBIA (2014) Encuesta Nacional de Victimización 2013.
21. DIEPOLD, Klauss (2005) Understanding MPEG-4. Massachusetts: Elsevier.
22. D'OTTONE, Enrique (2009) Auditoría de Sistemas de Gestión de Calidad ISO 9001:2008. Miami: Creative commons
23. ELNASHAR, Ayman (2018) Simplified Robust Adaptive Detection and Beamforming for Wireless Communications. Dubai: Wiley
24. EL PERUANO (2015) Decreto Legislativo 1218 (consulta: 11 de octubre)
(<http://www.elperuano.com.pe/NormasElperuano/2015/09/24/1291565-8.html>)
25. ETSI (2018) ETSI TS 138 211 V15.2.0. Valbonne: ETSI
26. EYLERT, Berndt (2005) The Mobile Multimedia Business: Requirements and Solutions. Chichester. Wiley.
27. GARAY, Cesar (2009) Diseño de una red de vigilancia residencial basado en el protocolo de comunicación ip sobre las líneas eléctricas de baja tensión (Tesis de Pregrado en Ingeniería Electrónica). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

28. GARCÍA, Franciso (2010) Videovigilancia: CCTV usando vídeos IP. Madrid: Vértice.
29. GARTNER (2015) Magic Quadrant for LTE Network Infrastructure (consulta 12 de Enero).
30. (<https://www.gartner.com/doc/3033218/magic-quadrant-lte-network-infrastructure>).
31. GENETEC (2015) Sistema Omnicast (consulta: 19 de febrero)
(<http://www.genetec.com/solutions/all-products/omnicast>)
32. GENETEC (2016) <http://www.genetec.com/solutions/all-products/omnicast/bcdvideo>
(consulta: 5 de Abril)
33. GESTIÓN (2018) <https://gestion.pe/economia/mercados/77-conexiones-telefoniamovil-concentra-2g-3g-221724> (consulta 19 de Setiembre)
34. GESTIÓN (2018) <https://gestion.pe/tecnologia/planes-prepago-superan-postpago-equipos-smartphone-229162> (consulta 29 de Agosto)
35. GOLDSMITH, Andrea (2005) Wireless Communications. New York: Cambridge Press.
36. GOOGLE (2015)
(<https://www.google.com/maps/place/San+Juan+Bautista,+Iquitos,+Peru/@-3.7748891,-73.2812977,15z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x91ea0fd6bc027245:0x524f7cb4f64e6585>) Mapa del distrito de San Juan Bautista (consulta 10 de Febrero).
37. GOOSEN, Mark (2006) TDD vs FDD. Johannesbourg: Spescom Telecommunications
38. GORMAZ, Isidoro (2007) Técnicas y procesos en las instalaciones singulares en los edificios. Madrid: Paraninfo.
39. GRANT, August (2006) Communication Technology Update. Massachusetts: Elsevier
40. GREENPACKET (2015) OX Wimax Outdoor Modem (consulta 21 de febrero)
(<http://www.greenpacket.com/devices/ox-wimax-outdoor-modem-specs.html>)
41. HERRERA, Enrique (2003) Tecnologías y Redes de Transmisión de Datos. México D.F.: Lumisa.
42. INEI (2013)
(http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1095/li)

- bro.pdf) Reporte demográfico del Perú por el día mundial de la población 2013 (consulta 19 de febrero)
43. ITU (2014) H.264 : Advanced video coding for generic audiovisual services. Geneva: ITU-T
44. ITU (1996) G.729 Recommendation. Geneva: ITU-T
45. ITU (1994) P.525-2 Recommendation. Geneva: ITU-T
46. JVSG (2018) <http://www.jvsg.com/bandwidth-storage-space-calculation/> (consulta 10 de Diciembre)
47. KRISHNAMACHARI, Bhaskar (2009) Distributed COmputing in Sensor Systems: 5th IEEE International Conference, DCOSS 2009 Marina del Rey, CA, USA, June 2009 Proceedings. Santa Barbara: Springer.
48. LAURA, Gigi (2013) DISEÑO DE UN SISTEMA DE VIDEO-MONITOREO IP PARA LA SALA DE MANUFACTURA DEL CENTRO DE TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE MANUFACTURA (CETAM) Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
49. LE TIEN, Anh (2008). Avoiding effects of OFDM andacent channel interference by using combinaion of modulation schemes. Norderstedt: Grin Verlag
50. LIMA CÓMO VAMOS (2015) <http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2016/07/Demografia2015final.pdf> (consulta 23 de Setiembre)
51. MARCANO, Diogenes (2010) LTE – Long Term Evolution. Lima: PUCP.
52. MAZAR, Haim (2016) Radio Spectrum Management. Chichester: Wiley.
53. MEURANT, Gerard (1995) CCTV Surveillance: Video Practices and Technology. Massachusetts: Butterworth-Heinemann
54. MARCHIORI, Hilda (2007) Principios de Justicia y Asistencia Para las Victimas. Buenos Aires: Encuentro.
55. MILLA, José (2012) DISEÑO DE UNA RED LTE PARA EL DISTRITO DEL CALLAO. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
56. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (2006) Código nacional de electricidad.

57. MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (2011) Resolución Viceministerial 456-2011-MTC/03 (http://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/documentos/pnaf/RVM%20456%202011%20MTC%20030001.pdf) Sitio web del ministerio; contiene información sobre las bandas AWS en el Perú.
58. MINISTERIO DEL INTERIOR DE COLOMBIA (2014) (<http://www.mininterior.gov.co/sala-de-prensa/noticias/inversion-para-seguridad-y-convivencia-ciudadana-en-popayan-supera-los-9-mil-millones-de-pesos>) Sitio web del ministerio; contiene información sobre el presupuesto asignado a seguridad ciudadana (consulta 9 de Febrero).
59. MONTENEGRO, Juan (2005) MÉTODO DE ESTUDIO DE RADIOFRECUENCIA PARA REPETIDOR CDMA. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
60. MOTOROLA (2008) Realistic LTE Performance: From Peak Rate to Subscriber Experience. Chicago: Motorola.
61. MTC (2018) https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/documentos/pnaf/PNAF%20Canalizacion%20version%20final_1.pdf (consulta 23 de Octubre)
62. MTC (2017) https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1483/cap21/cap21.pdf (consulta Diciembre 2018).
63. MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE SAN JUAN BAUTISTA (2014) Plan Operativo Institucional de la Municipalidad Distrital de San Juan Bautista. Iquitos: Municipalidad Distrital de San Juan Bautista.
64. MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE SAN JUAN BAUTISTA (2009) Plan Estratégico Institucional 2009-2012. Iquitos: Municipalidad Distrital de San Juan Bautista.
65. MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DEL ALTO AMAZONAS (2014) Presupuesto participativo 2014.

66. NILSSON, Fredrik (2008) Intelligent Network Video: Understanding Modern Video Surveillance Systems. Florida: CRC Press
67. NISHIT, Narang (2007) 2G Mobile Networks. New Deli: Tata McGraw-Hill.
68. NISHIT, Narang (2004) 3G Networks. New Deli: Tata McGraw-Hill.
69. NOE, Robert (2005) Administración de recursos humanos. Ciudad de México: Pearson Educación
70. NOKIA (2017) <https://onestore.nokia.com/asset/201074> (Consulta 22 de Octubre)
71. NOKIA (2018) https://www.nokia.com/en_int/news/releases/2018/04/11/nokia-and-skt-conduct-trial-of-lte-based-video-and-voice-applications-to-enhance-public-safety-in-south-korea . (consulta 25 de octubre).
72. NPERF (2018) <https://www.nperf.com/es/map/PE/3696183.Iquitos/327.Movistar/signal/?ll=-3.780498939055924&lg=-73.28953742980958&zoom=15>
73. NUAYMI, Loutfi (2007) WIMAX: Technology for broadband access. Chichester: Wiley.
74. PANASONIC (2015) <http://www.panasonic.com/my/business/security-system/analog-products/fixed-cameras/wv-cw380.html> (consulta 13 de Noviembre).
75. PANASONIC (2016) <http://security.panasonic.com/applications/case029/> (consulta 15 de Marzo).
76. PAULSEN, Karl (2011) Moving Media Storage Technologies: Applications & Workflows for Video and Media Server Platforms. Oxford: Elsevier.
77. PENG, Mike (2011) Global Business. Boston: Cengage learning.
78. PERÚ. Congreso de la República (1993) Constitución Política del Perú.
79. PIQUERAS, Roger (2015) LTE/WiMAX Link Budget Calculator (Consulta 7 de Octubre 2015) (www.ee.columbia.edu/~roger/WiMAX_LKB.xls)
80. POYNTON, Charles (2003) Digital Video and HDTV: Algorithms and Interfaces. San Francisco: Elsevier

81. PROINVERSION (2016)
http://www.proinversion.gob.pe/modulos/NOT/NOT_DetallarNoticia.aspx?ARE=0&PFL=1&NOT=3473&month=5&year=2016 (consulta 23 de Octubre 2018)
82. PROINVERSION (2017)
<http://www.proinversion.gob.pe/modulos/jer/plantillastandard.aspx?are=0&pfl=1&jer=7752> (consulta 23 de Octubre 2018)
83. PROINVERSIÓN (2013) Contrato de concesión única para la prestación de servicios públicos de telecomunicaciones y asignación del bloque A de la banda 1710-1770 MHz y 2110 - 2170 MHz a nivel nacional. Lima: Proinversión
84. PUCP (2018) <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/131-calor-especifico-y-capacidad-calorifica.html> (Consulta 12 de Abril 2018)
85. RICO, José y CHINCHILLA, Laura (2002) Seguridad ciudadana en América Latina. México D.F.: Siglo XXI.
86. RPP (2018) <https://rpp.pe/tecnologia/moviles/cual-es-la-operadora-que-tiene-mejor-velocidad-de-4g-en-el-peru-noticia-1105840> (consulta 23 de Octubre)
87. ROSAS, Miguel (2008) Diseño de una red WiMAX móvil para la ciudad de Trujillo (Tesis de pregrado en Ingeniería de las telecomunicaciones). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
88. SCRIBD (2011) LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles (consulta 9 de Junio). (<http://es.scribd.com/doc/60165166/11/Arquitectura-del-sistema-LTE>)
89. SIKULA, Josef (2005) Advanced Experimental Methods for Noise Research in Nanoscale Electronic Devices. New York: Springer.
90. SOLTANI, Nima (2009) Comparison of Single-Carrier FDM vs. OFDMA as 3GPP Long-Term Evolution Uplink. California. Stanford University
91. USTUNDAG, Alp (2017) Industry 4.0: Managing The Digital Transformation. Estambul: Springer.
92. VENKATARAMAN, Trichy (2014) 4G: Deployment Strategies and Operational Implications. New York: Apress.

93. WIMO (2015) GP-3500 WIMAX Omni direccional antena (consulta 21 de febrero) (https://www.wimo.com/wimax-antennas_s.html).
94. XIANG, Wei (2017) 5G Mobile Communications. Beijing: Springer.
95. ZELJKOVIC, Vesna (2014) Video Surveillance Techniques and Technologies. Philadelphia : IGI Global.
96. ZHENG, Pei, PETERSON, Larry y DAVIE, Bruce (2004) Wireless Networking Complete. Massachussets: Elsevier.