



Diseño y evaluación conceptual de arquitecturas de misiones espaciales para fines de comunicación sobre el territorio chileno.

Iván Esteban Fuica Zambrano

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor guía:
Dr.- Ing. Alejandro López Telgie.

Julio 2025
Concepción, Chile

Agradecimientos

A mi profesor guía, *Dr. Alejandro López Telgie*:

Por entregarme las herramientas para poder emplear una visión holística de la ingeniería, por enseñarnos el cómo poder avanzar frente a las problemáticas más difíciles y enseñarnos a vivir como ingenieros.

A mi familia:

Por siempre brindarme el apoyo que me permitió llegar hasta esta instancia, dejándome desarrollar mis intereses. Por siempre esperar y velar por mi éxito.

A *Vicente Pablo Ignacio Daza Echeverría*:

Por siempre creer en mí, brindándome su consejo y amistad en los momentos más caóticos. Entregando más de lo que nunca podré pagar, pero nunca pidiendo nada a cambio. Siempre estaré agradecido por permitirme ser parte de su viaje.

A *Nicolás Sepúlveda*:

Por siempre tener la disposición de ser un guía, y un amigo. Siempre estando atento a los problemas que nos detenían y nunca negarse a prestar toda su disposición a ayudar.

A *Benjamín Ignacio Cárcamo Torres*:

Por siempre ser un amigo y un aporte, siempre brindándome sus palabras de apoyo, siempre incluyéndome y expresando el interés en lo que hago, siempre sumándose a sus proyectos y alentándome a hacer lo mismo.

A *Carlos Gabriel Lazo Valdes*:

Por siempre ser una fuente de alegría, caos y imprevistas peripecias, nunca dejando que los desafíos de la vida lo detengan, permitiéndome acompañarlo en estas y siendo una constante fuente de apoyo para mi trabajo.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue el diseño y evaluación de distintas opciones de arquitecturas de misiones espaciales, estas arquitecturas son planteadas con la finalidad de poder habilitar redes de comunicaciones satelitales sobre el país de Chile, tanto para sus regiones continentales como sus territorios insulares. El enfoque de estudio del trabajo se concentra en la justificación detrás de la idea de habilitar el sistema planteado, para luego pasar a presentar arquitecturas de este. Las arquitecturas son definidas como elementos que componen al sistema e indican las ventajas comparativas de escoger la opción presentada frente a otras posibles opciones. El presente trabajo se enfoca en dimensionar a grandes rasgos, la necesidad, características y evaluar posibles opciones que se tienen para poder habilitar un sistema de comunicaciones satelitales soberano. Se plantea el tipo de redes de comunicaciones a habilitar, esto se estima mediante el estudio estadístico de la penetración de distintas formas de comunicación dentro de la población. El estudio de la necesidad para un sistema satelital de comunicaciones fue desarrollado mediante la utilización de datos de carácter abierto y actuales sobre la cantidad de población y hogares de cada región. Junto con la utilización de informes de acceso y uso del internet, se proyecta la necesidad del servicio en cantidad de hogares y ancho de banda. Luego se plantea la arquitectura del sistema, esto mediante el estudio de sistemas espaciales que cumplen roles similares, extrayendo parámetros de funcionamiento como ancho de banda y capacidades de propulsión, estos fueron asociadas a los parámetros físicos de la plataforma satelital, pudiendo generar parámetros de funcionamiento generales para el dimensionamiento y planteamiento de arquitecturas propias. Similarmente, se generaron parámetros orbitales y arquitecturas terrestres mediante el estudio de sistemas similares al propuesto. Finalmente, procede a la simulación y obtención de datos de las arquitecturas mediante la creación de un algoritmo dentro del software FreeFlyer, cuyos datos son procesados mediante un algoritmo de Python, evaluando el funcionamiento del sistema diseñado. Los resultados del trabajo fueron claros en el dimensionamiento de la necesidad y evaluación sobre el flujo de caja del sistema planteado, con necesidades proyectadas de hasta 236,833 clientes y con proyecciones de ganancias de \$529[MUSD] para los primeros 15 años de funcionamiento se tiene una clara apertura a una red de comunicaciones satelitales soberana. Los resultados del planteamiento de la arquitectura dieron resultados mixtos, la metodología utilizada permitió el planteamiento satisfactorio de satélites pequeños, de pesos aproximados de 100[kg], permitiendo dimensionar características claves como la máxima cantidad de conexiones simultáneas por satélite. Pero fue menos satisfactorio a la hora de dimensionar satélites de masas superiores a 500[kg] principalmente debido a falta de documentación abierta y reciente. Finalmente, el desarrollo de los algoritmos de simulación y procesamiento de datos funcionan lo suficientemente bien para permitir cortas simulaciones de una cantidad limitada de satélites, pero es claro que estas herramientas requieren de futuras iteraciones para poder ser consideradas adecuadas para obtención de datos y procesamiento de estos durante periodos de tiempo extendidos. Se concluye que el sistema, según lo presentado, es viable, pero la evaluación de este requiere optimizar la herramienta de simulación, principalmente para periodos de tiempo extensivos, lo anterior junto al estudio más profundo de sistemas satelitales de comunicaciones recientes que superen los 500[kg], principalmente satélites geoestacionarios. Futuros trabajos deben enfocarse en las herramientas de simulación y recopilar información específica sobre satélites de comunicación sobre los 500[kg].

Abstract

The objective of this work was the design and evaluation of different space mission architecture options. These architectures are proposed to enable satellite communication networks over Chile, encompassing both its continental regions and island territories. The study's focus centers on justifying the rationale for implementing the proposed system, followed by presenting its architectures. Architectures are defined as the system's constituent elements, highlighting the comparative advantages of the chosen option over other alternatives. This work focuses on broadly sizing the need, defining characteristics, and evaluating potential options for enabling a sovereign satellite communication system. The types of communication networks to be enabled were determined through statistical analysis of the penetration rates of different communication methods within the population. The need assessment for a satellite communication system was developed using current open data on the population and number of households per region. By incorporating reports on internet access and usage, the service demand in terms of number of households and required bandwidth was projected. Subsequently, the system architecture was defined by studying existing space systems with similar roles. Operational parameters such as bandwidth and propulsion capabilities were extracted and linked to the physical parameters of the satellite platform, enabling the generation of general operational parameters for sizing and proposing custom architectures. Similarly, orbital parameters and ground architectures were generated by studying systems analogous to the proposed one. Finally, the architectures were simulated and data was obtained by creating an algorithm within the FreeFlyer software. This data was processed using a Python algorithm to evaluate the designed system's performance. The results clearly sized the need and evaluated the cash flow of the proposed system. Projected needs of up to 236,833 customers and projected profits of \$529 million USD over the first 15 years of operation demonstrate a clear opening for a sovereign satellite communication network. The results of the architecture proposal were mixed. The methodology used successfully enabled the proposal of small satellites, with approximate weights of 100 kg, allowing the sizing of key characteristics like the maximum number of simultaneous connections per satellite. However, it was less satisfactory for sizing satellites with masses exceeding 500 kg, primarily due to a lack of recent open documentation. Lastly, the developed simulation and data processing algorithms function sufficiently well to allow short simulations of a limited number of satellites. However, it is clear that these tools require future iterations to be considered adequate for data acquisition and processing over extended periods. It is concluded that the system, as presented, is viable. However, its evaluation requires optimizing the simulation tool, primarily for extensive time periods. This must be coupled with a deeper study of recent communication satellite systems exceeding 500 kg, mainly geostationary satellites. Future work should focus on the simulation tools and gathering specific information on communication satellites over 500 kg.

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas.....	2
Nomenclatura	5
1 Introducción.	6
1.1 Contexto.....	6
1.2 Estado del Arte.....	8
1.2.1 Estudio previo.	8
1.2.2 Arquitecturas similares modernas más relevantes.	13
1.2.3 Funcionamiento general de arquitecturas de comunicación.	14
1.2.4 Satélites HTS (High-throughput satellite).	15
1.2.5 Bandas de Frecuencia.	16
1.3 Marco teórico.....	16
1.3.1 Cálculo y proyección de la demanda.	17
1.3.2 Proyección de la demanda.	18
1.3.3 Caracterización del servicio y cálculos asociados.	18
1.3.4 Arquitectura de misión.	20
1.3.5 Flujo de caja.	22
1.4 Hipótesis.	22
1.5 Condiciones de diseño.	23
1.6 Objetivos.	23
1.6.1 Objetivo General.	23
1.6.2 Objetivos específicos.	23
1.7 Alcance.	24
1.8 Metodología.....	25
1.8.1 Objetivo 1: Cuantificación demanda.	25
1.8.2 Objetivo 2: Determinación servicio prioritario.	25
1.8.3 Objetivo 3: Desarrollar modelo empírico.....	26
1.8.4 Objetivo 4: Simulación arquitecturas.....	26
2 Desarrollo y Resultados.....	29
2.1 Estudio de la necesidad.....	29
2.2 Análisis general de la población y el porcentaje de conexiones dentro del país.	29
2.3 Análisis de conexiones de empresas comerciales de internet fija.....	34
2.4 Análisis de conexiones de centros de salud.	37

2.5	Análisis de conexiones para Instituciones educacionales públicas.	39
2.6	Análisis de necesidad para regiones fuera de Chile continental.	39
2.7	Totalidad del grupo de interés.	40
	Proyección de la demanda para los próximos 15 años.	40
2.8	Dimensionamiento de la demanda en términos del Ancho de banda del sistema.	43
2.8.1	Caso 1: Direct to Cell Only.	47
2.8.2	Caso 2: Internet Competitivo.	49
2.9	Dimensionamiento de arquitecturas investigadas.	50
2.9.1	Satélites.	50
2.9.2	Antenas.	53
2.9.3	Propulsión.	55
2.10	Segmento terrestre.	58
2.11	Diseño de arquitectura.	59
2.11.1	Arquitectura Satelital.	60
2.11.2	Arquitectura Terrestre.	66
2.11.3	Arquitectura orbital.	67
2.11.4	Arquitectura seleccionada.	72
2.12	Simulación.	73
2.13	Procesamiento de datos.	76
2.14	Resultados de la simulación.	78
2.14.1	Análisis de la cobertura de la arquitectura Propuesta.	78
2.14.2	Contribución Satelital y análisis de la cobertura global.	80
2.14.3	Análisis de la distribución del tiempo de cobertura de la constelación.	81
2.14.4	Análisis del acceso total de la constelación a las regiones de interés.	82
2.14.5	Mapa de calor de la constelación.	82
2.15	Flujo de caja.	83
2.16	Limitaciones y Posibles mejoras de la simulación.	85
3	Discusión.	86
4	Conclusiones.	90
5	Referencias.	93
	Anexo.	95

Lista de Figuras

Figura 1-1: Porcentaje de penetración del internet dentro de las distintas regiones de Chile. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 17).....	7
Figura 1-2: Organizaciones gubernamentales destinadas al estudio. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 7).....	9
Figura 1-3: Organizaciones privadas destinadas al estudio. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 7)	9
Figura 1-4: Estimación del uso de ancho de banda de cada organización relacionada. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 42).....	10
Figura 1-5: Localización de las estaciones “Gateway” de Starlink en Chile. Elaboración propia.	13
Figura 1-6: Ejemplo de satélite HTS. (Swinford et al., 2015).....	15
Figura 1-7: Ejemplo del uso de figuras de mérito. (Wertz & Larson, 1999, p. 175).....	28
Figura 2-1: Nivel de acceso a internet por región. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 17)	30
Figura 2-2: Formas de acceso a internet, por región.(Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)	32
Figura 2-3: Distribución de tecnologías para el acceso a internet desde 2020 a 2024. Elaboración propia basada en Dataset “Respuesta t7376” (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024).....	35
Figura 2-4: Velocidad media por tecnología utilizada, desde 2020 a 2024. Elaboración propia basada en Dataset “Respuesta t7376” (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024)	36
Figura 2-5: Distribución de conexiones por velocidad (2024). Elaboración propia basada en Dataset “Respuesta t7376” (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024)	37
Figura 2-6: Distribución de centros de salud por ancho de banda. Elaboración propia basada en Dataset “Establecimientos red MINSAL”	38
Figura 2-7: Formas de Acceso a Internet. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 19)	41
Figura 2-8: Formas de Acceso a Internet por urbano/rural, GSE y sexo jefe de hogar. Fuente:(Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20).....	41
Figura 2-9: Resultados de la proyección de la demanda desde 2024 hasta 2039. Elaboración propia.	43
Figura 2-10: Concepto de operación del sistema planteado. Elaboración propia.	54
Figura 2-11: Espectro de rendimiento de sistemas de propulsión espacial para nanosatélites (empuje [N] vs. impulso específico [s]). Fuente: (Weston et al., 2025, p. 68)	56
Figura 2-12: Ejemplo de estación de antenas terrestre. Fuente: UK competition watchdog approves \$7.3B ViaSat-Inmarsat merger by c4isrnet.	58
Figura 2-13: Ejemplo de estación terrestre de Starlink (GateWay). Fuente: starlinkinternet.	59
Figura 2-14: Proyección de la tendencia del peso y ancho de banda de distintos satélites de comunicaciones por año. Elaboración propia.....	61

Figura 2-15: Geometría asociada a la capacidad de visión de un satélite.	63
Figura 2-16: Proyección de la tendencia del peso y ancho de banda de distintos satélites de comunicaciones por año para satélites geoestacionarios. Elaboración propia.	65
Figura 2-17: Posicionamiento del satélite geoestacionario dentro de la simulación. Elaboración propia.	69
Figura 2-18: Órbitas de satélites CubeSat organizadas por órbita e inclinación. Fuente: (A. López-Telgie et al., 2024, p. 455).....	71
Figura 2-19: Representación esquemática del algoritmo desarrollado para poder simular y recolectar datos de la arquitectura planteada. Elaboración propia.	74
Figura 2-20: Representación esquemática del algoritmo desarrollado para poder procesar los datos obtenidos de la simulación de la arquitectura. Elaboración propia.	77
Figura 2-21: Análisis de contribución satelital a la cobertura de la constelación simulada. Elaboración propia.	80
Figura 2-22: Análisis de horas de visibilidad por día de la constelación simulada. Elaboración propia.	81
Figura 2-23: Análisis del acceso de la constelación a Chile continental. Elaboración propia.	82
Figura 2-24: Mapa de calor general de la constelación sobre Chile.	83
Figura 3-1: Tendencia de la disposición al pago del servicio de internet dependiendo del costo mensual. Fuente: (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 28)	88

Lista de Tablas

Tabla 1-1: Propuestas de las especificaciones de los satélites. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 74)	11
Tabla 1-2: Efectos sociales y económicos en el caso de la introducción del sistema de comunicación por satélite en Chile. Elaboración propia con datos de (CTI Engineering Co. et al., 2016, Capítulo 4).....	12
Tabla 2-1: Nivel de acceso a internet por región, porcentual y unitario. Elaboración propia basada en (Instituto Nacional de Estadística, 2024, p. 16; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20).....	31
Tabla 2-2: Porcentaje del tipo de acceso a internet por región. Elaboración propia basada en (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)	33
Tabla 2-3: Tecnologías para el acceso a internet fijo. Elaboración propia basada en (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 25).....	34
Tabla 2-4: Totalidad de la demanda proyectada del sistema. Elaboración propia basada en (Instituto Nacional de Estadística, 2024, p. 16; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)	40
Tabla 2-5: Resultados de la proyección de la demanda desde 2024 hasta 2039. Elaboración propia.	42
Tabla 2-6: Proyección sobre los estándares de velocidades de internet para distintas funciones. Elaboración propia basada en (Viasat, 2025)	44
Tabla 2-7: Proyección de la velocidad para Internet Direct to cell. Elaboración propia basada en (Mark Jackson, 2024)	45

Tabla 2-8: Tabla de características de asociadas a distintas técnicas de modulación. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021)	45
Tabla 2-9: Valores para la separación de portadoras. Elaboración propia basada en (Mohamed Abdel Monem, 2019).....	46
Tabla 2-10: Parámetros de funcionamiento del enlace para diferentes funciones. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021; Mark Jackson, 2024; Mohamed Abdel Monem, 2019; Viasat, 2025)	47
Tabla 2-11: Proyección de cantidad de conexiones por grupo de interés para el primer caso. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021; Instituto Nacional de Estadística, 2024; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024; Viasat, 2025)	48
Tabla 2-12: Cálculo del ancho de banda para distintos grupos de interés para el primer caso. Elaboración propia.....	48
Tabla 2-13: Proyección de cantidad de conexiones por grupo de interés para el segundo caso. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021; Instituto Nacional de Estadística, 2024; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024; Viasat, 2025)	49
Tabla 2-14: Cálculo del ancho de banda para distintos grupos de interés para el segundo caso. Elaboración propia.	50
Tabla 2-15: Parámetros de Funcionamiento de distintos satélites. Elaboración propia.....	51
Tabla 2-16: Parámetros de funcionamiento de distintos satélites de tipo SmallSat. Elaboración propia.....	52
Tabla 2-17: Ventajas y desventajas de distintas antenas. Elaboración propia.	53
Tabla 2-18: Comparación de parámetros de comunicaciones “Cross-Link”. Elaboración propia basada en (Aizaz U. Chaudhry & Halim Yanikomeroglu, 2021)	54
Tabla 2-19: Ventajas y desventajas de distintos tipos de propulsión. Elaboración propia.	55
Tabla 2-20: Parámetros de distintos sistemas de propulsión para distintos satélites. Elaboración propia.....	56
Tabla 2-21: Ventajas y desventajas para distintas arquitecturas de estaciones terrestres. Elaboración propia.....	59
Tabla 2-22: Costos asociados al programa “Rideshare” de SpaceX. Elaboración propia.	60
Tabla 2-23: Resultados del cálculo de ancho de banda total por kilogramo de distintos satélites. Elaboración propia.	62
Tabla 2-24: Valores para distintos parámetros de funcionamiento por kilogramo de masa de la arquitectura planteada. Elaboración propia.	62
Tabla 2-25: resultados del cálculo del ángulo de “Halfwidth” de la arquitectura planteada. Elaboración propia.....	63
Tabla 2-26: Parámetros de funcionamiento y costo proyectados para distintos satélites. Elaboración propia.....	64
Tabla 2-27: Valores de parámetros de funcionamiento por kilogramo de masa de la arquitectura planteada. Elaboración propia.....	66
Tabla 2-28: Requerimientos de misión parámetros orbitales asociados a estos. Elaboración propia basada en (Wertz & Larson, 20101999, p. 181)	68
Tabla 2-29: Parámetros orbitales planteados para la arquitectura de satélite geoestacionario. Elaboración propia.....	69

Tabla 2-30: Ventajas y desventajas comparativas para regiones bajas del espacio. Elaboración propia.....	70
Tabla 2-31: Parámetros orbitales de los microsátélites simulados. Elaboración propia. ...	72
Tabla 2-32: Tabla resumen de las arquitecturas planteadas. Elaboración propia.	72
Tabla 2-33: Resultados de las figuras de mérito por región. Elaboración propia.	79
Tabla 2-34: Proyección del costo teórico del sistema. Elaboración propia basada en (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 28).....	84
Tabla 2-35: Proyección del costo teórico del sistema. Elaboración propia.....	84
Tabla 2-36:Proyección del flujo de caja teórico del sistema. Elaboración propia.	85

Nomenclatura

Símbolo/Acrónimo	Descripción	Unidad de medida
Δf	Separación de transmisora	KHz
θ	ángulo de “Halfwidth”	deg
A	Altura	Km
a	radio de la circunferencia de visión	deg
BW_{bit}	Ancho de banda en bit	Bit
BW_{Hz}	Ancho de banda en Hertz	Hz
BW_{req}	Ancho de banda requerido	MHz
$C_{ajustado}$	Costo ajustado	MUSD
$C_{original}$	Costo original	MUSD
e	excentricidad	-
FOV	Field of View	-
GEO	geostationary orbit	-
h	Altura	Km
HTS	High Throughput <i>Satellite</i>	-
I	Inclinación	deg
ISP	Impulso específico	segundos
LEO	Low earth orbit	-
MEO	medium Earth orbit	-
n_{fases}	Número de fases	-
$RAAN$	right ascension of the ascending node	deg
RF	Radiofrecuencia	-
SSO	Sun-synchronous orbit	-
TA	Anomalía verdadera	deg
V_{total}	Velocidad total	Mbps

1 Introducción.

A continuación, se presentará el contexto, estado del arte y el marco teórico bajo el que se trabajó con el fin de cumplir tanto con los objetivos que se plantea en este trabajo, como para poder así responde la hipótesis que se plantea.

1.1 Contexto.

Chile, debido a su geografía extensa y diversa—que incluye zonas remotas, áreas marítimas y regiones montañosas, de esta forma dando lugar a una gama de desafíos únicos en materia de conectividad y resiliencia de las comunicaciones, comunicaciones que son imperativas dentro del territorio. Lo anterior no solo debido a la importante necesidad de poder comunicarse desde cualquier sector del país, sino que también debido a diversos factores como la seguridad frente a diversos desastres y catástrofes que comúnmente azotan al país de Chile, lo anterior genera la necesidad de redes de comunicación resilientes y robustas, las cuales tengan infraestructura la cual pueda resistir los distintos tipos de desastre y permitir la difusión de información aun cuando otras redes de comunicación no lo permiten. Junto a lo anterior, la brecha digital corresponde al otro gran desafío en términos de comunicaciones que se presentan en el país de Chile, este persistente problema, limita capacidades como el crecimiento, oportunidades laborales y genera sectores los cuales se consideran aislados del resto de la infraestructura de comunicaciones.

El terremoto de 2010 genero un apagón que afectó a cerca del 90% de la población y dejo incomunicado por varias horas a varios sectores del país, es más, la calidad y coordinación de las comunicaciones fue uno de los grandes problemas que se tuvo, habiendo comunidades que nunca recibieron alertas o información de la situación del país en aquel momento (Arbour MaryCatherine et al., 2011). El costo de eventos como desastres y catástrofes son difíciles de medir, se sabe que se tiene una gama de costos directos, tales como costos de reparación de la infraestructura, el despliegue de recursos como personal y equipos, la contratación de servicios de telecomunicaciones especializados para estos desastres, información como costos de difusión de la información y la capacitación del personal para la gestión de la comunicación en estos casos. Pero no solo lo anterior, ya que también se tiene una gama de distintos costos indirectos, como el impacto económico por la interrupción de las comunicaciones, impacto social debido a la dificultad de coordinación o falta de comunicación en estas situaciones y efectos a largo plazo, como pérdida de confianza en las capacidades de las instituciones para el manejo de estos desastres. Es por esto que, por parte de una variedad de instituciones se buscan alternativas para poder aumentar la resiliencia de las telecomunicaciones a una variedad de desastres y catástrofes, un ejemplo relevante de estos estudios es el sobre el uso de satélites en regiones orbitales bajas para mejorar la resiliencia del internet frente a distintos tipos de riegos (Durairajan et al., 2024), este estudio muestra que, a medida que el daño a un área aumenta, la solución satelital en LEO (Low Earth Orbit) entrega una solución con latencia más consistente, comparándola con soluciones “Risk-Aware” con routing terrestre.

Una red de comunicaciones que pueda dar solución a la problemática de la brecha digital en Chile tendría una gama de distintos beneficios sobre el desarrollo del país, para empezar se disminuye la exclusión digital dentro del país, permitiendo que parte de los grupos más aislados accedan a servicios digitales básicos, como lo son el acceso digital a salud en línea, educación remota, banca y tramites digitales entre otros, los grupos más afectados por la falta de acceso corresponden a adultos mayores y grupos vulnerables, los grupos anteriores representan los grupos con la mayor falta de acceso, donde si el promedio país para la penetración del internet corresponde a un 96.5%, para grupos de adultos mayores este solo penetra un 82.9% (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 17) a lo anterior también se suma la brecha debido a la geografía regional, donde se sabe que las regiones de los lagos (penetración del internet del 90.5%) y la región de Aysén (penetración del internet del 84.7%) son regiones que están muy por debajo del promedio de acceso a internet del país, lo anterior se puede ver en la Figura 1-1 a continuación.

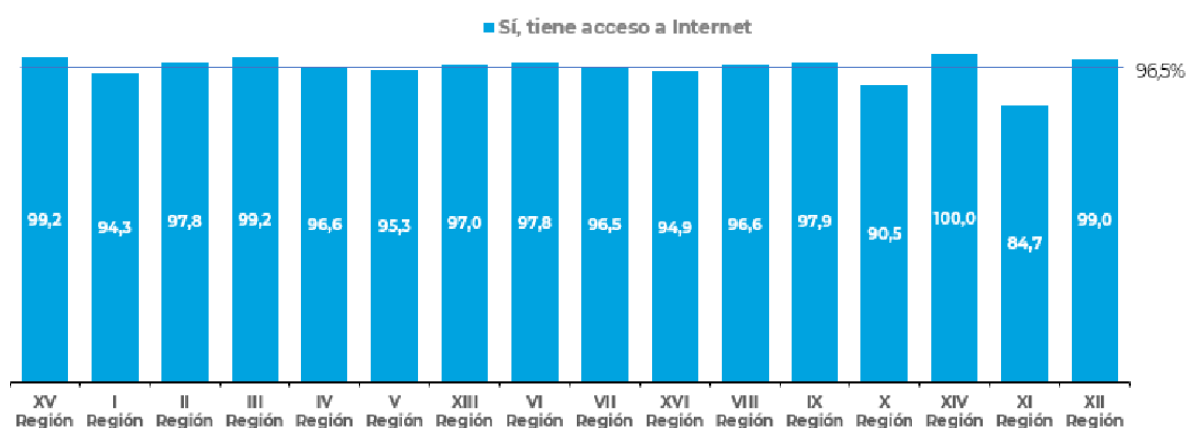


Figura 1-1: Porcentaje de penetración del internet dentro de las distintas regiones de Chile. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 17)

Otra consecuencia del cierre de la brecha digital correspondería a la impulsión de la economía y la empleabilidad, se sabe que la alfabetización digital es una de las principales limitantes para la inserción en empleos que requieren de habilidades tecnológicas, afectando a grupos que tengan un acceso limitado o directamente no tengan acceso a las telecomunicaciones. No solo eso, pero la importancia de las redes para la comunicación ha aumentado de manera exponencial en los últimos años, en 2017 la economía digital representaba el 22% del producto interno bruto del país y se estima que este número solo creció debido a los efectos de la pandemia de 2020 (Silva Alfonso & Osses Matías, 2021), lo anterior sumado a las proyecciones del mercado de “Tecnologías de la Información y la Comunicación” que para los años 2022 a 2027 espera un crecimiento de 3.9 Billones de dólares, se puede intuir que la necesidad de redes de telecomunicaciones para el país se están volviendo cada vez más necesarias (International Trade Administration, 2023).

Chile tiene acceso a telecomunicaciones las cuales tienen una infraestructura la cual es capaz de resistir a una cantidad de desastres y catástrofes, en su mayoría por parte de proveedores satelitales extranjeros y/o privados (como SpaceX/Starlink, OneWeb o satélites de telecomunicaciones arrendados). Si bien lo anterior entrega una alternativa para el acceso a telecomunicaciones resilientes, el depender de estos proveedores extranjeros

puede implicar riesgos en situaciones de crisis como conflictos geopolíticos, ciberataques o interrupciones comerciales.

A lo anteriormente mencionado se suma la importancia de escoger la arquitectura de misión correcta, para poder dar una solución adecuada a la problemática. Es importante tener en cuenta que la selección de una buena arquitectura es crucial, ya que las decisiones que componen una arquitectura pueden ser planteadas años antes de siquiera empezar con cualquier planteamiento matemático o físico del proyecto, estas decisiones ayudan a dar forma y enmarcar las restricciones y características claves de un sistema, ayudando así a dar un punto inicial al desarrollo futuro de cualquier sistema, aun sin tener claro el alcance final que tendrá el mismo. Cuando se busca concebir, diseñar, implementar y operar sistemas complejos, se requiere de una "buena" arquitectura, esta debe ser capaz no solo de cumplir con las necesidades planteadas por los stakeholders del proyecto, sino que esta debe entregar el retorno esperado, debe permitir un cierto grado de facilidad para su integración y ser operable de forma simple y confiable durante su vida útil. La probabilidad de éxito de un sistema se ve aumentada si se es cuidadoso a la hora de identificar y tomar decisiones para establecer la arquitectura del sistema, es decir, una buena arquitectura puede llevar a una gama de ventajas competitivas del sistema frente a otros, pero así mismo, se puede argumentar que una mala arquitectura puede condenar desarrollos completos al fracaso desde su concepción. Uno de los ejemplos más claros del correcto uso de la arquitectura de sistemas, está dado durante el programa apolo, ya que durante el primer año de este programa años antes que la gran mayoría del personal fuera contratado y gran parte del capital fuera entregada, se tomó la decisión que el alunizaje se haría mediante una cápsula dedicada, esta decisión ayudo a dar el punto de partida del programa, eliminando una gran cantidad de posibles arquitecturas y marcando un punto inicial claro sobre el cual iterar (*Crawley et al., 2016*).

1.2 Estado del Arte.

La sección de estado del arte se concentrará principalmente en analizar los contenidos de trabajo pasado que cumple un rol similar al trabajo que se presente este busco analizar la necesidad de un sistema satelital de telecomunicaciones para Chile, y también realizar la proposición de una arquitectura satelital para su problemática, junto con esto se analizaran algunos conceptos generales de arquitecturas de comunicaciones satelitales y algunos de los sistemas de comunicaciones satelitales actuales que fueron relevantes para este trabajo.

1.2.1 Estudio previo.

El caso de estudio más relevante para este trabajo fue realizado en el año 2016, el estudio (CTI Engineering Co. et al., 2016) fue el resultado del estudio encargado por el ministerio de asuntos interiores y comunicaciones de Japón (MIC), el estudio presentado se enfoca en la entrega de telecomunicaciones satelitales a algunas organizaciones gubernamentales y a ciertas empresas privadas mediante el uso de un satélite geoestacionario. Este estudio tiene 3 principales elementos que se presentaran, el Dimensionamiento de la demanda, el sistema propuesto y la conclusión a la que se llegó dentro de este trabajo.

El dimensionamiento realizado en este trabajo se realizó principalmente mediante encuestas a distintas organizaciones de gobierno y privadas. Para el estudio de futuras demandas de líneas satelitales se realizaron entrevistas con relación a la pertinencia de estimación y análisis de demandas de líneas satelitales.

Las organizaciones públicas encuestadas pueden apreciarse en la Figura 1-2 a continuación.

Campo	Nombre de Organización	Sigla
Demanda en campo de comunicación satelital • Comunicación	Subsecretaría de Telecomunicaciones	SUBTEL
	Subsecretaría de Telecomunicaciones Fondo de Desarrollo de Telecomunicaciones	FDT
	Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile	MINREL
	Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (organización interna de MINREL)	DIFROL
	Ministerio de Obras Públicas	MOP
	Servicio Nacional de Turismo	SERNATUR
	Servicio Nacional de Pesca	SERNAPESCA
	Ministerio de Agricultura	MINAGRI
	Servicio Agrícola y Ganadero	SAG
	Corporación Nacional Forestal	CONAF
	Instituto Antártico Chileno	INACH
	Ministerio de Bienes Nacionales	MBN
	Chile Dirección General de Aeronáutica Civil	DGAC
Demanda en campo de reducción de desastres • Prevención de desastres • Defensa nacional	Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública	ONEMI
	Carabineros de Chile	CARABINEROS
	Policía de Investigaciones	PDI
	Junta Nacional de Bomberos de Chile	BOMBEROS
	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada	SHOA
	Servicio Nacional de Geología y Minería	SERNAGEOMIN
	Servicio Sismológico Nacional, Universidad de Chile	SSN
Demanda en campo de educación • Educación	Ministerio de Educación	MINEDUC
Demanda en campo de medicina • Asistencia médica	Ministerio de Salud	MINSAL

Figura 1-2: Organizaciones gubernamentales destinadas al estudio. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 7)

Así mismo, las organizaciones privadas encuestadas se muestran en la Figura 1-3 a continuación.

Campo	Nombre de Organización	Sigla
Demanda en campo de comunicación satelital en el sector privado • Comunicación	Colegio de Ingenieros de Chile A.G.	—
	BOMBEROS de Chile	BOMBEROS
	Asociación Nacional de Televisión	ANATEL
	MOVISTAR ¹	—
	ENTEL (Empresa Nacional de Telecomunicaciones S.A.) ²	ENTEL

Figura 1-3: Organizaciones privadas destinadas al estudio. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 7)

Los resultados de la encuesta se pueden encontrar en la Figura 1-4 a continuación.

Clasificación	Organización	Banda descend. [Mbps]	Banda ascend. [Mbps]	MHz equiv.		TPE equiv.	
				Subtotal	Total	Subtotal	Total
Ministerios y agencias gubernamentales	SUBTEL	0.000	0.000	—	771.93	—	21.442
	FDT	37.680	37.680	65.94		1.832	
	ONEMI	17.150	17.150	30.01		0.834	
	MINREL	0.000	0.000	—		—	
	DIFROL	0.000	0.000	—		—	
	MOP	0.000	0.000	—		—	
	SERNATUR	1.500	1.500	2.63		0.073	
	SERNAPESCA	0.500	0.500	0.88		0.024	
	MINAGRI	0.500	0.500	0.88		0.024	
	SAG	48.500	48.500	84.88		2.358	
	CONAF	—	—	—		—	
	CARABINEROS	36.800	36.800	64.40		1.789	
	PDI	—	—	—		—	
	SHOA	0.000	0.000	—		—	
	INACH	0.000	0.000	—		—	
	MBN	4.000	4.000	7.00		0.194	
	MINEDUC	37.800	37.800	66.15		1.838	
	MINSAL	250.000	250.000	437.50		12.153	
	SERNAGEOMIN	5.250	5.250	9.19		0.255	
	SSN	1.421	1.421	2.49		0.069	
	DGAC	0.000	0.000	—		—	
Empresas privadas, etc.	Colegio de Ingenieros de Chile A.G.	0.500	0.500	0.88	0.88	0.024	0.024
	BOMBEROS	0.000	0.000	—		—	
	ANATEL	0.000	0.000	—		—	
Demanda futura				Subtotal (MHz)		772.80	
Demanda futura				Subtotal (TPE)		21.467	
Demanda pública				Subtotal (MHz)		1146.21	
Demanda pública				Subtotal (TPE)		(iii)	31.839
Demanda privada				Subtotal (MHz)		77.25	
Demanda pública				Subtotal (TPE)		2.146	
				Total MHz		1223.46	
				Total TPE		(iv)	33.985

Figura 1-4: Estimación del uso de ancho de banda de cada organización relacionada. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 42)

Notar que, a diferencia del trabajo realizado en este informe, el sistema propuesto trabajaba en las bandas *C* y *Ku*, a diferencia del trabajo actual que para satisfacer los estándares modernos de comunicación trabajara en banda *Ku* y/o *Ka*. Los valores de velocidades de banda descendente y ascendente (descarga y carga) en promedio no superan los 32 [Mbps] y se tiene una velocidad máxima de 250 [Mbps] para solo un ministerio (Ministerio de Salud). Se sabe que la mayoría de estas conexiones no están pensadas como conexiones móviles, es decir, estas representarían una red con un déficit en promedio un 68% bajo el estándar fijo actual (100 [Mbps] considerado el estándar de descarga para poder trabajar).

Para esta demanda se generan dos propuestas de especificaciones para satélites de comunicación que puedan satisfacer esta necesidad. Esta se puede apreciar en la Tabla 1-1 a continuación.

Tabla 1-1: Propuestas de las especificaciones de los satélites. (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 74)

Elemento	Especificación 1
1.Payload	
<i>Ku</i>	150W, 36/45channel
<i>C</i>	-
<i>Ka</i>	-
Total	36/45channel (active 36channel)
2.Payload Power	8 [kW] class
3. Mass	5.0 [ton] class (dry mass: 2.5 [ton] class)
4. Antenna	Diámetro de la antena.
<i>Ku</i>	2.3 [m]
<i>C</i>	-
<i>Ka</i>	-

La proyección del flujo de caja de este trabajo para los próximos 15 años de funcionamiento se generan para diferentes casos de funcionamiento, los resultados del estudio mostraron un costo total (costo inicial y costo de operación) para el caso donde se supone que el gobierno de Chile es dueño del satélite de **\$327.2 [MUSD]** y en comparación con el costo de arrendamiento de transpondedores de satélites comerciales extranjeros, **\$659.1[MUSD]**, la posesión de satélite propio tiene un costo-beneficio de **\$331.9[MUSD]**.

El estudio también entrega una lista de efectos sociales y económicos que podría tener el sistema. Estos se listan en la Tabla 1-2 a continuación.

Tabla 1-2: Efectos sociales y económicos en el caso de la introducción del sistema de comunicación por satélite en Chile. Elaboración propia con datos de (CTI Engineering Co. et al., 2016, Capítulo 4)

Área afectada.	Efectos sociales y económicos
Campo de comunicación (aseguramiento de la comunicación en lugares alejados)	• Difusión de teléfonos celulares en islas aisladas donde las compañías telefónicas móviles no se extienden. • Entrega de diferentes servicios tales como la asistencia médica remota, la educación a distancia, la emisión de imágenes de puertos (medidas de prevención y manejo de desastres), etc.
Campo de medicina (asistencia médica remota)	• Entrega de servicios médicos remotos en lugares despoblados. • Transmisión de información médica de pacientes desde vehículos de emergencia. • Apoyo a la asistencia médica remota por hospitales provisionales en situaciones de desastres
Campo de educación (educación en línea)	• Mejoramiento del nivel educativo en lugares remotos, islas aisladas, etc. • Sofisticación de la vida de pueblo por el ofrecimiento de contenidos relacionados con la educación ○ Emisión de contenidos del aprendizaje permanente (intercambios con los intelectuales, clases abiertas de universidades, etc.) ○ Contenidos relacionados con la solución de temas de la educación comunitaria (capacitación de profesores difícil de llevar a cabo regionalmente, ofrecimiento del aprendizaje avanzado local, etc.)
Campo de prevención y manejo de desastres (comunicación dedicada en situaciones de emergencias y de desastres)	• Recopilación rápida de información de desastres, comprensión de situaciones de daños 46. • Transmisión de imágenes de sitios de ocurrencia de desastres a varios lugares (servicios proporcionados: llamadas generales de voz, FAX, comunicación de datos, línea directa a los números previamente registrados, emisión masiva de FAX y datos a los gobiernos locales, transmisión de imágenes o transferencia de datos en paquetes). • Aseguramiento de líneas de comunicación en las zonas afectadas

Los resultados de este estudio son considerados como los referentes más relevantes para poder

En comparación a este estudio, los datos entregados por los distintos ministerios y agencias gubernamentales no fueron claros ni tan numerosos, solo se obtuvieron datos referentes a al acceso a internet (tiene acceso, si o no) y las condiciones de este (velocidad en [Mbps])

de parte de la subsecretaría de telecomunicaciones, referente a “Empresa económicas” (sin mayor descripción del área de trabajo, tamaño de la empresa, requerimientos, localización etc.) y centros de salud. El resto de la información debió ser obtenida mediante fuentes de información abierta disponibles.

1.2.2 Arquitecturas similares modernas más relevantes.

Las arquitecturas de comunicaciones utilizadas para sistemas espaciales tienen una alta gama de variedades, dependiendo de factores específicos y de las prioridades del sistema. Uno de los casos de estudio más relevantes para este trabajo corresponde a la arquitectura empleada por Starlink, en específico el modelo de Starlink v1.0, este sistema emplea constelaciones de aproximadamente 12,000 satélites (número aproximado de satélites Starlink v1.0) en órbita baja a aproximadamente 550 [km] de altura, para poder entregar servicios de internet satelital promocionados a velocidades de aproximadamente de entre 150 [Mbps] a 500 [Mbps], pero se sabe que la velocidad promedio del servicio tiende a ser de 50 [Mbps]. Los modelos de Starlink v1.0 utilizan un payload no especificado que permite el uso de bandas de frecuencia *Ku* y *Ka*. El sistema Starlink usa enlaces Inter satelitales (crossLink) así compartiendo las solicitudes de datos entre satélites, y eliminando la necesidad de siempre estar a rango de una estación terrestre para poder acceder al servicio, es mediante el uso de esta tecnología y su baja altitud que logra 45 [ms] de latencia en pruebas. El sistema de Starlink también logra disminuir la cantidad de estaciones terrestres necesarias para el funcionamiento del sistema, esto se atribuye a la alta densidad de satélites con capacidades de enlaces inter satelitales, para el territorio de Chile continental Starlink funciona principalmente mediante el uso de 7 estaciones terrestres, las ubicaciones de estas estaciones se pueden apreciar en la Figura 1-5 a continuación.



Figura 1-5: Localización de las estaciones “Gateway” de Starlink en Chile. Elaboración propia.

La gran mayoría de servicio de internet satelital a altas velocidades se enfocan en el uso de grandes constelaciones de satélites pequeños, a bajas alturas, para poder entregar servicios de telecomunicaciones con parámetros de funcionamiento competitivos.

Se sabe que los satélites de *Starlink v1.0* tiene una masa de aproximadamente 260 [kg] y una capacidad de funcionamiento de 20 [Gbit] por satélite.

Otro caso de estudio importante corresponde al caso de ARSAT, los satélites de ARSAT se enfocan en entregar servicio de telefonía, televisión e internet satelital en Sudamérica (Argentina, Chile, Uruguay, Paraguay, y Bolivia). ARSAT basa su funcionamiento en satélites geoestacionarios, que trabajan principalmente en banda *Ku*. Mediante la instalación de una multitud de bases terrestres (se indica la operación de sobre 80 estaciones de transmisión digital terrestre en Argentina), se distribuye el servicio al resto de los usuarios, el servicio entrega velocidades en promedio de *1.8 [Mbps]*.

1.2.3 Funcionamiento general de arquitecturas de comunicación.

Las arquitecturas satelitales funcionan mediante una red de satélites y estaciones terrestres interconectadas por enlaces ascendentes, descendentes y “*crosslink*” (*inter satellite link*). La visibilidad entre transmisor y receptor es crucial, ya que esto define la capacidad de transmitir y recibir señales entre el segmento espacial y terrestres. Si no se tiene acceso directo entre el satélite solicitando datos y la base terrestre el uso de “*crosslink*” puede presentar una solución, debido a que este permite el intercambio de solicitudes de datos y respuestas de datos entre satélites. Las nuevas constelaciones ubicadas en regiones espaciales a baja y media altura (LEO/MEO), diseñadas para servicios como telefonía celular e Internet (Wertz & Larson, 1999, p. 534).

1.2.3.1 Arquitectura: Órbita geoestacionaria.

Esta arquitectura utiliza satélites en órbita geoestacionaria (altura de 35.786 km, inclinación casi 0°), con un período orbital igual al de la rotación terrestre, lo que hace que el satélite parezca estacionario desde tierra.

Cuando un satélite geoestacionario está fuera de la línea de visión de una estación terrestre, un segundo satélite retransmite los datos entre él y la estación. Utilizar un satélite de retransmisión es eficiente que utilizar dos estaciones terrestres adyacentes como retransmisor, debido a que las estaciones terrestres de retransmisión a menudo deben estar en territorio extranjero, lo aumenta el costo, genera riesgos y disminuye la supervivencia del sistema. La desventaja obvia de esta arquitectura es el satélite de retransmisión adicional y su “*crosslink*”, lo que aumenta la complejidad, el riesgo y el costo del sistema.

1.2.3.2 Arquitectura: Baja Altitud.

Este tipo de arquitecturas clásicamente ubican constelaciones de aproximadamente 20 satélites (Pratt & Allnutt, 2020, p. 538) en órbitas ubicadas a altitudes bajas de entre *500 [km]* a *3,000 [km]*, en algunos casos siendo conectados por “*crosslink*”. Estos satélites tienden a necesitar de mayor control y “*stationkeeping*”, debido a que los satélites pueden agruparse, creando huecos de cobertura y cortes de servicio. Este tipo de constelación tiene una gran gama de variaciones con distintos enfoques, pero los más relevantes para el trabajo actual son:

- **“Big LEO’s” o satélites de datos de órbita baja (LEO) (Ej: Iridium Macrocell):**

Constelaciones masivas en LEO para servicios de banda ancha (acceso a Internet, troncales digitales), usando técnicas avanzadas de enrutamiento.

- **Satélites LEO para Celulares (Ej: Iridium, Globalstar):**

Brindan servicio de voz/data a móviles mediante handovers entre satélites, usando órbitas bajas (~1,000 km) para minimizar retraso.

- **Satélites de órbita media (MEO) (Ej: ICO):**

Operan en órbita media (~10,000 km), equilibrando cobertura global con menor retraso que GEO. Ofrecen telefonía y datos de alta velocidad.

1.2.4 Satélites HTS (High-throughput satellite).

Tecnologías especialmente relevantes de mencionar para el estudio, selección y diseño del sistema son el enfoque en satélites de alto rendimiento (*HTS*).

Los satélites *HTS* son una generación de satélites los cuales son capaces de entregar una amplia tasa de transferencia en comparación a otras tecnologías como *FSS*, *BSS* y *MSS*.

Una de las características fundamentales de plantear el enfoque sobre las tecnologías HTS corresponde a la capacidad de poder generar varios “haces de señal” los cuales dan servicio a áreas reducidas las cuales en su conjunto cubren toda la región (Swinford et al., 2015), a diferencia de la tecnología clásica de comunicaciones que utiliza un haz de gran tamaño. Un ejemplo de lo anterior se puede apreciar en la Figura 1-6.

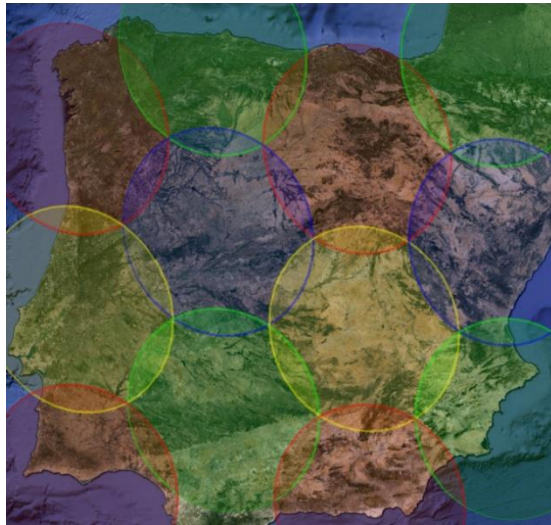


Figura 1-6: Ejemplo de satélite HTS. (Swinford et al., 2015)

Estos haces traen consigo beneficios como:

- Aumento de las ganancias de transmisión/recepción, dado las capacidades de tener un haz más estrecho, se incrementa el poder (tanto de la señal transmitida como la señal recibida) y por esto permite el uso de terminales más pequeñas y mayores órdenes de modulación, lo que finalmente se traduce en poder alcanzar mayores tasas de datos.

- Reusó de frecuencia, cuando un área está siendo cubierta por varios haces, estos pueden reusar la misma banda y polarización, aumentando las capacidades del sistema satelital para una cantidad fija de banda de frecuencia.

1.2.5 Bandas de Frecuencia.

En telecomunicaciones satelitales, una banda de frecuencia es la característica que delimita los valores mínimo y máximo (Hz), también determina las propiedades físicas de propagación de la señal. Su selección condiciona parámetros como la capacidad de transmisión (ancho de banda disponible), el tamaño de antena y la susceptibilidad a interferencias.

Las bandas de frecuencia más relevantes para el sistema que se quiere diseñar corresponden a las bandas de frecuencia *Ku* y *Ka*.

- **Banda Ku** tiene un rango entre 10.7-18 (GHz). Ofrece un equilibrio entre ancho de banda y resistencia a interferencias. Es ideal para transmisiones bidireccionales de datos, como internet satelital, debido a su capacidad para soportar altas tasas de transferencia (hasta 100 Mbps en configuraciones avanzadas). Este tipo de banda de frecuencia (>10 GHz) son absorbidas por gotas de agua, la atenuación por lluvia (rain fade) causa pérdidas de señal en climas húmedos. En algunos casos se usa en satélites HTS junto a la banda de frecuencia *Ka*.
- **Banda Ka** tiene un rango entre 18-40 GHz. Ofrece el mayor ancho de banda (5 veces más que banda *C* y 2 veces más que *Ku*), permitiendo velocidades más rápidas (hasta 200 Mbps) y antenas de tamaños menores. Este tipo de banda de frecuencia sufre alta susceptibilidad a la atenuación por lluvia (rain fade) y nieve, requiriendo compensación con “*link budgets*” o técnicas de modulación. Este tipo de banda de frecuencia es la más usada para satélites HTS, debido a que este tipo de frecuencia permite el uso de antenas comparativamente más pequeñas (menor tamaño en comparación a banda *Ku* y *C*)

En algunos casos se tienen sistemas que utilizan ambas bandas de frecuencia, a modo de maximizar la efectividad del sistema, sobre todo si se trabaja en órbitas de altura media o alta, algunos sistemas usan banda *Ku* para el “*downlink*” y banda *Ka* para el “*uplink*”, pero en general si lo que se busca es la mayor velocidad que se pueda entregar al servicio, la banda *Ka* es la indicada (Pratt & Allnutt, 2020).

1.3 Marco teórico.

El trabajo tiene un enfoque en obtención de valores numéricos que a grandes rasgos entreguen una idea de la dimensión de varios parámetros que permiten justificar, diseñar y evaluar, arquitecturas de comunicaciones satelitales. Es por esto por lo que el marco teórico se enfoca en cálculos de valores aproximados. Junto con lo anterior, las arquitecturas serán planteadas de forma general, donde los satélites serán aproximados a “cajas negras”, donde solo se tomará en cuenta sus parámetros físicos y de funcionamiento, como lo son la masa y el ancho de banda de cada satélite.

1.3.1 Cálculo y proyección de la demanda.

Para el diseño de un sistema que pueda entregar solución a la problemática planteada, primero se debe dimensionar la demanda que se tiene para el sistema. Este trabajo pondrá énfasis en el cálculo de la demanda no satisfecha y demanda donde el sistema puede entrar a reemplazar servicios inferiores. Como se mencionó anteriormente este trabajo busca generar aproximaciones que entreguen ideas generales de la dimensión de los parámetros asociados al trabajo. Es así como se caracterizará la demanda utilizando los porcentajes de acceso a la comunicación. En caso de no tener acceso directo al porcentaje de falta de acceso al servicio de comunicación estudiado, se utilizará el porcentaje de acceso al servicio de comunicación para poder estimar este valor. Se considera que la medida más correcta para poder realizar las estimaciones corresponde a grupos de personas (hogares, empresas, centros de trabajo, etc.) y no población.

Es así como los cálculos del dimensionamiento del servicio se calcularán utilizando las siguientes ecuaciones:

1.3.1.1 Grupo de interés: Hogares.

Para la demanda de hogares se utilizará la siguiente fórmula.

$$G_{interes} = G_{ToT} \cdot \text{Porcent}_{interes} \quad (1)$$

Donde:

- $G_{interes}$ Corresponde al grupo de interés que se obtiene (Grupo que pertenece a la demanda del sistema).
- G_{ToT} Corresponde al grupo total del cual se quiere conocer la demanda.
- $\text{Porcent}_{interes}$ Corresponde al porcentaje de la totalidad del grupo que tiene una demanda del sistema propuesto (ejemplo: porcentaje de hogares sin acceso a internet en una región).

1.3.1.2 Grupo de interés: Empresas o centros laborales.

Para la demanda en empresas y distintos centros laborales como por ejemplo colegios, hospitales, postas, etc. Se utilizarán datos los cuales fueron directamente solicitados a distintas subsecretarías de gobierno. Estos datos entregan la cantidad de centros y las condiciones de estos para acceder a internet. En el capítulo 2 se profundizará sobre las condiciones para poder aproximar la demanda dentro de estos. Pero se puede asumir la siguiente ecuación general para el cálculo de la necesidad.

$$G_{interes} = G_{ToT} \cdot (\text{Porcent}_{\text{Sin acceso}} + \text{Porcent}_{\text{Acceso deficiente}}) \quad (1)$$

Donde:

- $G_{interes}$ Corresponde al grupo de interés que se obtiene.
- G_{ToT} Corresponde al grupo total del cual se quiere conocer la demanda.
- $\text{Porcent}_{\text{Sin acceso}}$ porcentaje de las empresas o centros que no tienen acceso al internet.

- *Porcent_{Acceso deficiente}* Corresponde al porcentaje de las empresas o centros que tienen un acceso deficiente al internet (La definición de deficiente será detallada en el capítulo 2.3).

1.3.2 Proyección de la demanda.

Para el cálculo de la proyección de la demanda se utilizarán 2 modelos distintos (para grupos de clientes distintos)

- Modelo de exponencial decreciente:

$$C_A(t) = C_{A0} \cdot (1 + r_A)^{(t-t_0)} \quad (1)$$

- Donde:
- $C_A(t)$ Corresponde a los clientes por año t .
- C_{A0} Corresponde a clientes iniciales.
- r_A Corresponde a la tasa de migración anual.
- t_0 Corresponde al año base desde el que se genera la proyección.
- Modelo de crecimiento logístico:

$$C_B(t) = \frac{k}{1 + e^{-a(t-t_m)}} \quad (1)$$

- Donde:
- k Corresponde a la capacidad máxima del mercado.
- a Corresponde a la tasa de crecimiento intrínseco.
- t_m Corresponde al punto de máximo crecimiento
- t Corresponde al año de proyección de la demanda.

1.3.3 Caracterización del servicio y cálculos asociados.

La caracterización del servicio y el cálculo de la dimensión de los parámetros necesarios para satisfacer la demanda son parte importante de los parámetros necesarios para poder dimensionar un sistema. Para los cálculos asociados a la caracterización del servicio que entrega el sistema, primero se debe definir el servicio y su estándar, si bien esto se profundizara en el capítulo 2.8, este estudio se enfoca exclusivamente en soluciones de internet móvil por:

- Relevancia: El internet corresponde a la red que tiene mayor impacto sobre la población chilena, en 2024 tiene una penetración del 96.5% (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 17).

Notar que este trabajo se enfocará en el ancho de banda medido en Mega Hertz (MHz) debido a que esta es una medida universal la cual puede ser utilizada para estandarizar los

sistemas en distintas bandas de frecuencia, arquitecturas de sistema y tipos de servicio que buscan entregar (CTI Engineering Co. et al., 2016).

$$BW_{req} = \frac{V_{total}}{FEC \cdot \log_2(n_{fases})} \cdot (\Delta f) \quad (1)$$

Donde:

- BW_{req} Corresponde al ancho de banda requerido para la conexión [MHz].
- V_{total} Corresponde a la velocidad total de carga y descarga que se quiere entregar para la conexión [Mbps].
- FEC Corresponde al valor FEC asociado a la técnica de modulación utilizada (factor adimensional).
 - Notar: Para los cálculos presentados en este trabajo, se asume que el grado de integración permite el uso de la técnica de codificación 64QAM, esta tiene parámetros conocidos ($FEC = 0.873$ y $Eficiencia = 5.1152$ [MHz]) y es una de las técnicas de codificación utilizadas por los satélites StarlinkV1.0 (Dr. Sergei Pekhterev, 2021).
- n_{fases} Corresponde al número de fases que se tiene para la técnica de modulación utilizada, en este caso consideraremos que se utiliza el mismo método de modulación tanto para el enlace de carga como para el enlace de descarga (factor adimensional).
- Δf Corresponde a la "separación de portadoras", el cual corresponde al valor la separación en frecuencias entre subportadoras adyacentes [MHz].

Una vez seleccionado un estándar para el servicio, como por ejemplo 4G, y teniendo la información asociada a los parámetros de funcionamiento de esta (V_{total} , FEC , n_{fases} , Δf) se puede calcular el valor del ancho de banda que requiere una conexión para su funcionamiento teórico.

Para poder obtener los valores del ancho de banda total requerido para satisfacer la necesidad, se utilizó la siguiente ecuación:

$$BW_{TOTreq} = N^{\circ}_{conexiones} \cdot F_{simultaneidad} \cdot BW_{req} \quad (2)$$

Donde:

- BW_{TOTreq} Corresponde al ancho de banda total requerido para satisfacer la demanda [MHz].
- $N^{\circ}_{conexiones}$ Corresponde a la cantidad de conexiones totales que se proyecta para la demanda. (ejemplo: para un hogar se asumen 2 conexiones totales, si se tienen 10 hogares, el número de conexiones totales es 20.)
- $F_{simultaneidad}$ Corresponde al factor de simultaneidad de la demanda, es decir, aproximadamente que porcentaje de las conexiones totales se espera funcionen de forma simultánea (factor adimensional).
- BW_{req} Corresponde al ancho de banda requerido para la conexión [MHz].

1.3.4 Arquitectura de misión.

La forma más simple de poder comprender el concepto de “**arquitectura**” es internalizando una arquitectura como "una descripción abstracta de entidades de un sistema y la relación entre estas entidades". Para los sistemas como el que se desarrolló en este trabajo, se puede representar a la arquitectura como una gama de distintas decisiones (*Crawley et al., 2016*).

Las decisiones que componen una arquitectura pueden ser planteadas años antes de siquiera empezar con cualquier tipo de planteamiento matemático o físico del proyecto, estas decisiones ayudan a dar forma y enmarcar las restricciones y características claves de un sistema, ayudando así a dar un punto inicial al desarrollo futuro de cualquier sistema aun sin tener claro el alcance final que tendrá el mismo.

Anteriormente, se mencionó que la toma de decisiones respecto a la arquitectura de un sistema se toma en fases muy tempranas del desarrollo de este, esto se hace debido a que, de esta forma, las decisiones tomadas durante estas primeras fases pueden ser analizadas y refinadas, debido a que la toma de decisiones que definen una arquitectura es un proceso iterativo. Este proceso iterativo sobre las decisiones de arquitectura lleva a una gama de consecuencias: Entender el comportamiento o desempeño de un sistema ya existente; Imaginar formas en las que un sistema puede ser alterado; Para informar sobre decisiones o juicios sobre la naturaleza de un sistema; y para soportar el diseño y la síntesis de un sistema, lo cual llamamos arquitectura de sistema.

Para el sistema que se desarrolló en este trabajo, se presentaran los siguientes componentes principales de la arquitectura. Cabe mencionar que, si bien todos estos componentes serán estudiados, se tendrá especial enfoque en el componente del segmento espacial, dado que este es el elemento que pudo ser simulado.

- Segmento Espacial (arquitectura satelital, parámetros orbitales, parámetros de funcionamiento).
- Segmento Terrestre (Estaciones terrestres, antenas).

Y las principales arquitecturas con las que se trabajara son:

- **Arquitectura basada en GEO** (geostationary orbit): Este tipo de arquitecturas se basa en el uso de un satélite ubicado en una órbita geoestacionaria (35,876 [km]) y son consideradas la solución clásica para el problema de habilitar telecomunicaciones satelitales. Sus principales **ventajas** son:
 - No se necesita cambiar la conexión entre satélites.
 - Seguimiento del satélite de parte de la antena es generalmente innecesario (Órbita geoestacionaria sincroniza su rotación con la tierra, los satélites parecen estáticos respecto a un punto de la tierra permitiendo que las antenas terrestres siempre apunten al satélite).
 - Alto rango de cobertura por satélite, se generaliza en la literatura, que 3 satélites geoestacionarios podrían entregar cobertura global.

Las principales **desventajas** de utilizar este tipo de arquitecturas son:

- Alto costo de lanzamiento.
 - Alto costo del satélite.
 - Constante necesidad de “stationkeeping” para mantener la posición.
 - Pobre cobertura de los polos.
 - Alta latencia debido a la altura, Aproximadamente 500 [ms]
- **Arquitectura de baja altitud y múltiples satélites con “Crosslink”:** Las principales **ventajas** de utilizar este tipo de arquitecturas son:
 - Alta probabilidad de supervivencia
 - Reduce la susceptibilidad a bloqueos de señal (signal jamming) debido a que los satélites poseen un rango de cobertura limitado.
 - Reduce poder requerido para el transmisor, debido a la baja altura.
 - Bajo costo de lanzamiento por satélite (comparativamente hablando)
 - Capacidad de cobertura polar mediante el uso de órbitas inclinadas.

Las principales **desventajas** de utilizar este tipo de arquitecturas son:

- Compleja adquisición de conexión para estaciones terrestres (Orientación de la antena, frecuencia y tiempo).
 - Control de red dinámico y complejo.
 - Se requiere de muchos satélites para poder mantener una alta disponibilidad de conexión.
 - Dependiendo de la altura se tiene una gama de distintas latencias.
- **Arquitectura híbrida:** El uso de arquitecturas híbridas permite la utilización de distintos elementos de las arquitecturas anteriormente presentadas, de modo de obtener una combinación de ventajas y desventajas la cual se considere razonable para los fines presentes.

1.3.4.1 Arquitectura satelital.

La arquitectura específica de los satélites no será investigada en profundidad. Se considera que, para la determinación de parámetros de funcionamiento de forma empírica, se estudiarán distintas arquitecturas de satélites de comunicaciones actuales, de forma de poder intuir cuál serían los parámetros de arquitecturas posibles. Esto será profundizado en el capítulo 2.11.1.

1.3.5 Flujo de caja.

La realización de un flujo de caja será realizado para poder determinar uno de los parámetros de la viabilidad del sistema. Este utilizará la siguiente ecuación:

$$Ganancia_{TOT} = Cobro_{Mensual} \cdot 12 \cdot N^{\circ}_{Años} \quad (1)$$

Donde:

- $Ganancia_{TOT}$ Corresponde a la ganancia total para la “n” cantidad de años fiscales [CLP].
- $Cobro_{Mensual}$ Corresponde al cobro aproximado que se realizara por cliente por un mes de servicio [CLP].
- $N^{\circ}_{Años}$ Corresponde al número de años fiscales proyectados para el funcionamiento del servicio.

Cabe mencionar que él al valor de $Ganancia_{TOT}$ se aplicara una conversión a dólares [USD] debido a que esta es la moneda más relevante para el sistema.

1.4 Hipótesis.

El trabajo presenta busco validar una hipótesis principal, la cual busca entregar lineamientos generales sobre la solución a la problemática, mientras que las hipótesis secundarias buscan complementar esta mediante la ilustración de posibles soluciones.

Hipótesis principal:

Chile posee fundamentos económicos, tecnológicos y de mercado para implementar un sistema satelital soberano viable, donde:

Chile puede desplegar un sistema satelital soberano con rentabilidad >USD 500M, basado en

- Mercado objetivo de ≥ 200.000 clientes potenciales actuales.
- Retorno económico mínimo de >\$500[MUSD] en 15 años.
- Tecnología y antecedentes con menos de 15 años disponible que validen las arquitecturas planteadas.

Hipótesis secundaria:

La simulación realizada, aunque limitada por recursos computacionales y simplificaciones operativas sirve como prueba de concepto para validar:

- La compatibilidad básica de arquitecturas satelitales con la geografía chilena.

Hipótesis Nula:

La implementación de un sistema satelital soberano en Chile es económica y estratégicamente inviable debido a:

- Mercado insuficiente (<200.000 usuarios potenciales)
- Tecnología insuficiente (antecedentes insuficientes o que demuestran inviabilidad de la hipótesis).
- Retorno financiero no sostenible (ganancias < USD 500M en 15 años), incluso si se optimizan aspectos técnicos de cobertura.

1.5 Condiciones de diseño.

El trabajo presente utiliza una gama de condiciones de diseño.

- El lanzamiento de los satélites está fuera del alcance de este trabajo.
- Para poder definir si el sistema es económicamente viable, se establece que, si durante la vida útil del sistema este puede acumular una ganancia de un mínimo de \$500[MUSD], el sistema se considera como viable.
- La procuración de tecnologías o el desarrollo de nueva infraestructura está fuera del alcance de este trabajo.

1.6 Objetivos.

Considerando el contexto presentado en las secciones anteriores se presentarán los objetivos del trabajo, estos se enfocan en demostrar la viabilidad del sistema.

1.6.1 Objetivo General.

Evaluar la viabilidad estratégica, económica y técnica de un sistema de comunicaciones satelital soberano para Chile, considerando restricciones geográficas, demanda de servicios y diseñando una arquitectura de misión para evaluar el servicio.

1.6.2 Objetivos específicos.

1. **Cuantificación de la demanda** insatisfecha y posibles mercados para los años (2024 a 2039), usando datos públicos como los entregados por la SUBTEL y solicitudes directas a subsecretarías del gobierno de Chile. Modelar demanda con proyección de 15 años.
2. **Determinar el servicio prioritario** y sus requisitos técnicos mediante análisis comparativo de su penetración y aplicaciones. Crear perfil de servicio validado con estándares actuales.
3. **Desarrollar un modelo empírico** de estimación rápida para arquitecturas satelitales, correlacionando masa de satélites existentes (≤ 15 años) con su capacidad de servicio (Ancho de banda), mediante análisis estadístico de al menos 5 casos de estudio.

4. **Validar metodológicamente** arquitecturas satelitales mediante simulaciones básicas que contrasten LEO vs. GEO en parámetros clave. Generar 2 simulaciones ejecutadas en FreeFlyer con informe de resultados.

1.7 Alcance.

Se explicarán rápidamente los alcances del trabajo, dado los límites de tiempo y la complejidad de varios de aspectos de este trabajo, se considera importante poder aclarar los alcances del trabajo.

1. El trabajo busca modelar la demanda para el sistema de una forma simplificada, que permita entender la dimensión de esta, para esto se utilizaron modelos simplificados para la demanda actual, proyección de la demanda y el flujo de caja de esta demanda. La demanda actual se modela en base a varios porcentajes explicados en cada apartado, estos porcentajes a nivel país son utilizados con las distintas cantidades de hogares correspondientes para poder dimensionar.
2. Se asume a los satélites a utilizar como cajas negras, las cuales tienen características físicas como masa y volumen, junto con características funcionales, ancho de banda, frecuencia de radio, banda de frecuencia, entre otros, y cualquier tipo de modificación específica en los subsistemas de estos queda fuera del alcance de este trabajo. Lo anterior tiene la finalidad de por simplificar las arquitecturas a modelos escalables simples, que permitan diseñar o proponer arquitecturas con aproximaciones de sus parámetros de funcionamientos, sin la necesidad de trabajar en sus subsistemas específicos.
3. El modelo de flujo de caja utilizado se simplifica a modo de poder obtener la ganancia del cobro del servicio en una cantidad de años, para una cantidad de clientes (hogares, empresas, centros de salud y educación). Este modelo fue escogido no solo por la simplicidad de uso, sino también porque permite el cálculo aun teniendo incógnitas de mercado importantes, debido a que los alcances de este trabajo no buscan generar una investigación económica profunda del sistema, debiendo ignorar varios factores que agregarían complejidad al modelo, como posibilidades de arriendo de capacidades del sistema, efectos de este sobre el mercado, efectos sobre el modelo que podrían tenerse dependiendo del propietario del sistema, eventos globales actuales que afectan dentro del modelo del sistema, etc.

1.8 Metodología.

El capítulo presente busca facilitar la comprensión del trabajo desarrollado en este trabajo, resumiendo y simplificando las metodologías de trabajo utilizadas.

1.8.1 Objetivo 1: Cuantificación demanda.

Procesamiento de datos y proyección de la demanda. Para poder definir la posible demanda actual y proyectar está a 15 años (*Objetivo 1*), se recolectaron datos referentes a la penetración del internet sobre las distintas regiones del país, sobre las características del acceso (porcentaje de hogares que realizan sus conexiones mediante dispositivos, fijos, móviles o ambos, porcentaje de sectores urbanos y rurales que carecen de acceso) y como se distribuye este a lo largo de las regiones del país.

Para los datos solicitados, estos son procesados mediante el uso de algoritmos de Python, esto para poder clasificarlos y agruparlos dadas sus características de acceso al internet (velocidad, ancho de banda disponible, carencia de acceso) dependiendo del tipo de datos que se estuviera procesando (los datos entregados varían ampliamente dependiendo de qué subsecretaría se hace cargo de la distribución de estos.)

Para la identificación de los grupos de clientes posibles y su proyección en el tiempo, se revisan datos sobre grupos de clientes los cuales ya tienen acceso a internet, definiendo distintos criterios para poder integrar estos a un posible mercado para el sistema. Este grupo consiste principalmente de clientes que realicen sus conexiones exclusivamente mediante acceso fijo, este grupo luego es analizado para poder definir la cantidad de hogares que realizan esta conexión mediante conexiones fijas que no sean mediante fibra óptica o algún medio que entregue una conexión superior al estándar. Este dato se proyecta con la ayuda de la tendencia de crecimiento de las redes móviles, de años anteriores, es decir, se toma la tendencia de crecimiento de las redes móviles a complementar hogares que solo acceden mediante conexiones fijas y se proyecta esto para los próximos 15 años.

1.8.2 Objetivo 2: Determinación servicio prioritario.

La determinación de un servicio prioritario (*Objetivo 2*) comienza mediante el estudio de los medios de comunicación y su porcentaje de penetración y mantención en la población de Chile. Una vez determinada el método de comunicación con el que se trabajara, se estudia sobre los estándares de este, primero determinando cuál es la configuración del servicio más relevante para el sistema que se quiere diseñar.

Una vez generalizado el servicio que se quiere entregar y su configuración, se investiga sobre los estándares que se esperan para estos servicios actualmente, el estándar ayuda a determinar los parámetros de funcionamiento requeridos del sistema, funcionando como un criterio sobre el cual apoyar el diseño de las distintas arquitecturas que se presentaran más adelante. Este estándar se determina para conexiones individuales y se caracteriza la

demanda total empleando la demanda total, el factor de simultaneidad esperada para el tipo de conexiones y la cantidad de clientes totales para el servicio.

1.8.3 Objetivo 3: Desarrollar modelo empírico.

Para poder desarrollar el modelo se genera una lista de múltiples sistemas de comunicaciones satelitales que entren en el rango de tiempo asignado (15 años), dando prioridad a los sistemas que tengan menos de 8 años de antigüedad (se determina que 2017 fue un año crucial para varios sistemas de comunicaciones relevantes para el trabajo, durante este año se lanzó una multitud de sistemas de comunicaciones satelitales relevantes, se buscó seguir la evolución de varios de estos sistemas). Los sistemas listados se filtran dada la cantidad de información que se pudo encontrar y corroborar de los sistemas, así limitando de gran manera la cantidad de satélites, también se separó en 2 grupos de datos. El primer grupo corresponde a satélites bajo los 1,600 [kg] (satélites que entren en la clasificación de SmallSat usada por BryceTech (BryceTech, 2025, p. 3)) mientras que el segundo grupo corresponde a satélites sobre los 2,900[kg] y bajo los 6,500 [kg].

Para ambos grupos de satélites se prioriza encontrar los parámetros más relevantes para poder caracterizar su funcionamiento, estos parámetros fueron la masa de cada satélite y el ancho de banda total que son capaces de entregar, otros parámetros fueron considerados, pero debido a que no se pudo obtener toda la información de los satélites se redujo a la información más básica y significativa que se tuviera disponible.

Para el desarrollo del modelo empírico (*Objetivo 3*) se procesaron los datos mediante el uso de un algoritmo en Python, de forma de poder determinar una línea de tendencia para la eficiencia masa/Ancho de banda, de esta forma determinando una tendencia respectiva para los 2 grupos de satélites.

1.8.4 Objetivo 4: Simulación arquitecturas.

La metodología para este objetivo se divide en 3 partes.

El diseño de la arquitectura, donde se investiga principalmente las arquitecturas completas de los sistemas analizados para el objetivo 3, esto significa la revisión de los parámetros orbitales (altura, inclinación, planos orbitales, etc.), estudio de su segmento terrestre (cantidad de estaciones terrestres, radio de funcionamiento para comunicaciones entre la estación y un satélite) y estudio de elementos secundarios que pueden tener impacto sobre la simulación, para este último punto se resalta la revisión de los parámetros de funcionamiento del subsistema de propulsión de los satélites y los parámetros asociados al cono de visión del satélite (FOV). Una vez agrupados los distintos elementos de la arquitectura se diseña una arquitectura completa que pueda ser simulada, para esto se escogen parámetros básicos para los satélites que se quieren utilizar en la arquitectura (relación masa/ancho de banda) junto con los parámetros orbitales que estos utilizaran (se tiene como necesidad implícita la utilización de órbitas SSO para el o los satélites pequeños que se utilicen), luego se utilizan las arquitecturas investigadas para aproximar el

funcionamiento de la arquitectura planteada al funcionamiento de uno de los casos de estudio, determinando la cantidad de bases terrestres y la posible ubicación de estas, junto con los parámetros como el cono de visión del satélite.

Una vez generada la arquitectura a simular, se procede a la creación de 2 algoritmos distintos, un algoritmo permitirá la simulación de la arquitectura diseñada dentro del software de simulación FreeFlyer. Mientras que el segundo algoritmo procesara los datos obtenidos del modelo de simulado para poder determinar distintos parámetros de funcionamientos que permitan evaluar y comparar el desempeño de la simulación. Los datos crudos obtenidos de la simulación corresponden a horario de acceso (inicio de cobertura, fin de cobertura y duración del evento) de cada satélite, este dato puede ser solicitado a nivel país, por región individual y hasta por punto (cada región está compuesta por una cantidad de “ n ” puntos, los cuales guardan información de manera individual, esta información corresponde a veces que el punto fue visto, coordenadas, y si el punto está siendo visto), también se almacenan datos respecto a la cantidad de veces que cada punto que compone las distintas regiones fue visto, esto permite la generación de un mapa de calor, permitiendo analizar la capacidad de acceso de la constelación al país. Los datos almacenados fueron solicitados por segundo. Otro grupo de datos que se solicitó obtener de la simulación fueron las “Figuras de mérito de cobertura” (Coverage Figures of Merit), estas figuras son parámetros que caracterizan la cobertura de una constelación (Wertz & Larson, 1999, p. 173) para poder facilitar la comparación del desempeño de cobertura de una constelación frente a otra.

Se solicitaron las figuras de mérito de:

- **(Percent Coverage)**

Para cualquier punto del mallado corresponde al número de veces que el punto fue cubierto, por uno o más satélites, dividido por el total de tiempo de la simulación.

- **(Maximum Coverage Gap (= Maximum Response Time))**

Corresponde a la más grande brecha de tiempo para la cobertura de un punto.

- **Mean Coverage Gap**

Corresponde a la duración promedio de las brechas de cobertura para un punto en la simulación.

- **Time Average Gap**

Corresponde a la duración promedio de las brechas de cobertura para un punto, sobre el tiempo total de la simulación.

La Figura 1-7 muestra un ejemplo del uso de las figuras de mérito de cobertura para la evaluación y comparación de 3 arquitecturas distintas.

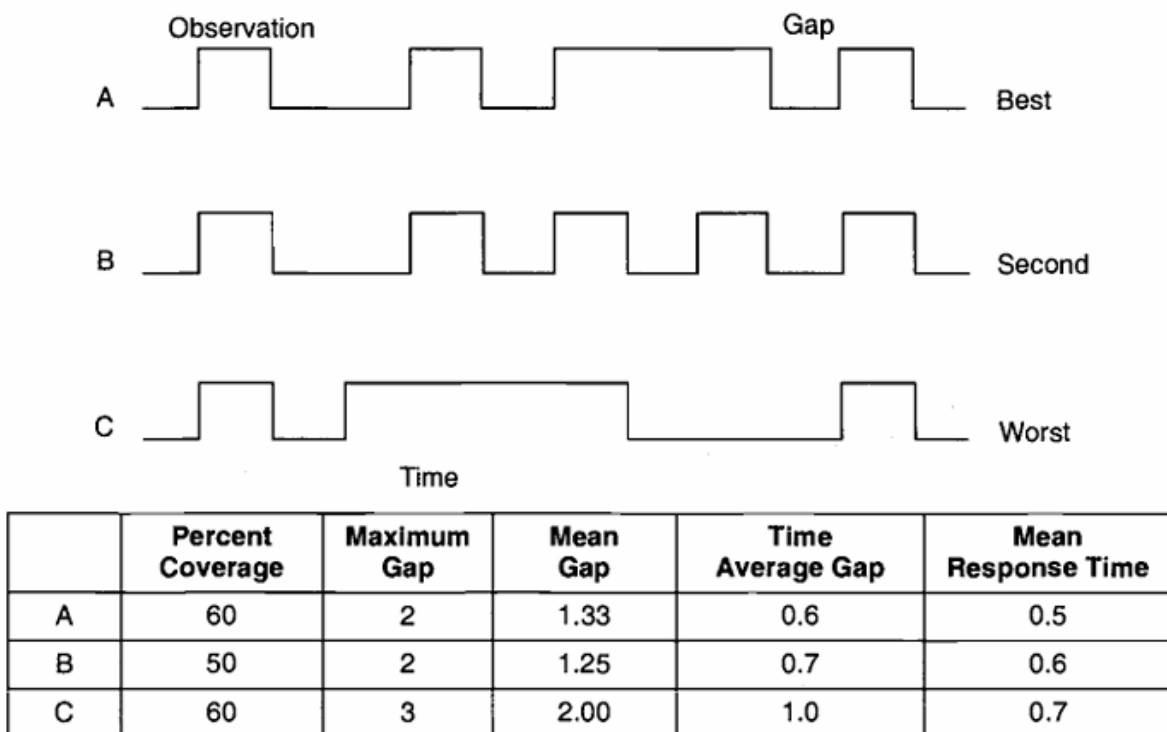


Figura 1-7: Ejemplo del uso de figuras de mérito. (Wertz & Larson, 1999, p. 175)

Para el ejemplo de la Figura 1-7 se muestran 3 arquitecturas distintas, donde la arquitectura A corresponde a la arquitectura con mejor cobertura, mientras que la arquitectura B, tiene la segunda mejor cobertura, con la arquitectura C teniendo la peor arquitectura de las 3. Se puede notar que si bien la arquitectura C y A comparten el mismo valor de “percent coverage” la brecha máxima (maximum gap), la brecha media (mean gap) y el “time average gap” son menores en la arquitectura A, indicando que la arquitectura A en comparación a la arquitectura C, tiene una brecha máxima de cobertura menor, las brechas de cobertura están mejor distribuidas a lo largo del tiempo y la duración promedio de cada brecha es menor. De esta forma se puede apoyar la conclusión que la cobertura de la arquitectura A es más óptima a la cobertura de la arquitectura C.

El algoritmo de procesamiento de datos fue generado en Python, este algoritmo busca procesar y limpiar los datos entregados, de forma de poder obtener distintos parámetros de funcionamiento con los que evaluar el desempeño de la constelación y poder facilitar la iteración dentro de la misma. Este algoritmo busca entregar datos refinados y representaciones gráficas del tiempo total de cobertura de la constelación y de cada satélite individual. Entregando el porcentaje de aporte de cada satélite a la cobertura y las horas que cada satélite tiene acceso al país por día y la duración total de la simulación. Datos por puntos, entregando información detallada por coordenada y permitiendo generar mapas de calor de distintos días y horas. Datos detallados sobre los sectores con menor cobertura y mayor necesidad de esta. Notar que, en la gran mayoría de los datos obtenidos de la simulación, si se está utilizando un satélite geoestacionario, los datos de este son

analizados de forma aparte, ya que al tener acceso permanente generaría problemas para analizar el resto de la constelación de satélites.

2 Desarrollo y Resultados.

A continuación, se presentará el desarrollo principal de los distintos elementos que se presentaron en este trabajo, estos se presentan con sus respectivos resultados pertinentes.

2.1 Estudio de la necesidad.

Para el estudio de la necesidad del presente trabajo, se analizaron distintas fuentes de información de carácter público (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024), junto con la solicitud de datos a varias entidades de gobierno mediante el uso del portal de transparencia del gobierno de Chile. Los distintos documentos que fueron analizados permitieron el estudio de distintas características de las redes de comunicaciones en Chile, y determinar la necesidad de un sistema de comunicaciones satelitales para Chile.

Es así como a continuación se desglosará el análisis en 6 elementos distintos.

1. Análisis general de la población y el porcentaje de conexiones dentro del país.
2. Análisis de conexiones de empresas comerciales de internet fija.
3. Análisis de conexiones de centros de salud.
4. Análisis de conexiones a Instituciones educativas públicas.
5. Análisis de Necesidad para regiones fuera de Chile continental.
6. Proyección de la demanda para los próximos 15 años.

2.2 Análisis general de la población y el porcentaje de conexiones dentro del país.

Para empezar, se define al grupo de interés como el grupo de posibles beneficiarios de la instalación de un sistema de comunicaciones satelitales en Chile, estos pueden ser hogares, centros de salud, empresas privadas, centros educativos, entre otros.

Los grupos de interés corresponden así al número de posibles clientes que se puede esperar para el servicio. Notar que, el sistema planteado no busca competir con el servicio entregado por acceso a internet mediante fibra óptica, o internet móvil de alto nivel como lo son conexiones 5G, el servicio plantea una opción accesible y resiliente a catástrofes y siniestros, manteniendo un estándar que permita elaborar funciones como trabajo remoto.

Para poder generar una primera aproximación de la necesidad de un sistema satelital de comunicaciones para Chile, se analizarán los datos entregados por la SUBTEL en su análisis de 2024 (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024) donde se entregan los porcentajes correspondientes a las conexiones por hogares de cada región, el tipo de acceso a internet que se tiene, si pertenece al sector rural o urbano, entre otros.

En la Figura 2-1 se presenta de forma gráfica el nivel de acceso a internet que se tiene dependiendo de la región, donde se puede presenciar que el acceso a internet por región no presenta grandes brechas por región, siendo Aysén la región que presenta el menor porcentaje de conexiones a internet con un 84.7%.

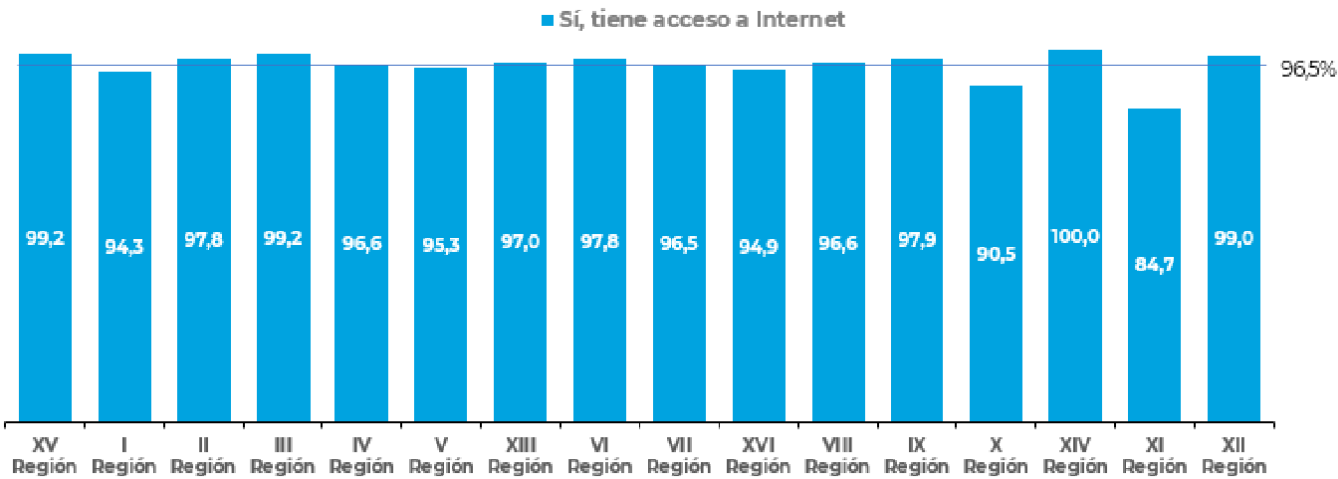


Figura 2-1: Nivel de acceso a internet por región. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 17)

Estos datos de manera aislada no presentan un indicador claro de la posible necesidad de complementar el acceso a internet dentro del país, por lo cual esta información será complementada con los datos entregados por el CENSO 2024 (Instituto Nacional de Estadística, 2024, p. 16) donde se utilizara al número hogares por región entregado por el CENSO 2024 junto con la información del nivel de acceso a internet por región, para de esta forma poder generar una cifra aproximada de la cantidad de hogares con acceso a internet por región, como se puede apreciar en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Nivel de acceso a internet por región, porcentual y unitario. Elaboración propia basada en (Instituto Nacional de Estadística, 2024, p. 16; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)

Región	Porcentaje con internet	Porcentaje sin internet	N.º de hogares sin internet	N.º hogares con solo internet fijo
XV	99.2	0.8	708	31,772
I	96.1	3.9	5,587	47,417
II	97.8	2.2	5,100	46,134
III	99.2	0.8	1,116	1,116
IV	96.6	3.4	12,675	76,421
V	95.4	4.6	42,047	60,329
XIII	97.8	2.2	60,824	201,827
VI	97.1	2.9	11,831	62,827
VII	96.5	3.5	17,033	44,772
XVI	95.0	5.0	11,742	11,038
VIII	96.7	3.3	21,806	39,647
IX	98.0	2.0	9,625	65,928
X	90.5	9.5	17,431	20,183
XIV	99.9	0.1	404	71129
XI	84.7	15.3	8,001	2039
XII	98.9	1.1	843	11185
Total	-	-	226,773	793,763

Con esta información, se tiene una idea aproximada de la cantidad de hogares de Chile los cuales no tienen acceso a internet, estos son **226,773 hogares** estos hogares representan un grupo de interés para el presente trabajo, ya que se puede considerar que estos son un posible grupo beneficiado por la implementación de un sistema satelital de comunicaciones.

Ahora, refiriendo nuevamente al informe final de “acceso y uso de internet” (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024) podemos refinar los datos de los hogares con acceso a internet obtenidos anteriormente, de forma de poder desglosar el tipo de acceso a internet que se tiene en cada una de las regiones, y de esta forma poder definir la cantidad de hogares que componen al grupo de interés para este sistema. El desglose del tipo de acceso a internet se presenta en la Figura 2-2.

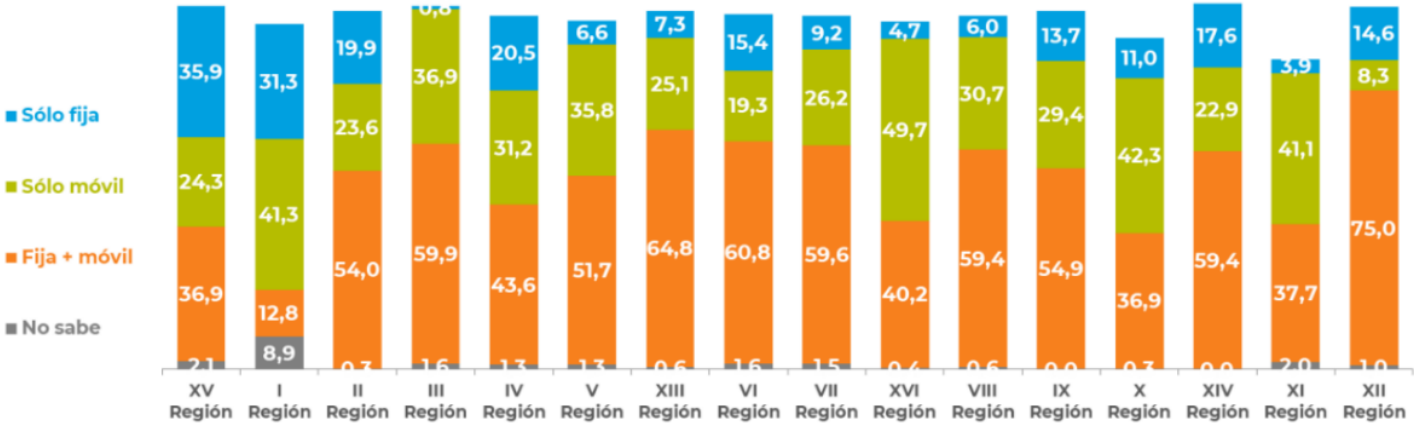


Figura 2-2: Formas de acceso a internet, por región. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)

Utilizando la información aproximada del número de hogares con acceso a internet, la cual fue presentada en la Figura 2-1, se puede agrupar la cantidad de hogares con internet dependiendo del tipo de acceso que se tiene, ya sea solo móvil, solo fija, fija y móvil, o no sabe. Esta información puede ser apreciada en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Porcentaje del tipo de acceso a internet por región. Elaboración propia basada en (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)

Región	Solo conexión fija. [%]	Solo con conexión móvil. [%]	Conexión mixta. [%]	No sabe. [%]	Total, sin internet. [%]
XV	35.9	24.3	36.9	2.1	0.8
I	33.1	41.3	12.8	8.9	3.9
II	19.9	23.6	54.0	0.3	2.2
III	0.8	36.9	59.9	1.6	0.8
IV	20.5	31.2	43.6	1.3	3.4
V	6.6	35.8	51.7	1.3	4.6
XIII	7.3	25.1	64.8	0.6	2.2
VI	15.4	19.3	60.8	1.6	2.9
VII	9.2	26.2	59.6	1.5	3.5
XVI	4.7	49.7	40.2	0.4	5.0
VIII	6.0	30.7	59.4	0.6	3.3
IX	13.7	29.4	54.9	0.0	2.0
X	11.0	42.3	36.9	0.3	9.5
XIV	17.6	22.9	59.4	0.0	0.1
XI	3.9	41.1	37.7	2.0	15.3
XII	14.6	8.3	75.0	1.0	1.1

Ahora, como se mencionó anteriormente la finalidad del servicio es entregar un acceso a internet lo suficientemente robusto para poder desarrollar **actividades laborales y de comunicación básica**. Es por esto por lo que, para los hogares con acceso a internet bajo ciertas condiciones pueden ser considerados como parte del grupo de interés. Estas condiciones son:

- Pertenecer al grupo de hogares que solo tiene acceso a internet mediante conexión fija.
- Esta conexión no es mediante fibra óptica.

Es así como se tiene el siguiente desglose de hogares que tienen acceso a internet exclusivamente mediante conexión fija presentado en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Tecnologías para el acceso a internet fijo. Elaboración propia basada en (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 25)

Tipo de conexión fija	porcentaje de las conexiones fijas	N.º de hogares
Fibra	67.1%	532,615
Otro	32.9%	261,148

Es así como se llega a la conclusión, que mediante un análisis general de los datos entregados por la SUBTEL en combinación con los datos poblacionales entregados por el CENSO 2024, se tienen 2 posibles grupos de interés que pueden componer el grupo de interés de hogares chilenos que podrían ser clientes del sistema. Para poder ser conservadores con este grupo de interés solo se considerará el grupo de hogares que no tienen acceso a internet, es decir se tomarán solo **226,773 hogares**. Pero se debe tener en cuenta un posible aumento de la demanda de hasta **261,148 hogares** que solo tienen acceso a internet bajo el estándar de la fibra óptica y pueden ser considerados dentro del grupo más vulnerable a perder acceso a internet debido a la infraestructura usada.

2.3 Análisis de conexiones de empresas comerciales de internet fija.

Dentro de los datos solicitados a las distintas subsecretarías de Chile, se encuentra la solicitud por información referente a las conexiones hechas por “empresas comerciales”. Se intentó aclarar el criterio utilizado para definir “empresas comerciales” pero no se obtuvo respuesta. Es por esto por lo que se decide asumir que estas pueden componer empresas de hasta un máximo de 100 empleados simultáneos.

La información entregada corresponderá a datos sobre las conexiones realizadas por empresas comerciales durante el año 2024, se detalla el año y mes cuando estas conexiones fueron realizadas, la tecnología usada para acceder a internet, la comuna desde la cual se generó el acceso, la velocidad de la conexión (La información entregada no tiene unidad de medida, pero se asume que se utilizó la unidad de medida Kbps), y la cantidad de conexiones realizadas. Se solicitó también información sobre si estas conexiones fueron realizadas desde sectores urbanos o rurales, pero se informó de la carencia de datos sobre conexiones realizadas desde sectores rurales, así que se debe asumir que estos datos son únicamente desde **sectores urbanos**. La Figura 2-3 presenta la distribución de la cantidad de conexiones registradas dependiendo de la tecnología utilizada para acceder a internet.

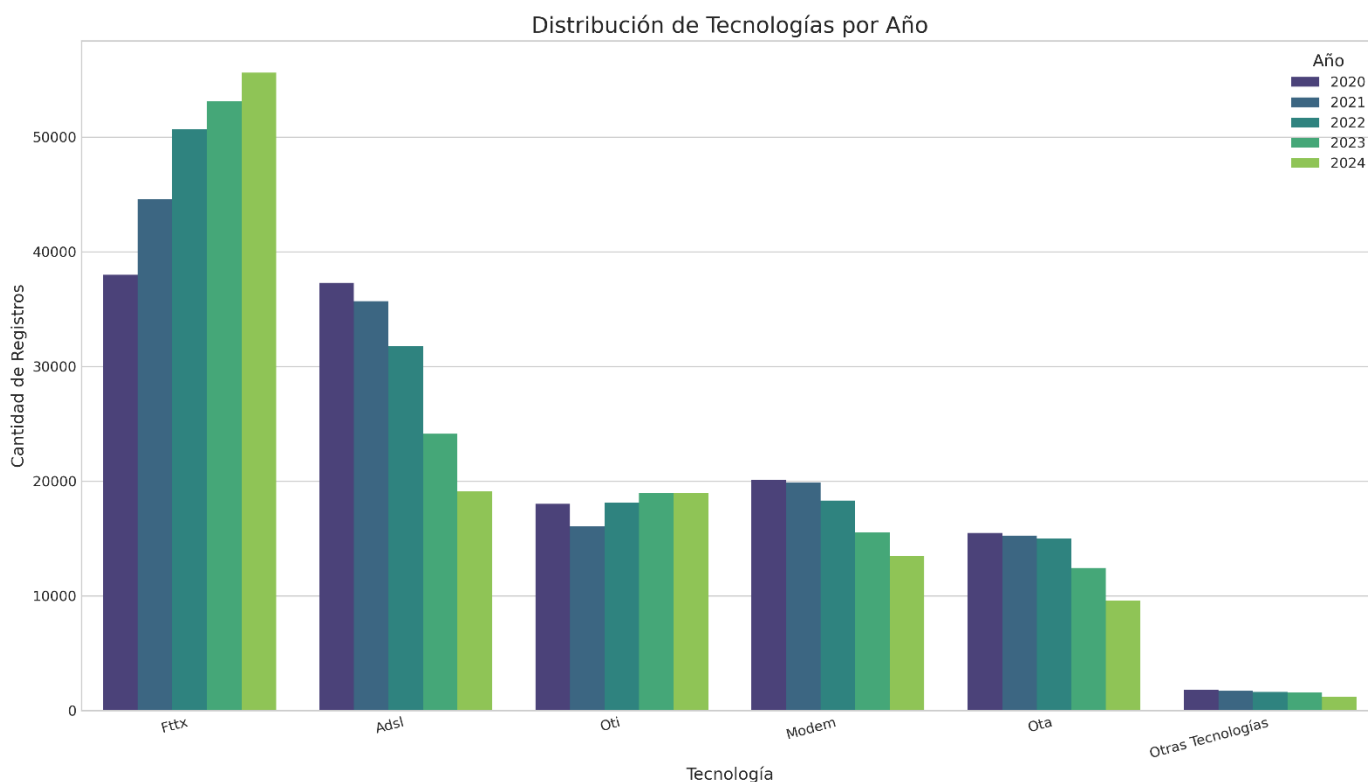


Figura 2-3: Distribución de tecnologías para el acceso a internet desde 2020 a 2024. Elaboración propia basada en Dataset "Respuesta t7376" (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024)

De esta figura podemos concluir que a medida que avanza el tiempo, existe una tendencia a modernizar las redes utilizadas para trabajar, viendo como las redes de tipo Ftx (*fiber to the x*) se vuelve más común, esto trae consigo una mejora del promedio de la velocidad del internet utilizado. Ahora dependiendo de la criticidad del trabajo, varias de las empresas que utilizan tecnologías con fibra (Ftx) aún pueden ser consideradas como parte del grupo de interés del sistema, pero esto debe venir justificado con un estudio más profundo sobre el trabajo realizado por las empresas y el nivel de interés que estas puedan tener en sistemas que permitan el acceso a internet mediante la infraestructura satelital (Infraestructura menos vulnerable a problemas como desastres naturales o siniestros).

La Figura 2-4 presenta la distribución de la velocidad Media de cada tecnología utilizada por año de servicio.

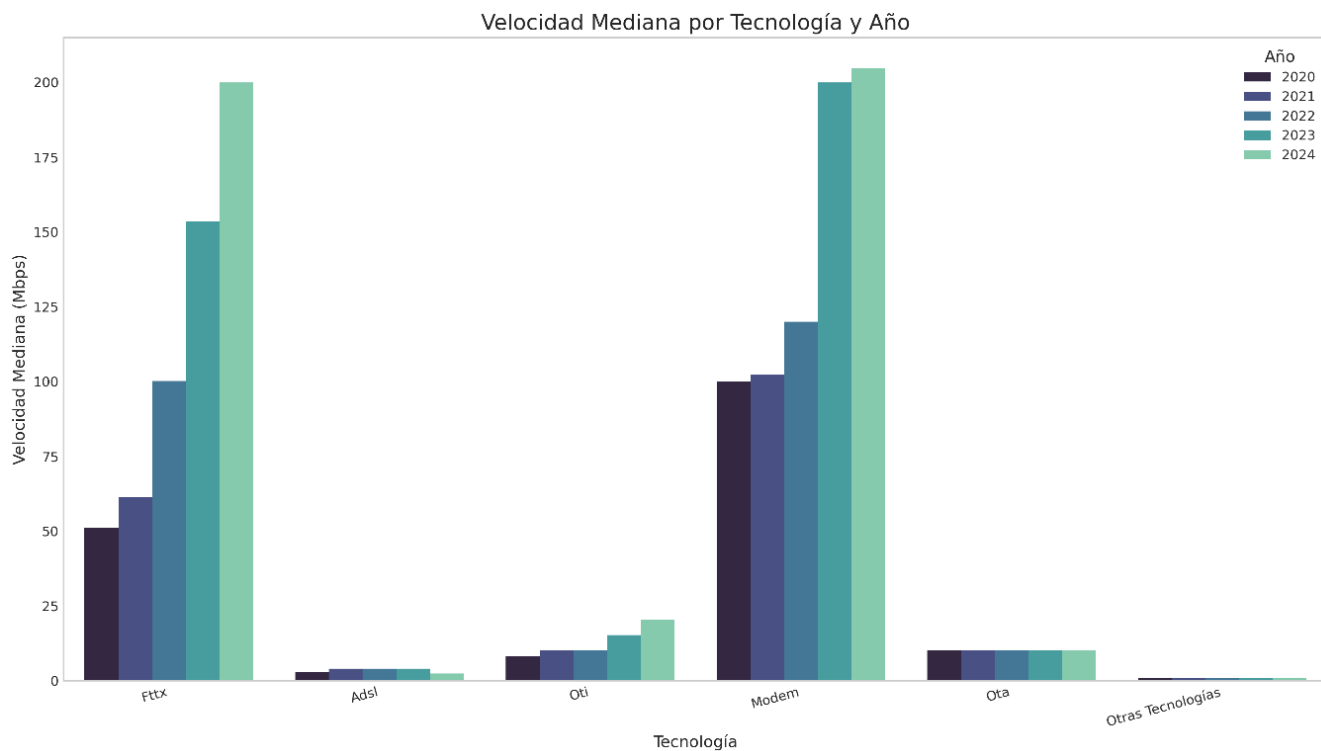


Figura 2-4: Velocidad media por tecnología utilizada, desde 2020 a 2024. Elaboración propia basada en Dataset “Respuesta t7376” (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024)

Como se mencionó anteriormente bajo ciertas condiciones algunas de las empresas las cuales tienen acceso a internet mediante fibra pueden ser considerados como parte del grupo de interés, así mismo se considera que todas las empresas que operan utilizando tecnologías las cuales entreguen un servicio bajo los 100 Mbps pueden ser considerados dentro del grupo de interés del sistema, dado que se estima que este puede entregar un servicio superior. Lo anterior puede ser visualizado en la Figura 2-5 la cual muestra la distribución de la cantidad de conexiones en el año 2024 diferenciando entre conexiones que superen los 100[Mbps] como promedio.

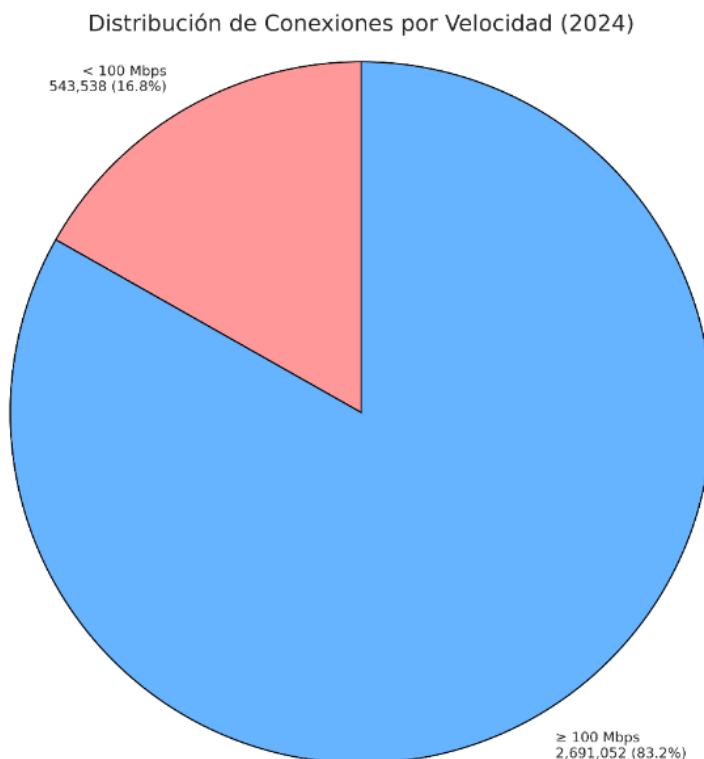


Figura 2-5: Distribución de conexiones por velocidad (2024). Elaboración propia basada en Dataset "Respuesta t7376" (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024)

Ahora tomando el grupo de empresas que trabajan bajo la velocidad establecida, se tiene **~543 empresas** que pueden ser consideradas parte del grupo de interés para la primera aproximación.

2.4 Análisis de conexiones de centros de salud.

Otro grupo de datos los cuales fueron solicitados a las subsecretarías de Chile fueron datos sobre los hospitales, centros de salud y centros de atención secundaria a los cuales se les entrega acceso al internet, información relevante como la velocidad entregada, tipo de conexión, subsidios, proyectos, concursos vigentes y adjudicados, proyecciones de la demanda, costos asociados a esto. Junto con la respuesta entregada por el MINSAL, se utilizarán datos de carácter públicos para poder complementar la información entregada.

La información entregada por el MINSAL corresponde a una lista de datos información sobre el tipo de establecimiento de salud, la región, dirección, comuna y provincia donde se ubica el establecimiento, y el ancho de banda principal, de respaldo primario y secundario, junto con la aclaración si se tiene acceso dedicado al internet por parte del establecimiento de salud. La Figura 2-6 muestra la cantidad de centros de salud por región, y la calidad del acceso que estos tienen a internet, si sus conexiones promedio tienen una velocidad bajo los 100 [Mbps] entonces se consideran dentro del grupo de interés.

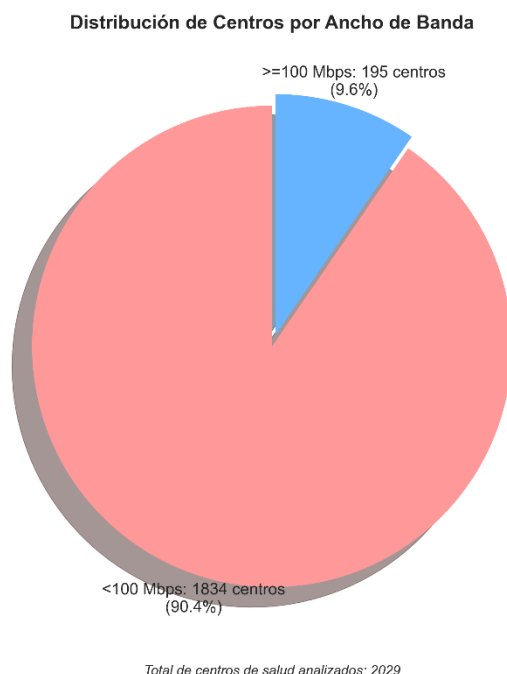


Figura 2-6: Distribución de centros de salud por ancho de banda. Elaboración propia basada en Dataset "Establecimientos red MINSAL"

Como se puede apreciar, el 90.4% (**1,834 centros**) centros de salud indicadores dentro de los datos entregados por el MINSAL pueden ser categorizados dentro del grupo de interés.

En el caso de establecimientos de salud, dependiendo de las condiciones bajo las cuales se entregue acceso al servicio, todos los establecimientos de salud pueden ser considerados dentro del grupo de interés del sistema, esto debido a la necesidad de tener acceso a comunicaciones con una infraestructura resilientes frente a catástrofes, siniestros y posibles problemas que pongan en riesgo la infraestructura terrestre de comunicaciones. En particular se considera que los centros de salud públicos pueden verse beneficiados por el despliegue de un sistema de comunicaciones satelitales, ya que varios de estos no poseen acceso a internet o bien tienen un pobre acceso a este. Ahora para poder complementar los datos entregados por el ministerio de salud (MINSAL), se utilizarán los datos abiertos de "Listado de establecimientos de salud" los cuales entregan una discrepancia en la cantidad de centros de salud públicos, esto se cree puede deberse a que algunos de estos centros no fueron considerados dentro del informe de datos debido a diversos motivos, pero debido a que estos se encuentran dentro de información pública se considera importante considerarlos dentro de este análisis. Así se tiene que la cantidad de centros de salud dentro del grupo de interés corresponden a **3,035 centros de salud**, este número de centros corresponde a la cantidad de centros de salud pertenecientes al SNSS (Sistema Nacional de Servicios de Salud) el cual corresponde al sistema público de salud.

Se decide utilizar los datos más conservadores y aproximar la demanda a solo los **1,834 centros de salud** con acceso a internet (con una velocidad bajo los 100 [Mbps]).

2.5 Análisis de conexiones para Instituciones educacionales públicas.

Las instituciones educativas públicas como lo son colegios y liceos son parte importante del grupo de interés del sistema, si bien se solicitaron datos a las subsecretarías pertinentes, no se pudo conseguir información detallada y reciente por medios oficiales, no obstante, se utilizaran los datos disponibles en la página oficial de la SUBTEL, principalmente apoyándose en la información pública de las postulaciones del proyecto “conectividad para la educación”. Es de así que se estima que el grupo de interés es de por lo menos **4,333 instituciones educacionales públicas** las cuales pueden verse beneficiadas por el sistema.

Esta aproximación fue hecha basándose en los datos procesados de los llamados y postulaciones al proyecto “conectividad para la educación”, y si se quisiera complementar este proyecto en su totalidad mediante el uso del sistema, se tendrían más de 9,000 escuelas, pero debido a la falta de respaldo para poder asumir esto, se optará por considerar el valor más conservativo presentado arriba.

2.6 Análisis de necesidad para regiones fuera de Chile continental.

El alcance de este trabajo incluye regiones fuera del territorio de Chile continental, en específico se incluye la necesidad de entregar servicio a las islas de Juan Fernández y Rapa Nui, para la isla de Juan Fernández no se tienen información que pueda entregar datos numéricos de la necesidad de acceso a internet desde esta, sin embargo, se debe tomar en cuenta a la hora de plantear las arquitecturas. Con relación a la isla de Rapa Nui, se tiene conocimiento de la cantidad de hogares dentro de esta isla, este grupo completo puede ser considerado como parte del grupo de interés del sistema. Como medida general se considerará que se está intentando entregar acceso al servicio de comunicaciones satelitales planteado a toda la isla, por lo tanto, se considerara a todos los hogares como parte del grupo de interés, estos datos son obtenidos nuevamente gracias a la publicación del CENSO 2024 (Instituto Nacional de Estadística, 2024). Es así como para la primera aproximación del sistema se considerarán **2,148 Hogares** como la demanda de la isla.

2.7 Totalidad del grupo de interés.

Tomando en cuenta todos los miembros del grupo de interés anteriormente detallado, se presenta el desglose y la totalidad de los posibles clientes en la Tabla 2-4 a continuación.

Tabla 2-4: Totalidad de la demanda proyectada del sistema. Elaboración propia basada en (Instituto Nacional de Estadística, 2024, p. 16; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)

Grupo de interés	N.º integrantes del grupo de interés.
Hogares continentales	226,773
Empresas comerciales	544
Centros de salud	1,834
Instituciones educacionales públicas	4,333
Hogares de Chile insular (Rapa Nui)	2,148
Total	236,833

Proyección de la demanda para los próximos 15 años.

Para poder desarrollar la proyección del mercado para el sistema dentro de los próximos 15 años, se trabajará con los datos históricos (SUBTEL), de forma de poder comprender factores como la posible migración o entradas del sistema en mercados que necesiten complementar sus capacidades actuales.

La proyección de la demanda se dividió en 2 grupos principales:

- **Grupo A: Conexión fija deficiente/Vulnerable.**

Este grupo se concentra en la posibilidad de migración o capacidad de complementar las conexiones de los hogares que actualmente solo acceden a internet mediante conexiones fijas (12.8% de las conexiones totales en 2024) y que estas conexiones no sean realizadas mediante fibra óptica o algún equivalente (dejando solo el 32.9% de los hogares con solo conexión fija para 2024). Para este grupo se utilizará la tendencia de migración anual del 15%, basándonos en la información para el año 2023 y 2024 (SUBTEL), este se puede apreciar en la Figura 2-7.

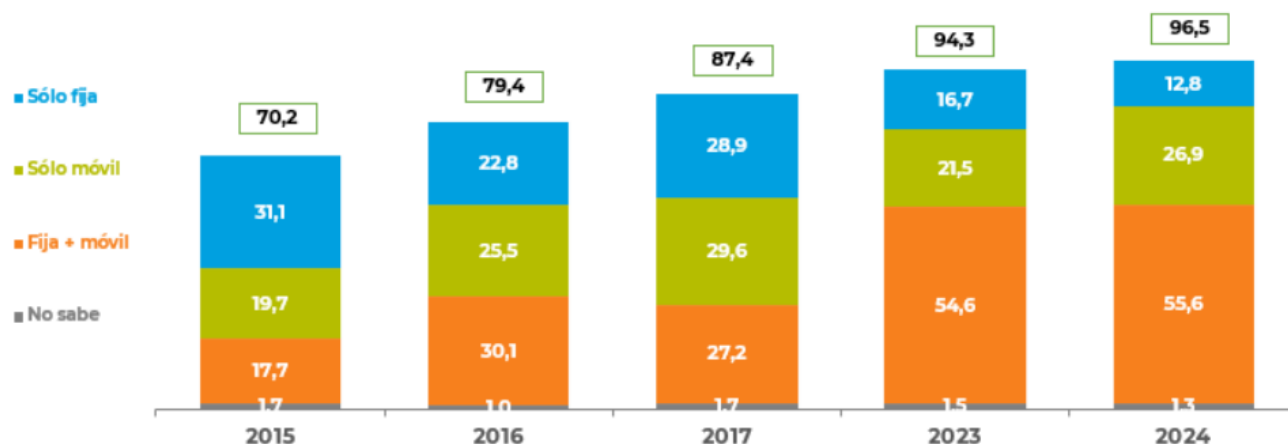


Figura 2-7: Formas de Acceso a Internet. (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 19)

Para este grupo se utilizará un modelo de proyección exponencial decreciente, para el cual se sabe que el mercado directo para 2024 es de 261,148 clientes (C_{A0}), y se asumirá una tasa de migración anual del (-15%). Lo anterior debido principalmente dada la tendencia de la migración tecnológica, donde la migración a nuevas tecnologías tiende al decaimiento exponencial inicial.

- **Grupo B: Mercado rural asociado al 4G.**

Este grupo se concentra en la posibilidad de expandir el mercado del servicio a hogares rurales y/o de bajo nivel socioeconómico, ya que, para estos grupos, el precio y disponibilidad de infraestructura corresponden a alguna de las principales razones por las cuales escogen utilizar principalmente redes móviles. Los porcentajes del uso de redes móviles se presenta en la Figura 2-8.

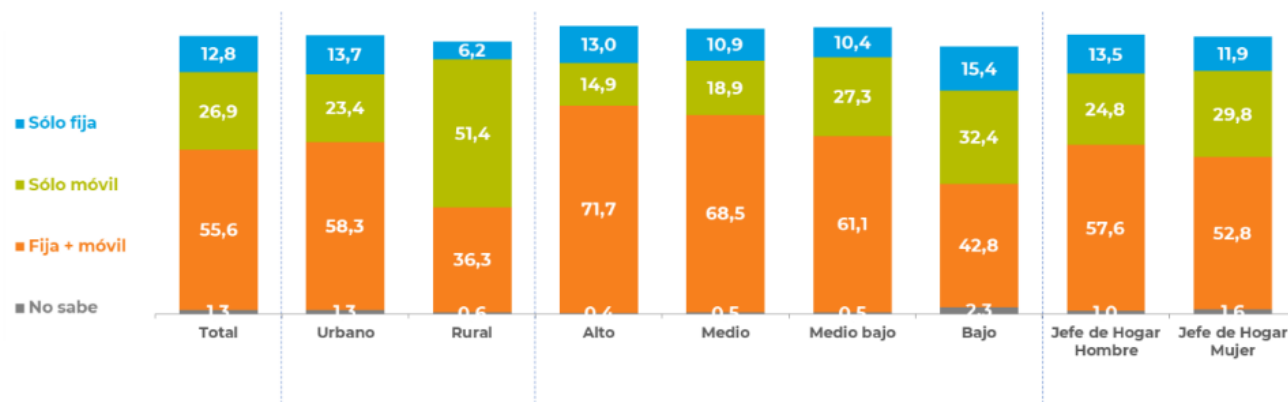


Figura 2-8: Formas de Acceso a Internet por urbano/rural, GSE y sexo jefe de hogar. Fuente:(Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 20)

Ahora, esta proyección se enfocará en solo el grupo de hogares rurales (699,338 según los datos de (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024)). Esto debido a que, se carece de

datos actuales que entreguen una buena idea de la cantidad de hogares que se estaría considerando dentro de los grupos socioeconómicos bajos para este modelo y a falta de esta información se obviara este grupo.

Para el grupo rural que se conecta a internet exclusivamente mediante conexión móvil, se sabe para el 61.4% (429,400 hogares) de los hogares rurales se conectan mediante redes 4G, para los fines de este trabajo considera que todo el grupo podría ser considerado dentro del grupo de clientes, ya sea por decisión propia, o dadas las posibilidades que estos sean integrados mediante la implementación de políticas públicas. Para esta proyección, se asume que el sistema demoraría 3 años en promedio, desde el año 2024, en desplegar toda la infraestructura del sistema, así se trabajara bajo el supuesto que el sistema alcanzara su punto máximo de crecimiento para el año 2027 (t_m). Para la posible penetración del servicio, considerando la naturaleza de este se estima una capacidad máxima de 545,484 como el mercado máximo que se puede llegar a alcanzar para esta proyección (699,338 hogares por 0.65%, penetración máxima, 1.2 es el factor de ventaja competitiva, este último indica la potencial adopción del servicio junto a otros, dada la ventaja competitiva teórica del sistema. Así $699,338 \cdot 0.65 \cdot 1.2 = 545,484$).

Para estos supuestos los resultados de la proyección se pueden apreciar en la Tabla 2-5 y la Figura 2-9.

Tabla 2-5: Resultados de la proyección de la demanda desde 2024 hasta 2039. Elaboración propia.

Año	Grupo A (N.º Clientes)	Grupo B (N.º Clientes)	Total (N.º Clientes)
2024	261,148	91,631	352,779
2025	221,976	126,266	348,242
2026	188,679	169,114	357,793
2027	160,378	218,909	379,287
2028	136,321	272,742	409,063
2029	115,873	326,575	442,448
2030	98,492	376,370	474,862
2031	83,718	419,218	502,936
2032	71,160	453,853	525,013
2033	60,486	480,461	540,947
2034	51,413	500,115	551,528
2035	43,701	514,215	557,916
2036	37,146	524,120	561,266
2037	31,574	530,976	562,550
2038	26,838	535,673	562,511
2039	22,812	538,868	561,680

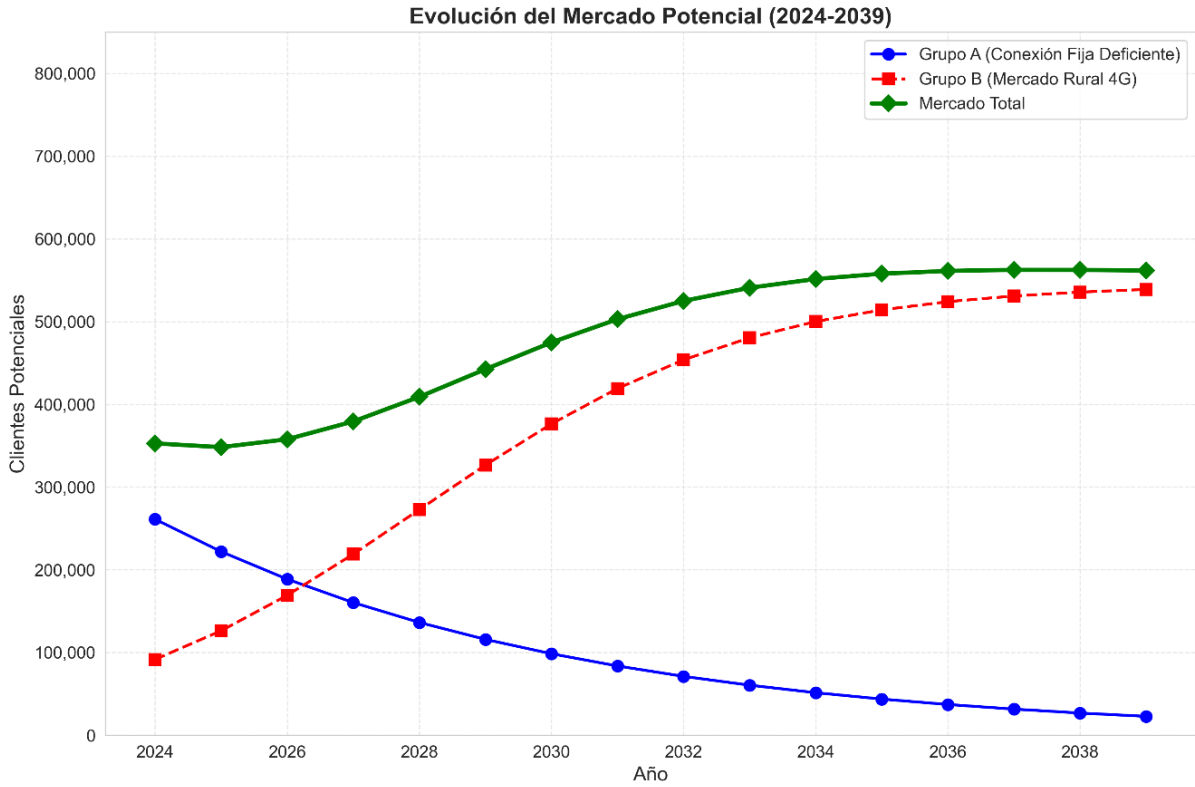


Figura 2-9: Resultados de la proyección de la demanda desde 2024 hasta 2039. Elaboración propia.

2.8 Dimensionamiento de la demanda en términos del Ancho de banda del sistema.

Una vez aproximada la necesidad en términos de cantidad de hogares, empresas, centros de salud, etc. se calcula una primera aproximación del ancho de banda total que se necesitaría poder entregar para poder suplir esta demanda.

Ahora, para poder realizar esta estimación del ancho de banda por conexión y subsecuentemente para todas las conexiones, se utilizará la siguiente ecuación:

$$BW_{req} = \frac{V_{total}}{FEC \cdot \log_2(n_{fases})} \cdot (\Delta f) \quad (1)$$

Donde:

- BW_{req} Corresponde al ancho de banda requerido para la conexión.
- V_{total} Corresponde a la velocidad total de carga y descarga que se quiere entregar para la conexión.

- FEC Corresponde al valor FEC asociado a la técnica de modulación utilizada.
- n_{fases} Corresponde al número de fases que se tiene para la técnica de modulación utilizada, en este caso consideraremos que se utiliza el mismo método de modulación tanto para el enlace de carga como para el enlace de descarga.
- Δf Corresponde a la "separación de portadoras", el cual corresponde al valor la separación en frecuencias entre subportadoras adyacentes.

Para empezar, se necesita establecer un estándar para las velocidades de la conexión que se está entregando mediante el sistema. La funcionalidad principal corresponde a la posibilidad de trabajar mediante el uso de la red, seguido por la posibilidad de permitir servicios como la telemedicina y clases remotas, gracias a la información entregada por Viasat sobre los estándares de velocidad para distintas aplicaciones (Viasat, 2025), se puede concluir que para poder tener un ambiente de trabajo completo se debe poder suplir la siguiente lista de necesidades.

1. Trabajo remoto general (Correo electrónico, Navegar en la web, compartición de documentos) [25 Mbps – descarga / 5 Mbps - Carga]
2. Video conferencias (Zoom, Google Meet, Microsoft Teams). [50 Mbps – descarga / 10 Mbps - Carga]
3. colaboración mediante acceso a la nube/acceso a otros escritorios. [75 Mbps – descarga / 15 Mbps - Carga]
4. Grandes transferencias de datos. [100 Mbps – descarga / 20 Mbps - Carga]

Utilizando estos parámetros y apoyándose en la definición establecida por la "*Federal Communications Commission (FCC)*" se establecerá un estándar que busca satisfacer todas las necesidades anteriores de **100 [Mbps] de descarga y 20 [Mbps] de subida**, junto con este estándar también se definirán alternativas que puedan satisfacer algunas de las necesidades descritas anteriormente, pero que sean menos demandantes en términos del ancho de banda total que se necesitaría para poder suplirlas. Estos estándares se presentan en la Tabla 2-6 a continuación.

Tabla 2-6: Proyección sobre los estándares de velocidades de internet para distintas funciones. Elaboración propia basada en (Viasat, 2025)

Capacidades de la conexión	Velocidad de descarga [Mbps]	Velocidad de carga [Mbps]	V_{total} [Mbps]	Funcionalidad
1-2-3-4	100	20	120	Funcionalidad completa
1-2-3	75	15	90	Trabajo General
1-2	50	10	60	Clases Remotas

Ahora otro grupo de parámetros importantes para este trabajo es la capacidad de entregar conexiones "direct to cell" (Servicio de internet satelital directamente a dispositivos como teléfonos móviles), a través de las cuales el satélite puede entregar servicio directo a teléfonos celulares. Esto trae consigo un grupo de nuevas variables, pero para poder

simplificar el dimensionamiento, se definirá que el sistema busca entregar conexiones similares a las capacidades de los dispositivos 4G, lo que implica **utilizar bandas pequeñas de 5 MHz** (Mark Jackson, 2024), lo que permitirá conexiones con capacidades como las mostradas en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Proyección de la velocidad para Internet Direct to cell. Elaboración propia basada en (Mark Jackson, 2024)

Velocidad de descarga [Mbps]	Velocidad de carga [Mbps]	V_{total} [Mbps]	Funcionalidad
18.3	4.4	22.7	Internet Móvil

La modulación es el proceso de codificar información (bits) en una señal portadora de alta frecuencia, adaptándola para su transmisión eficiente por un medio, se tienen 2 tipos de modulación que se analizarán principalmente en este trabajo.

- PSK (*Phase Shift Keying*): Modifica principalmente la fase de la portadora.
- QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*): Modifica la Amplitud y la fase.

La importancia de la modulación en el contexto de las comunicaciones satelitales viene dado principalmente debido a las capacidades de aumentar la eficiencia espectral, permitiendo una mayor transmisión de bits por Hz de ancho de banda, ayudando a optimizar la relación señal-ruido (SNR), permitiendo el ajuste de tasas de datos dadas las condiciones del canal y finalmente permitiendo aumentar la cantidad de conexiones sin necesidad de degradar el servicio. Los valores asociados a las modulaciones más relevantes para este trabajo se aprecian en la

Tabla 2-8 a continuación.

Tabla 2-8: Tabla de características de asociadas a distintas técnicas de modulación. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021)

Modulación	FEC	Eficiencia [bit/Hz]
QPSK	0.5	0.989
8PSK	0.75	2.228
8PSK	0.833	2.479
16APSK	0.666	2.637
16APSK	0.75	2.967
32APSK	0.90	4.453
64QAM	0.772	4.5234
64QAM	0.873	5.1152
64QAM	0.948	5.5547

La variable del número de fases (n_{fases}) también viene dada por la técnica de modulación utilizada, ya que esta corresponde al número de símbolos de la modulación, y el valor resultante de calcular $\text{Log}_2(n_{fases})$ corresponde a la eficiencia mostrada en la

Tabla 2-8.

Finalmente, para poder entender la variable de separación espectral, este puede ser simplificado como “la distancia en frecuencia entre señales subportadoras adyacentes” y su valor afecta principalmente la eficiencia espectral (cantidad de bit/Hz) y la robustez de la señal. Para el caso de una arquitectura como la que se quiere proponer en el trabajo presente, se considera importante apoyarse en los estándares actuales para tecnologías 4G y 5G, debido a que estas son las tecnologías que actualmente son entendidas como el estándar para este tipo de comunicaciones. Según la información entregada el informe “Acceso y uso de internet” (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 31) en Chile para el año 2024, la red 4G sigue siendo la conexión móvil más utilizada con un 54,0% de las conexiones móviles del país. Es así como se puede simplificar el valor de la variable de separación de portadoras por los valores estándar (Mohamed Abdel Monem, 2019) como se muestra en la Tabla 2-9 a continuación.

Tabla 2-9: Valores para la separación de portadoras. Elaboración propia basada en (Mohamed Abdel Monem, 2019)

tecnología	separación de portadoras (Δf) [kHz]
4G	15
5G	30-60

Ahora, teniendo clara la función de cada una de las variables anteriores, se considera prudente ejemplificar el tipo de desempeño que se quiere llegar a tener que se quiere llegar a tener dentro del sistema propuesto, esto para poder tener un estándar con el que trabajar y sobre el cual poder plantear la arquitectura en la siguiente sección. El estándar más claro con el cual se quiere trabajar sería el estándar de los satélites Starlink V1.0, esto implica que para la ecuación del ancho de banda presentada arriba se tiene:

- modulación de tipo 64QAM, con un FEC de 8/9 ($8/9=0.873$) y una separación de portadoras (Δf) igual a por lo menos 15.

Así para la ecuación presentada al principio de esta sección, para todos los posibles casos de velocidad se muestran los valores de las variables y los resultados en la Tabla 2-10 a continuación.

Tabla 2-10: Parámetros de funcionamiento del enlace para diferentes funciones. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021; Mark Jackson, 2024; Mohamed Abdel Monem, 2019; Viasat, 2025)

Funcionalidad	V_{total} [Mbps]	FEC	Eficiencia [bits/Hz]	Δf [MHz]	BW_{req} [MHz]
completa	120	0.873	5.1152	0.015	0.40
Trabajo General	90	0.873	5.1152	0.015	0.30
Clases remotas	60	0.873	5.1152	0.015	0.20
Internet móvil	22.7	0.873	5.1152	0.015	0.07

Ahora, para poder realizar la estimación de ancho de banda, primero se debe estimar la cantidad de conexiones que se llevaran a cabo. Para esto se presentarán 2 casos los cuales servirán para analizar las posibles necesidades de ancho de banda bajo distintas condiciones.

2.8.1 Caso 1: Direct to Cell Only.

El caso principal para analizar será el caso donde se quiere entregar servicio exclusivo “direct to cell” de esta forma permitiendo minimizar el ancho de banda requerido para satisfacer la demanda.

Para propósitos de cálculo se asumirá:

- Para Hogares continentales se asumen **2 conexiones** por hogar, estas conexiones serán exclusivamente “direct to cell”, estas conexiones tendrán una simultaneidad del 60%.
- Para empresas se tendrá en promedio **100 conexiones** con una simultaneidad del 60%.
- Para instituciones de salud pública, se estimarán en promedio **80 conexiones**, con una simultaneidad del 60%.
- Para instituciones educacionales públicas, se estimarán **90 conexiones**, con un factor de simultaneidad del 65%.
- Para los hogares ubicados en Rapa Nui se asumirá que todos los hogares cuentan con **2 conexiones por hogar**, con un factor de simultaneidad del 65%.

A continuación, en la Tabla 2-11, se muestra el cálculo de la cantidad de conexiones que se tiene para cada grupo de interés analizado.

Tabla 2-11: Proyección de cantidad de conexiones por grupo de interés para el primer caso. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021; Instituto Nacional de Estadística, 2024; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024; Viasat, 2025)

Cliente	Grupo de interés	Cantidad de conexiones
Hogares (Continental)	226,773	453,546
Empresas	544	54,400
Centros de Salud	1,834	146,720
Instituciones educativas públicas	4,333	389,970
Hogares (Rapa Nui)	2,148	4,296
Total	-	1,048,932

Ahora en la Tabla 2-12, se muestra el cálculo del ancho de banda requerido para los distintos grupos de interés que se tiene.

Tabla 2-12: Cálculo del ancho de banda para distintos grupos de interés para el primer caso. Elaboración propia.

Cliente	Funcionalidad	Ancho de banda por conexión [MHz]	Cantidad de conexiones	Factor de simultaneidad	Ancho de banda total [MHz]
Hogar (continental)	Internet móvil	0.07	453,546	0.6	19,048
Empresas	Internet móvil	0.07	54,400	0.6	2,285
Centros de salud	Internet móvil	0.07	146,720	0.6	6,162
Instituciones educativas públicas	Internet móvil	0.07	389,970	0.65	17,744
Hogares (Rapa Nui)	Internet móvil	0.07	4,296	0.65	196
Total	-	-	-	-	45,435

2.8.2 Caso 2: Internet Competitivo

Para propósitos de cálculo se asumirá:

- Para Hogares continentales se asume que se tendrá **solo una conexión** al servicio, de estas conexiones el 50% se considerarán como conexiones fijas dedicadas y el otro 50% corresponderán a conexiones móviles(internet móvil), ambas con un 50% de simultaneidad.
- Para empresas se tendrá un promedio de **60 conexiones** con un 50% de simultaneidad.
- Para instituciones de salud se aproximarán **40 conexiones** con un 50% de simultaneidad.
- Para instituciones educativas públicas, se estimarán **60 conexiones** con un 50% de simultaneidad.
- Para los hogares de Rapa Nui se asumirá que todos los hogares tienen **una conexión** dedicada, con un 60% de simultaneidad.

A continuación, en la Tabla 2-13, se muestra el cálculo de la cantidad de conexiones que se tiene para cada grupo de interés analizado.

Tabla 2-13: Proyección de cantidad de conexiones por grupo de interés para el segundo caso. Elaboración propia basada en (Dr. Sergei Pekhterev, 2021; Instituto Nacional de Estadística, 2024; Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024; Viasat, 2025)

Cliente	Grupo de interés	Cantidad de conexiones
Hogares (Continental)	226,773	226,773
Empresas	544	32,640
Centros de Salud	1,834	73,360
Instituciones educativas públicas	4,333	259,980
Hogares (Rapa Nui)	2,148	2,148
Total	-	594,901

Ahora en la Tabla 2-14, se muestra el cálculo del ancho de banda requerido para los distintos grupos de interés que se tiene.

Tabla 2-14: Cálculo del ancho de banda para distintos grupos de interés para el segundo caso. Elaboración propia.

Cliente	Funcionalidad	Ancho de banda por conexión [MHz]	Cantidad de conexiones	Factor de simultaneidad	Ancho de banda total [MHz]
Hogar (continental)	Completa	0.40	113,386	0.5	22,677
	Internet móvil	0.07	113,386		3,968
Empresas	Trabajo General	0.30	32,640	0.5	4,896
Centros de salud	Trabajo General	0.30	73,360	0.5	11,004
Instituciones educativas públicas	Clases Remotas	0.20	259,980	0.5	25,998
Hogares (Rapa Nui)	Completa	0.40	2,148	0.6	515.52
Total	-	-	-	-	69,059

2.9 Dimensionamiento de arquitecturas investigadas.

A continuación, se presentan las dimensiones y características de los sistemas de comunicación investigados más relevantes, esto para luego poder dimensionar el sistema propio que será simulado.

2.9.1 Satélites.

El dimensionamiento de la arquitectura de los satélites se realizó mediante el estudio de una variedad de satélites de comunicación que entregan servicios similares, se buscó limitar el estudio a satélites que fueran lanzados en los últimos 5 años, debido principalmente al cambio en la tecnología y los estándares del acceso a internet (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 31), no solo lo anterior es importante, pero el mercado espacial de las comunicaciones ha tenido cambios importantes dentro de los últimos años, enfocándose mucho más en lanzamientos en constelaciones de satélites pequeños ubicados en regiones bajas del espacio.

En la Tabla 2-15 se puede apreciar la relación que se tiene entre los transpondedores, sus características de funcionamiento y la masa del satélite donde son montados. Estos valores fueron obtenidos de Gunter Kreebs Space Page.

Tabla 2-15: Parámetros de Funcionamiento de distintos satélites. Elaboración propia.

satélite	Cantidad de transpondedores	Frecuencia de funcionamiento de los transpondedores [MHz]	Poder requerido para los transpondedores [kW]	Masa del sistema [kg]	Orbita o región del espacio
Arsat-1 (2014)	12	36 MHz (Ku)	3.5	2,985	GEO
	8	54 MHz (Ku)			
	3	72 MHz (Ku)			
Viasat 2 (2017)	-	1,000 MHz (350 Gbps esperados)	-	6,418	GEO
Arsat-2 (2015)	26	36 MHz (Ku)	3.4	6,075	GEO
	10	72 MHz (C)			
Amazonas Nexus (INTELSAT 46) (2023)	-	800 MHz (Ku)	-	4,500	GEO

Originalmente, se quería utilizar la cantidad de transpondedores por satélite como un elemento central para el dimensionamiento de los satélites de mayor tamaño, pero debido a que la gran mayoría de la información disponible corresponde a información que supera los 5 años de antigüedad, resulta difícil generar un estándar de ancho de banda moderno que se aproxime a los estándares para satélites pequeños. Las cargas útiles declaradas por satélites geoestacionarios tienen la tendencia a entregar una cantidad de ancho de banda reducido en comparación a estimaciones sobre satélites pequeños recientes como Starlink, esto se estima es debido a la antigüedad de las tecnologías implementadas por satélites geoestacionarios. Proyectos modernos como Viasat-3.2 y Arsat-SG-1 prometen mucho potencial para las comunicaciones satelitales mediante el uso de satélites geoestacionarios, pero ambos satélites aún no son lanzados y o han sido retrasados por lo cual no se consideran dentro del marco de trabajo de este informe.

Ahora, para arquitecturas más pequeñas como SmallSat similares a Starlink, no se tiene una gran cantidad de información pública relacionada con sus componentes como transpondedores, la cantidad de estos o consumos energéticos asociados, pero si se tiene mucha más información sobre las capacidades de ancho de banda y velocidades de carga y descarga del sistema, permitiendo dimensionar las capacidades de funcionamiento, esta capacidad de funcionamiento puede ser asociada a los parámetros físicos de los satélites, como su masa, de esta forma permitiendo el dimensionamiento de la capacidad de ancho

de banda en relación con su masa. Los parámetros rescatados pueden verse en la Tabla 2-16.

Tabla 2-16: Parámetros de funcionamiento de distintos satélites de tipo SmallSat. Elaboración propia.

satélite	Ancho de banda de frecuencia [MHz]	Masa [kg]	Orbita o región del espacio
Starlink V1.0 (2019)	2,000	260	LEO
OneWeb GEN-1 (2019)	2,000 ^①	150	LEO
Starlink V2.0 mini	~5,900 ^②	525	LEO

① Este valor Corresponde a una estimación, debido a que se encontró información que respaldan la noción que los satélites OneWeb GEN-1 son capaces de generar 8 haces de 250[MHz] de ancho de banda cada uno (eoportal, 2025), estimando así el valor de 2,000[MHz] que se presenta en la tabla.

② Este valor es una estimación, la cual se calcula bajo la suposición que el satélite utiliza técnicas de modulación iguales o mejores que los satélites Starlink V1.0. El cálculo se presenta a continuación.

Calculo original para Satélite Starlink V1.0, con la técnica de modulación siendo 64QAM (FEC = 0.873) y el satélite tiene 2 canales independientes, uno por polarización.

$$BW_{Hz} \cdot DualChannel \cdot Eficiencia = BW_{bit} \quad (1)$$

$$2,000 [Mhz] \cdot 2 \cdot 5.11 [bit/Hz] = \sim 20Gbit \quad (2)$$

Haciendo el cálculo para los valores de Starlink V2.0 mini.

$$BW_{Hz} \cdot DualChannel \cdot Eficiencia = BW_{bit} \quad (1)$$

$$BW_{Hz} \cdot 2 \cdot 5.11 = \sim 60Gbp \quad (2)$$

$$BW_{Hz} = \sim 5,900[Mhz] \quad (3)$$

2.9.2 Antenas

Dentro del dimensionamiento del sistema, se debe tener en consideración la elección de una antena, dado que los parámetros de funcionamiento asociados a la capacidad de comunicación de los satélites, está fuertemente ligada a la selección de antena que se tiene en la arquitectura.

Los satélites de comunicaciones geoestacionarios utilizan comúnmente 2 tipos de antenas:

- Antenas parabólicas: Una cantidad de satélites geoestacionarios de comunicación aún emplean antenas reflectoras parabólicas (como lo es el caso de las antenas Cassegrain) para concentrar las señales en haces direccionales hacia zonas específicas. Su área de cobertura es rígida entregando una cobertura constante sobre una zona, son comúnmente usadas para señales en banda C, Ku y Ka.
- “Phased array antenna”: Estas antenas son más modernas y emplean elementos electrónicos que permiten controlar la antena de forma remota. Esta permite crear múltiples haces ajustables sin la necesidad de partes móviles, lo que permite redirigir la cobertura de forma dinámica.

A continuación, en la Tabla 2-17 se resumen las ventajas y desventajas de las antenas presentadas.

Tabla 2-17: Ventajas y desventajas de distintas antenas. Elaboración propia.

Tipo de antena	Ventajas	Desventajas
Parabólica (Cassegrain/offset)	• Altas ganancias. • Bajo costo inicial.	• Cobertura rígida. • Peso elevado.
Phased array antenna	• Haz reconfigurable. • Alto rendimiento para bandas de alta frecuencia.	• Costo inicial Alto. • Aumenta la complejidad de la arquitectura.

Para **arquitecturas de menor tamaño**, como lo son satélites de comunicaciones ubicados en órbitas bajas (LEO y MEO), se utiliza casi de forma exclusiva antenas del tipo “**Phased array antenna**” por las mismas razones mencionadas anteriormente. El cambio importante en la arquitectura viene dado si se considera necesaria la implementación de “Inter-Link” o “Cross-Link” dentro de la arquitectura, lo que implicaría la necesidad de antenas para poder comunicar satélites entre sí. Esta comunicación entre satélites es considerada un estándar dentro de varias constelaciones y permite disminuir la latencia en las comunicaciones, permitiendo el intercambio de datos y solicitudes entre satélites. Para el trabajo presente se asumirá que el uso de comunicaciones “Cross-Link” entre satélites es necesario dentro de las arquitecturas planteadas, principalmente debido a que la gran mayoría de ejemplos de sistemas tomados para el dimensionamiento consideran el uso de esta tecnología.

Actualmente, se tienen 2 opciones principales las cuales pueden ser utilizadas para entregar conexiones entre satélites, estas corresponden a enlaces láser y enlaces “RF” (Aizaz U. Chaudhry & Halim Yanikomeroglu, 2021) la comparativa entre estas se muestran en la Tabla 2-18, a continuación.

Tabla 2-18: Comparación de parámetros de comunicaciones "Cross-Link". Elaboración propia basada en (Aizaz U. Chaudhry & Halim Yanikomeroglu, 2021)

Tipo de comunicación entre satélites.	Enlace láser	Enlace RF (Ku/Ka)
Capacidad del enlace a 5000 [Km]	~10 Gbps	~2.5 Gbps
Latencia por salto	~1 a 5 [ms]	~10 a 50 [ms]
Tamaño del equipo ❶	-	-

❶ Si bien no se tienen valores fijos para esta comparativa, se puede concluir apoyándose en los trabajos publicados sobre comunicaciones láser para constelaciones satelitales (Aizaz U. Chaudhry & Halim Yanikomeroglu, 2021) (Aizaz U. Chaudhry & Halim Yanikomeroglu, 2020), se tiene la certeza que el tamaño de los equipos de enlace láser son significativamente menores, permitiendo que SmallSats como los Starlink V1.0, tengan varios sistemas de enlace láser, mientras que para poder tener sistemas RF que tengan un funcionamiento comparativo al de los enlaces láser, se requiere una antena 19 más grande, y un mayor consumo de poder y masa dentro del satélite. En la Figura 2-10 se ilustra el funcionamiento de la constelación actual.

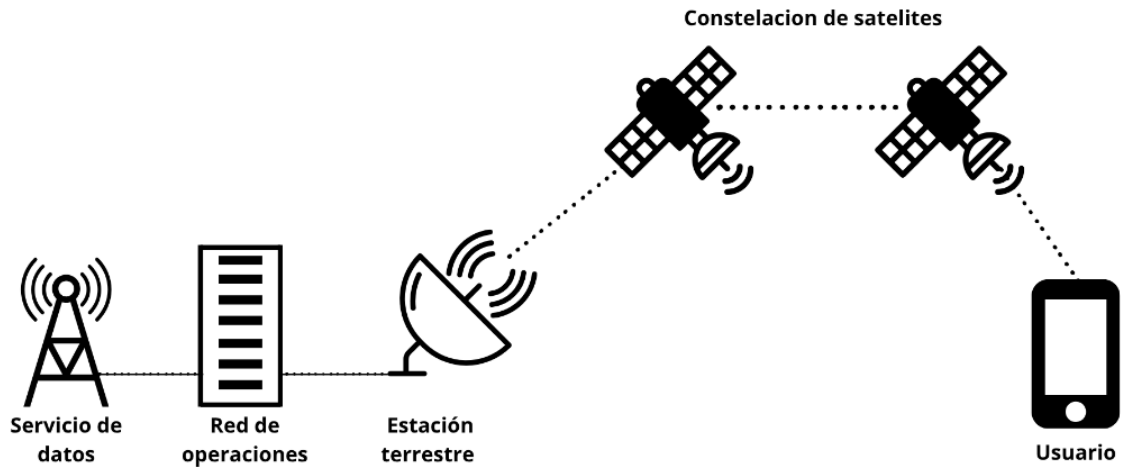


Figura 2-10: Concepto de operación del sistema planteado. Elaboración propia.

2.9.3 Propulsión.

La posibilidad de necesitar propulsión a bordo es una realidad, debido a la necesidad de poder mantener la posición orbital de los satélites, en general se necesitará de sistemas de propulsión para poder ubicar el satélite en su órbita de cementerio y en casos más específicos como lo puede ser, el uso de satélites en órbitas bajas, corregir una grama de diferentes perturbaciones que pueden alterar la posición del satélite o satélites.

A continuación, en la Tabla 2-19, se resume a grandes rasgos las ventajas y desventajas de los tipos de propulsión generales para satélites.

Tabla 2-19: Ventajas y desventajas de distintos tipos de propulsión. Elaboración propia.

Tipo de propulsión	Ventajas generales	Desventajas generales
Eléctrica	• Menor costo de lanzamiento • Precisión de inserción • Compatibilidad con variedad de propelentes (Kriptón, xenón, yodo, etc.)	• Bajo empuje comparativo a otras opciones. • Sensibilidad de los componentes. • Dependencia energética.
Química	• Alto empuje. • Madurez tecnológica.	• Aumento significativo en la masa. • Reducción de vida útil. • Menor precisión de inserción.
Híbrida	• Trae versatilidad para misiones complejas. • Mitigación de posibles riesgos.	• Costo de desarrollo elevado. • Complejidad de integración. • Mayor aumento en la masa en comparación a propulsión eléctrica pura.

En el año 2024, NASA publicó un gráfico con la relación entre el empuje y el impulso específico de distintas tecnologías propulsoras, como parte del su reporte de estado del arte de tecnologías para satélites pequeños (Weston et al., 2025, p. 68), esta se presenta en la Figura 2-11, se considera que esta figura es representativa de las características de estas tecnologías y útil para poder apoyar las conclusiones de esta sección.

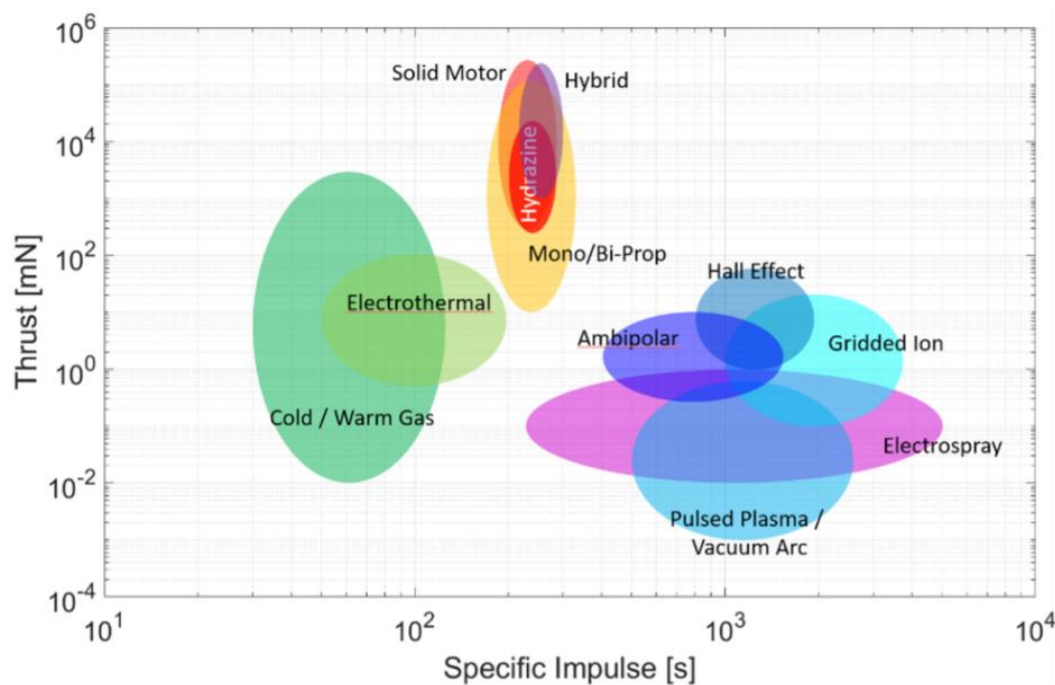


Figura 2-11: Espectro de rendimiento de sistemas de propulsión espacial para nanosatélites (empuje [N] vs. impulso específico [s]). Fuente: (Weston et al., 2025, p. 68)

A continuación, la Tabla 2-20 muestra los ejemplos más relevantes de propulsión para el trabajo presente (solo se consideran lanzamientos desde el año 2017).

Tabla 2-20: Parámetros de distintos sistemas de propulsión para distintos satélites. Elaboración propia.

satélite	Tipo de propulsión	Propulsor	Características	Masa del satélite [kg]
Starlink-V1.0	Eléctrica	Hall effect (Krypton)	Isp = ~1,667 s Masa = 2.1 [kg]	260
Starlink-V2.0	Eléctrica	Hall effect (argon)	Isp=~2,500 s Poder=4.2[kW] Masa = 2.1 [kg]	1,200
Viasat-1	Eléctrica	Hall effect SPT-100D	Isp = 2,200 s Poder=2.5[kW] Masa = 4.7 [kg]	6,740
Eutelsat 117 West B	Eléctrica	Gridded ion thruster	Isp=3,400-3,500 s Poder=2.4-4.5[kW] Masa=13.7[kg]	1,963

Analizando los datos presentados, se nota la **tendencia a propulsión eléctrica**, principalmente a uso de “**Hall effect thrusters**”, revisando documentación publica disponible, principalmente proyecciones y reportes de mercado (marketgrowthreports, 2025), se nota que el cambio a propulsiones eléctricas como los “Hall effect thrusters” viene dado por la necesidad de un tipo de propulsión que permita extender la vida útil operativa de los sistemas satelitales, esto impulsado por el aumento en el mercado espacial para satélites ubicados en regiones espaciales bajas (LEO) y satélites en órbitas geoestacionarias (GEO), Cerca de un 15% de los satélites lanzados en el año 2024 dependen de “Hall effect thrusters” para propósitos de “station-keeping” y “rendezvous”.

Las principales ventajas de este tipo de propulsión eléctrica, frente a otros competidores son principalmente:

- Aumento de la vida útil operativa y aumento de la eficiencia de propelente: se busca aumentar la vida útil del satélite, cambiando de propulsión química a eléctrica, logrando una reducción de la masa de combustible de hasta un 70% y de esta forma permitiendo extender los periodos de operación desde 5 hasta 12 años.

Si bien este tipo de propulsión parece ser la tendencia actual, también se debe tomar en cuenta las desventajas que traen a la arquitectura, principalmente:

- Posibles dificultades para el control térmico: este tipo de propulsores disipan 400 a 700 W de calor (considerando xenón como el propelente) durante su operación. El diseño de los escudos de calor y radiadores deben acomodar a este sistema, lo que en algunos casos puede llevar a retrasos en la integración y aumento en el tiempo de verificación y validación.

Bajo la información recopilada actualmente para el dimensionamiento, la mayoría de los sistemas de propulsión para satélites de comunicaciones recientes utilizan propulsión eléctrica, y una tendencia marcada dentro de estos es la utilización de “**Hall effect thrusters (HET)**”, lo que lleva a la conclusión que este tipo de propulsión puede llegar a ser la más adecuada, bajo un punto de vista del dimensionamiento preliminar, para este tipo de sistemas.

2.10 Segmento terrestre.

Para el funcionamiento del sistema se deben construir estaciones terrestres que permitan el funcionamiento de la red satelital planteada. Esta sección busca presentar aproximaciones simples que permitan evaluar el funcionamiento del sistema, y la implementación real de un sistema similar requerirá de un estudio profundo de las características geográficas, poblacionales y de infraestructura del país. La estación terrestre funcionará como el punto de acceso al internet de la constelación, permitiendo que los satélites puedan acceder a los datos solicitados por los usuarios del servicio. No solo eso, sino que también estaciones terrestres podrán controlar y regular las redes, ajustando parámetros de funcionamiento de esta y controlando el funcionamiento de la constelación.

Ahora se considera que la infraestructura general funcionara en base a 2 tipos de estaciones.

- Estación central, esta estación corresponde a la infraestructura terrestre clásicamente asociada a la utilización de satélites de comunicaciones geoestacionarios, permiten la utilización de una cantidad reducida de antenas de gran tamaño y tienden a permitir entregar servicios a lo largo de grandes extensiones del territorio, por lo general una es suficiente. Está constantemente en contacto con el satélite geoestacionario. Un ejemplo de este tipo de arquitectura corresponde a las estaciones de VIASAT, un ejemplo de estas estaciones se puede apreciar en la Figura 2-12.



Figura 2-12: Ejemplo de estación de antenas terrestre. Fuente: UK competition watchdog approves \$7.3B ViaSat-Inmarsat merger by c4isrnet.

- Estaciones Secundarias, estas estaciones son compuestas por grandes grupos de antenas focalizados en regiones cercanas a los usuarios, y permiten el acceso a internet a un radio fijo desde su ubicación y se necesita de varios de estos para poder cubrir grandes extensiones del territorio. Estos se asocian a sistemas de comunicaciones que se basan en constelaciones de satélites en órbita baja (LEO).

Un ejemplo de esta son los “Gateway” de Starlink, como se puede apreciar en la Figura 2-13.



Figura 2-13: Ejemplo de estación terrestre de Starlink (GateWay). Fuente: starlinkinternet.

Así las características principales de cada tipo de estación se presentan en la Tabla 2-21 a continuación.

Tabla 2-21: Ventajas y desventajas para distintas arquitecturas de estacones terrestres. Elaboración propia.

Infraestructura	Ventajas	Desventajas	Tipo de satélite que utiliza la infraestructura
Estación central	• Pocas estaciones. • Cobertura masiva.	• Alta latencia.	• Satélites Geoestacionarios
Estación secundaria	• Baja Latencia. • Permiten redundancias en la infraestructura.	• Necesita de una alta cantidad de estaciones.	• Satélites ubicados en órbita baja (LEO)

Ahora, para distintos tipos de arquitectura necesitarán diferentes tipos de estaciones, solo para habilitar el funcionamiento del servicio que se quiere entregar, pero la ubicación y que infraestructura se utilizará será profundizado cuando se planteen las arquitecturas del sistema.

2.11 Diseño de arquitectura.

Habiendo presentado se presentará el proceso mediante el cual se estructura la arquitectura a utilizar dentro de las simulaciones

2.11.1 Arquitectura Satelital.

Habiendo presentado la gran mayoría de elementos que componen la arquitectura, se presentarán las arquitecturas de misión que se planea simular y evaluar durante las próximas secciones de este trabajo. Las infraestructuras se basarán en la necesidad de poder satisfacer las conexiones planteadas durante el apartado de “dimensionamiento de ancho de banda” de este trabajo.

Para el planteamiento de la arquitectura, se utilizará la presentación de “sN Sat-com 2024” (Airbus, 2024, p. 11) como el caso de estudio principal, donde se puede vislumbrar una posible arquitectura de misión con fines similares a los que se quiere analizar en este trabajo. Esta arquitectura está planteada en base a la utilización de:

- 1 satélite ubicado en una órbita geoestacionaria.
- 16 satélites pequeños ubicados en regiones orbitales bajas (LEO o MEO) .

Con esta arquitectura como la base sobre la cual se iterará, se comenzará a estructurar la arquitectura de misión.

Para empezar, basándose en la cantidad de satélites presentada, e independiente de la arquitectura que se decida emplear, se considera poco probable que el sistema pueda cubrir la demanda total del país con lo que efectivamente sería la primera fase del sistema, cualquier intento de cubrir la demanda total calculada debería tomarse como razones para la posible expansión futura del sistema. Para el dimensionamiento actual del sistema se estimó el tamaño y la masa promedio de los satélites a utilizar, para luego poder asociar esto a parámetros de funcionamiento similares a los satélites presentados. Para poder ampliar el criterio con el que se dimensionaran los satélites pequeños, también se utilizara la estimación de costo de lanzamiento del programa de SpaceX “Ride Share Program”. Valores importantes de esta estimación se encuentran en la Tabla 2-22 a continuación.

Tabla 2-22: Costos asociados al programa “Rideshare” de SpaceX. Elaboración propia.

Tipo de satélite	Masa [kg]	Costo estimado (USD)
MicroSat	50	\$ 0.33 M
MicroSat	100	\$ 0.65 M
MiniSat (OneWeb)	150	\$ 0.98 M
MiniSat	180	\$ 1.17 M
SmallSat	200	\$ 1.3 M
SmallSat – Starlink V0.9 (Prototipo)	227	\$ 1.48 M
SmallSat	250	\$ 1.63 M
SmallSat - Starlink V1.0	260	\$ 1.69 M

Ahora, para el contexto de este trabajo, se considera que el dimensionamiento de los SmallSat dependerá completamente del caso de la demanda que se esté analizando. Si la

demanda de internet exige exclusivamente servicio “Direct to cell” (Caso 1) entonces la idea de utilizar satélites con masas menores a 180 [kg] se considera como una posibilidad. Cualquier caso donde se quiera evaluar la posibilidad de entregar servicios de internet con mayor capacidad requerirán de satélites más potentes y, por lo tanto, más pesados (más cercanos a Starlink V1.0). Un factor que también se quiere tener en cuenta, a la hora de dimensionar los satélites de menor tamaño es la posibilidad de lanzar estos satélites mediante programas “**RideShare**” como el mencionado anteriormente (SpaceX), debido a que Chile carece de las capacidades de lanzamiento propias.

Asociando la masa total de los satélites de comunicaciones ubicados en órbita baja (LEO y MEO) presentados a lo largo de este trabajo, se genera un gráfico que muestra la tendencia de la eficiencia del ancho de banda por kilogramo de satélite, este se muestra en la Figura 2-14 a continuación.

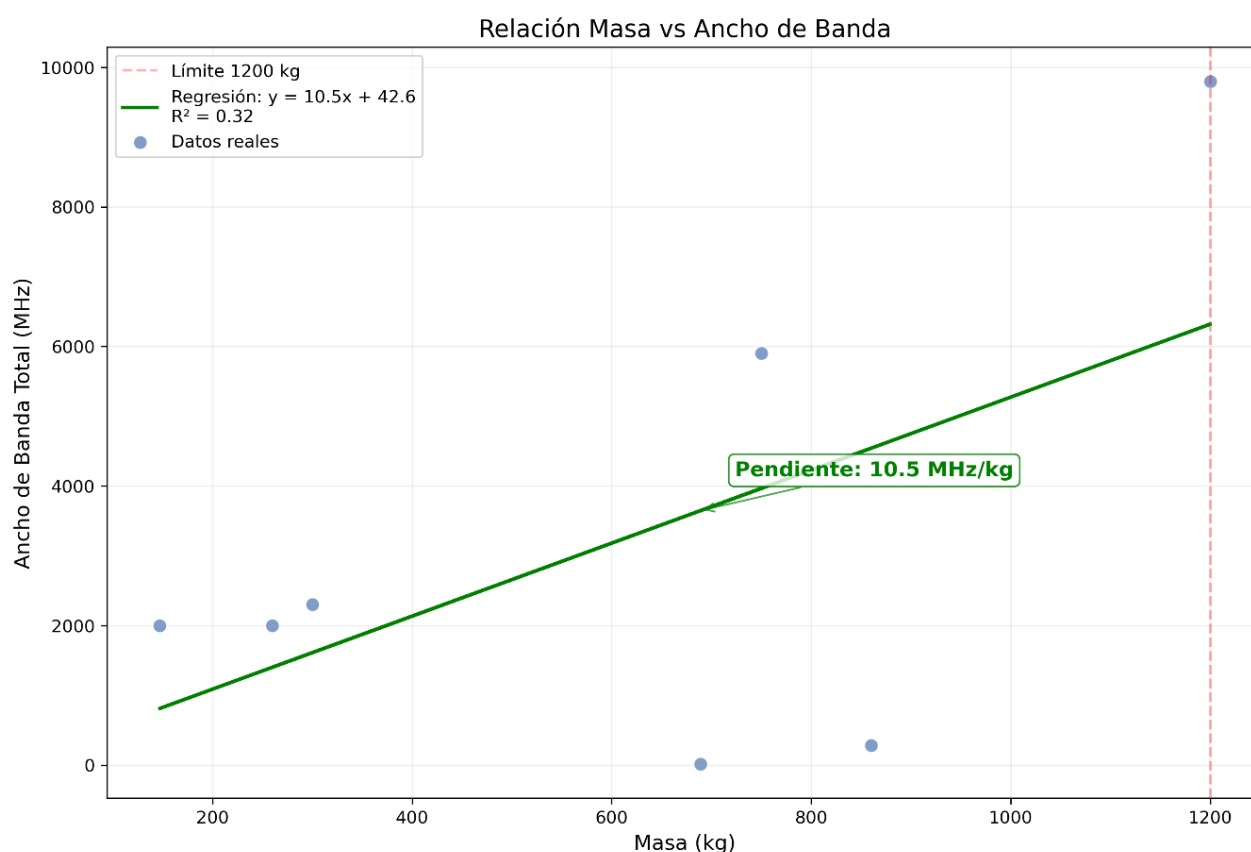


Figura 2-14: Proyección de la tendencia del peso y ancho de banda de distintos satélites de comunicaciones por año. Elaboración propia.

Con la información presentada anteriormente, se considera que para la arquitectura teórica que se quiere plantear en este trabajo se tendrá el grado de optimización suficiente para poder generar un sistema con capacidades similares a la eficiencia presentada en los

satélites de Starlink V1.0 y OneWeb Gen 1. Este se presenta en la Tabla 2-23 a continuación:

Tabla 2-23: Resultados del cálculo de ancho de banda total por kilogramo de distintos satélites. Elaboración propia.

Satélite	Eficiencia de ancho de banda por kilo de satélite [MHz/kg]
OneWeb Gen 1	13.3
StarLink V1.0	7.7
Satélite teórico	10.5

Tomando en cuenta la información presentada, es que se define que la arquitectura de los satélites de comunicaciones a evaluar tendrá los parámetros presentados en la Tabla 2-24.

Tabla 2-24: Valores para distintos parámetros de funcionamiento por kilogramo de masa de la arquitectura planteada. Elaboración propia.

Clasificación del satélite	Masa de satélites [Kg]	Estimación de Ancho de banda [MHz]	Costo de Lanzamiento (SpaceX Ride Share Program)	Cantidad de conexiones móviles que satisface por satélite	Cantidad de conexiones completas que satisface por satélite
MicroSat	50	525	\$ 0.33 M	7,500	1,312
	85	892.5	\$ 0.56 M	12,750	2,231
	100	1050	\$ 0.65 M	15,000	2,625
MiniSat	180	1890	\$ 1.17 M	2,700	4,725

Notar que las estimaciones anteriores se consideran como cifras sobredimensionadas en comparación al desempeño real que se esperarí de estos sistemas, debido a que se trabaja bajo las siguientes suposiciones:

- Se puede alcanzar el nivel de optimización de Hz por kilogramo de satélite planteado anteriormente.
- El satélite funciona al 100% de su capacidad en todo momento.
- Se ignoran variables que atenuarían el ancho de banda efectivo.
- Se asume que un sistema altamente miniaturizado como los que se estima aquí es posible y su costo está dentro de un margen aceptable como inversión gubernamental.

Bajo los supuestos presentados y siguiendo los lineamientos entregados por el caso de estudio presentado (Airbus, 2024, p. 11), se trabajará bajo el límite de masa de 100 [kg] buscando poder trabajar con microsátélites.

Antes de dimensionar el satélite geoestacionario, se necesita dimensionar otra característica crítica que permitirá simular los microsátélites, esta característica es el FOV (*Field of View*) de la arquitectura de microsátélites seleccionada. Para esto se apoyará en los cálculos realizados para la cobertura de satélites de Starlink (Dr. Sergei Pekhterev, 2021), en este caso se asume que el área que los microsátélites son capaces de ver es similar al área a los satélites de Starlink V1.0, esto es bajo toda regla, un sobre dimensionamiento utilizado para facilitar la simulación de la arquitectura. Es así como se asume que el diámetro de la cobertura individual de un satélite es aproximadamente de 24.13 [Km], asumiendo que el satélite apunta a nadir, se tiene un caso como el ilustrado en la Figura 2-15.

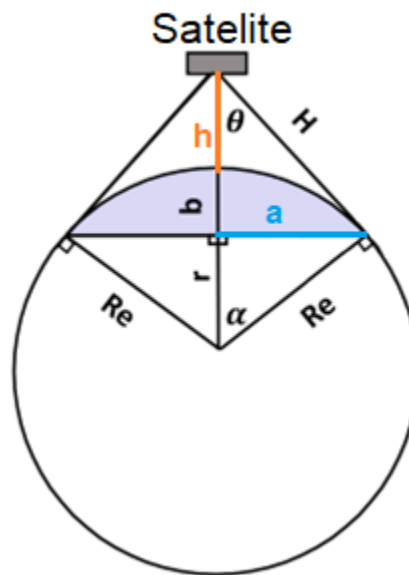


Figura 2-15: Geometría asociada a la capacidad de visión de un satélite.

La Figura 2-15 presenta un caso donde se no se considera la curvatura de la tierra. Así se tiene:

- (h) altura.
- (a) radio de la circunferencia de visión.
- (θ) ángulo de "Halfwidth".

Con la información anterior, se puede aproximar el ángulo con el que el satélite ve a la tierra mediante trigonometría. Los resultados del cálculo se presentan en la Tabla 2-25 a continuación:

Tabla 2-25: resultados del cálculo del ángulo de "Halfwidth" de la arquitectura planteada. Elaboración propia.

Altura (h) [Km]	Radio del área cubierta (a) [Km]	Angulo entre altura y a [°]	(θ) [°]
550	24.13	90	~1.3
700	24.13	90	~1.0

Ahora para poder dimensionar la arquitectura del satélite geoestacionario se utilizó una metodología similar a la anterior, se considerará el factor de la posible eficiencia del sistema por kilogramo de masa del satélite.

Un factor significativo corresponde a si el satélite corresponde a un HTS (High Throughput *Satellite*), esta tecnología permite aumentar la eficiencia del uso de ancho de banda, esta tecnología está siendo adoptada cada vez más por satélites de comunicaciones y se considera necesaria para el funcionamiento de redes actuales.

A continuación, se presenta la Tabla 2-26 la cual resume los factores de dimensionamiento más importantes para la arquitectura del satélite geoestacionario del sistema.

Tabla 2-26: Parámetros de funcionamiento y costo proyectados para distintos satélites. Elaboración propia.

Satélite	Masa [kg]	Ancho de Banda ^③	Capacidad HTS ^①	Costo aproximado (USD)	Costo Actual aproximado (MUSD) ^②
Viasat-2 (2017)	6,418	~29,354 [MHz]	si	~\$624 M	\$722 (+15.8%)
ARSAT-2 (2015)	2,975	~6,849 [MHz]	si	\$250 M	\$300 (+20.1%)
Amazonas Nexus- INTELSAT 46 (2023)	4,500	~18,590 [MHz]	si	\$325 M (300 M €)	\$338 (+4.2%)
ARSAT-1 (2014)	2,985	~4,892 [MHz]	no	\$280 M	\$345 (23.5%)

① La capacidad HTS de un satélite aumenta el ancho de banda efectivo, debido a que esta aumenta la capacidad de data del sistema. Si bien no se tiene un factor fijo, se estima que se puede llegar a ver una mejora de 2 a 20 veces un incremento del rendimiento, así que se asume un factor base de 2 si la arquitectura se caracteriza como HTS.

② Para la estimación del costo actual que se presenta en la Tabla 2-26 se realizó un cálculo utilizando el IPC de Australia, debido a que este era el estándar más confiable que se encontró para realizar el ajuste. Una vez realizadas las proyecciones para cada satélite se calcula el valor actual con la siguiente fórmula.

$$C_{ajustado} = C_{Original} \cdot \left(1 + \frac{inflacion}{100}\right) \quad (1)$$

Para el ejemplo del satélite ARSAT-1 (2014) el cálculo es:

$$\$345 \text{ M} = 280 \cdot \left(1 + \frac{23.5}{100}\right) \quad (2)$$

③ Los parámetros asociados al ancho de banda son teóricos, calculados utilizando una modulación 64QAM ($FEC = 0.873$, $Eficiencia = 5.11$) con dos canales. Lo anterior se hace para poder obtener datos más consistentes con la información recopilada para satélites modernos, ya que mucha de la información abierta disponible no es consistente u omite las capacidades de ancho de banda de los satélites. La ecuación es la siguiente.

$$BW_{Hz} \cdot DualChannel \cdot Eficiencia = BW_{bit}$$

Para el ejemplo del satélite de Viasat-2 se calculó lo siguiente:

$$BW_{Hz} \cdot 2 \cdot 5.11 = 300 \text{ [Gbit]}$$

$$BW_{Hz} = 29,354 \text{ [MHz]}$$

Los datos recopilados de masa y ancho de banda se grafican y se obtiene una línea de tendencia que indica la eficiencia masa/ancho de banda para el rango de masa de los satélites recopilados, esto se muestra en la Figura 2-16.

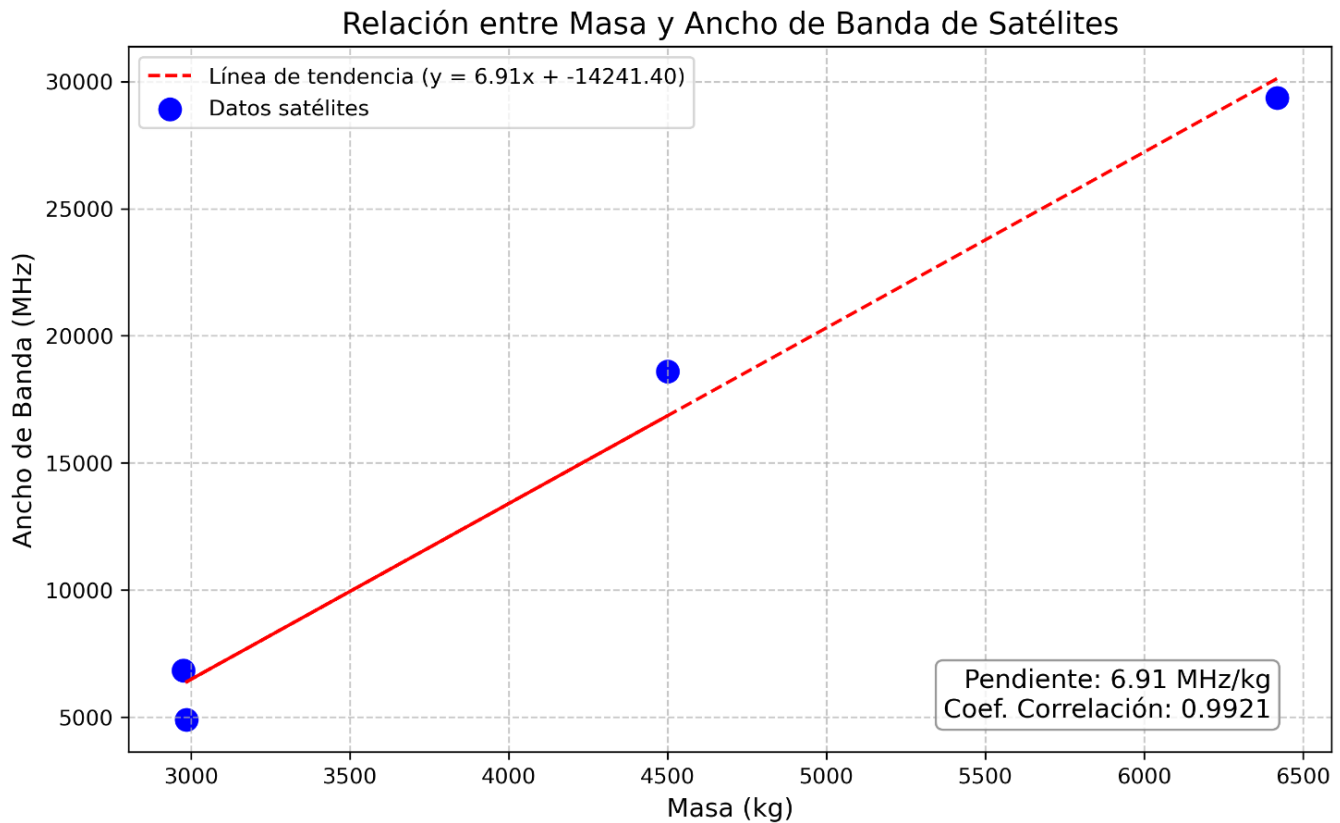


Figura 2-16: Proyección de la tendencia del peso y ancho de banda de distintos satélites de comunicaciones por año para satélites geoestacionarios. Elaboración propia.

Con los datos seleccionados y bajo la revisión de la información disponible, se debe tener especial cuidado respecto a las capacidades utilizadas para el cálculo de parámetros, esto debido a que se tiene una variedad de factores desconocidos que dificultan la tarea de estimar parámetros de funcionamiento en función de elementos como la masa del satélite. Principalmente, se desconoce el efecto que tienen las tecnologías HTS sobre el funcionamiento del satélite, ya que se sabe que esta aumenta la efectividad del rendimiento del satélite, “aumentando” el ancho de banda, a valores que superan el teórico, pero no se tienen valores respaldados por documentación, esto con falta de un estándar para este tipo de satélites lleva a la decisión de agregar un margen de un 20% de masa a los cálculos de arquitecturas presentadas, es así que si se estima la eficiencia para un satélite de 2,700 [kg] esta será asignada a un satélite de 3,240 [kg].

Tomando en cuenta la información presentada, es que se define que la arquitectura del satélite geoestacionario a utilizar en este trabajo será un satélite de eficiencia de 2,500[kg], el listado completo de estos parámetros se puede apreciar en la Tabla 2-27.

Tabla 2-27: Valores de parámetros de funcionamiento por kilogramo de masa de la arquitectura planteada. Elaboración propia.

Eficiencia [MHz/kg]	Masa [kg]	Ancho de banda [MHz]
6.91	3,000	17,275

2.11.2 Arquitectura Terrestre

El planteamiento de la arquitectura terrestre para el sistema se concentrará en resumir, posibles arquitecturas que permitan el funcionamiento del sistema, pero no se debe considerar como la forma óptima de llevar a cabo esto, el comportamiento de sistema frente a cambios en la cantidad de estaciones terrestres, distintos tipos y tamaños de antenas, condiciones geográficas adversas e interferencias debido a una multitud de razones no son consideradas a la hora de plantear estas arquitecturas.

Para plantear la arquitectura terrestre se tiene 2 posibles modelos.

- Plantear la instalación de una estación central de comunicaciones, la cual corresponderá a una estación terrestre la cual tenga antenas de grandes tamaños, esta servirá como el centro de control del sistema en tierra, junto con esto se plantea la utilización de estaciones pequeñas en cada una de las regiones, de forma de poder asegurar el funcionamiento regional de la red de comunicaciones.
- Seguir el modelo utilizado por Starlink, este modelo funciona mediante el despliegue de estaciones pequeñas en posiciones estratégicas, las cuales sirven para poder conectar la red satelital al internet central, minimizando la necesidad de estaciones.

Debido a que se desconoce una gran cantidad de los factores que afectarían el despliegue de una gran cantidad de estaciones, se optara por asumir un sistema de arquitectura terrestre similar al de Starlink, minimizando la necesidad de estaciones mediante el despliegue de “Gateway”.

La tecnología empleada por Starlink corresponde a grupos de “Stabilized tracking antennas” en cantidades no divulgadas, pero de la información disponible se asume que estas no superan las 20 (el máximo que se pudo apreciar fueron 15). Starlink tiene 7 estaciones desplegadas por todo el territorio de Chile, y según la información disponible estas tienen un radio de funcionamiento de 800 [Km]. Las estaciones se encuentran en las siguientes locaciones:

1. Comuna de Caldera – Región de Atacama.
2. Callejón Santa Elena/ La Serena – Región de Coquimbo.
3. Pudahuel – Región Metropolitana.
4. San Clemente – Región del Maule.
5. Puerto Saavedra – Región de la Araucanía.
6. Puerto Montt – Región de los Lagos.
7. Punta Arenas – Región de Magallanes.

Se asume la necesidad de agregar una estación dentro de Rapa Nui.

- 8. Hanga Roa - Rapa Nui.

Esta corresponderá a la distribución regional de la primera iteración de la arquitectura de las estaciones terrestres del sistema. Se espera tener que aplicar cambios debido a la diferencia en la cantidad y posibles cambios en la arquitectura orbital de los satélites.

2.11.3 Arquitectura orbital

Para el desarrollo de la siguiente sección se deben plantear los requerimientos de la constelación, esto para poder seleccionar que parámetros orbitales serán los más apropiados para el sistema planteado.

- **Cobertura continua y frecuente** del territorio continental e Insular de Chile.
- Capacidad de lanzamiento mediante programas de “RideShare”.
- Ambiente que permita el funcionamiento de satélites pequeños.

Para poder dar una comprensión rápida de como los parámetros de la arquitectura orbital afectan a los parámetros de funcionamiento de la constelación, se resumirán los parámetros en la Tabla 2-28.

Tabla 2-28: Requerimientos de misión parámetros orbitales asociados a estos. Elaboración propia basada en (Wertz & Larson, 1999, p. 181)

Requerimiento de misión.	parámetro afectado.
Cobertura • Continuidad • Frecuencia • Duración • FOV • “Area coverage rate” • “Earth locations of interest”	• Altitud. • Inclinación. • Excentricidad.
Ambiente y supervivencia • Radiación • Acciones hostiles	• Altitud.
Comunicaciones terrestres • Localización de estaciones terrestres. • Uso de satélites como “relay” • “data timeliness”	• Altitud. • Inclinación. • Excentricidad.

Como se puede notar los parámetros orbitales que se ven afectados por la mayor cantidad de requerimientos de la misión son altura e inclinación.

Ahora, se sabe que se deben determinar parámetros orbitales para 2 arquitecturas distintas, un grupo de parámetros orbitales se aplicara a un satélite geoestacionario, por lo cual sé subentiende que la altura, excentricidad e inclinación de la órbita ya se conocen (parámetros que definen órbita geoestacionaria). El segundo grupo de parámetros orbitales debe ser aplicado a la constelación de satélites que se estima se ubicaran en órbitas bajas, esto puede ser en las regiones espaciales de LEO o MEO.

Primero se explicará el proceso utilizado para poder determinar los parámetros orbitales utilizados para el satélite geoestacionario.

Las órbitas geoestacionarias por definición poseen una altura de 35,786 [Km], una excentricidad de 0 y una inclinación de 0°. Para poder determinar la posición que se le debe dar al satélite dentro de la órbita se utilizara el estudio previo (CTI Engineering Co. et al., 2016, p. 87) de donde se discute la posible posición orbital de un satélite geoestacionario de telecomunicaciones para Chile, aquí se define la **posición 74.9°W** como la posición asignada por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) a Chile para fines de telecomunicaciones orbitales.

Es así como se definen los parámetros orbitales para el satélite geoestacionario planteado, presentados en la Tabla 2-29.

Tabla 2-29: Parámetros orbitales planteados para la arquitectura de satélite geoestacionario. Elaboración propia.

Altura	Excentricidad	Inclinación	RAAN	TA
35,786 (input = 42,164)	0	0	0	92.6

Notar, cualquier elemento kepleriano no especificado debe asumirse como 0.

Los resultados de estos parámetros orbitales pueden ser apreciados en la Figura 2-17 a continuación, ubicado en meridiano 74.9 oeste.



Figura 2-17: Posicionamiento del satélite geoestacionario dentro de la simulación. Elaboración propia

Para el estudio de parámetros orbitales útiles para los microsátélites, se sabe que estos deben ser lanzados a regiones espaciales bajas (LEO o MEO) y se conoce de forma general las ventajas y desventajas de ubicar estos satélites en estas regiones. Esto se puede apreciar en la Tabla 2-30.

Tabla 2-30: Ventajas y desventajas comparativas para regiones bajas del espacio. Elaboración propia.

Orbita	Ventajas	Desventajas
LEO (160[Km] – 2,000 [Km])	• Baja latencia (10 ms – 40 ms) • Cobertura Polar.	• Comparativamente menor cobertura por satélite.
MEO (2,000[Km]-36,000[Km])	• Mayor cobertura por satélite en comparación a LEO.	• Latencia media (50 ms – 150 ms) • Condiciones atmosféricas más desafiantes para satélites pequeños. • Necesidad de antenas de mayor tamaño.

Ambas regiones presentan características que serían favorables para la arquitectura planteada, pero debido a la falta de sistemas similares al que se desea plantear dentro de la órbita de MEO (sistemas de BackHaul de teléfono son los ejemplos más numerosos y similares) junto con la tendencia actual que se tiene de

Pero no solo lo anterior es importante, dado que, como se mencionó antes, la capacidad de lanzar los satélites pequeños mediante programas de “RideShare” sería una gran ventaja para el sistema, es por esto por lo que también se analiza publicaciones que indiquen las regiones del espacio más visitadas, de esta forma se agrega un criterio para poder generar los parámetros orbitales de la constelación de satélites pequeños.

Es así como, apoyado con la información encontrada en publicaciones en las cuales se indica las combinaciones de altitud e inclinación donde se despliegan la mayor cantidad de satélites pequeños (A. López-Telgie et al., 2024, p. 455) se llega a la conclusión que, las **órbitas de tipo SSO** presentan características útiles para la puesta en órbita la constelación de microsátélites planteada en este trabajo. Figura 2-18 presenta las órbitas bajo 1000 [Km] más utilizadas para el despliegue de satélites de tipo CubeSat.

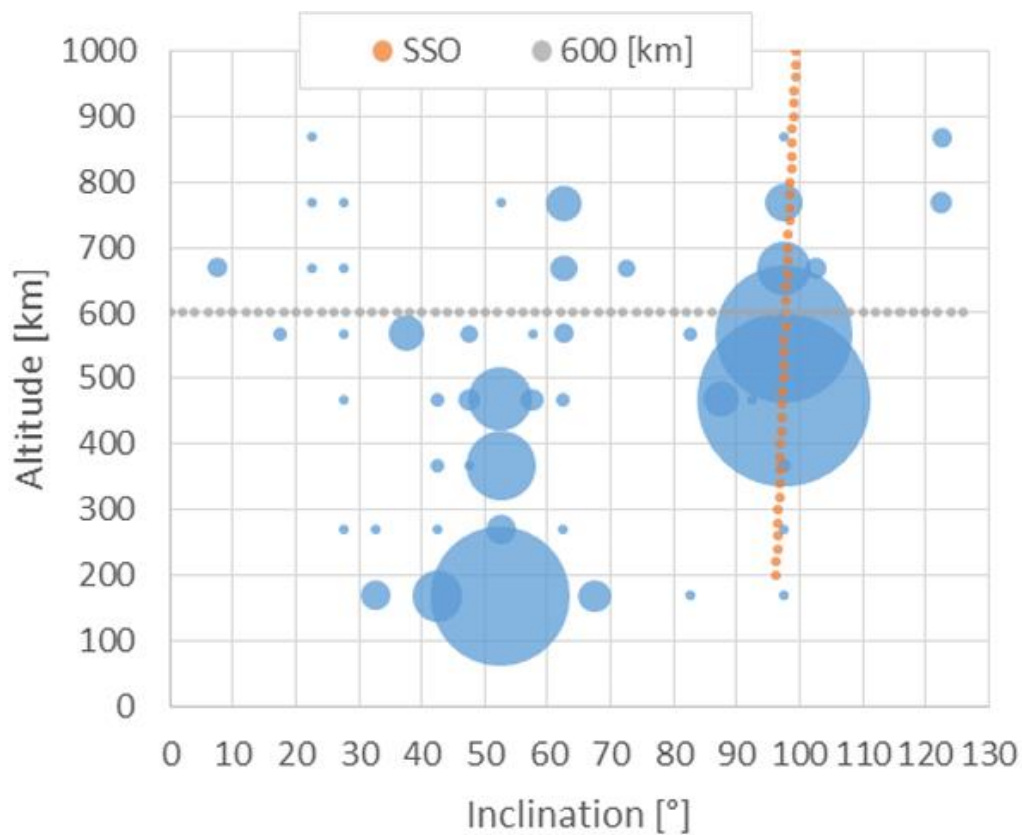


Figura 2-18: Órbitas de satélites CubeSat organizadas por órbita e inclinación. Fuente: (A. López-Telgíe et al., 2024, p. 455)

Esta información ubica a las órbitas de tipo SSO como el candidato principal para la arquitectura orbital que se quiere plantear. Estas tendrán las ventajas de ubicar un satélite en órbita baja (LEO) y las inclinaciones de entre 90° a 110° permiten el acceso a regiones polares como lo pueden ser el sur de Chile.

Tomando la decisión de proceder utilizando orbitas de tipo SSO, se plantea utilizar 3 planos para poder cubrir la totalidad del territorio de Chile continental y Chile Insular. Estos se presentan en la Tabla 2-31 a continuación.

Tabla 2-31: Parámetros orbitales de los microsátélites simulados. Elaboración propia.

Altura [Km]	Inclinación [°]	RAAN	TA	e
700	-97.21	40	0	0
700	-97.21	40	-45	0
700	-97.21	40	-90	0
700	-97.21	40	-135	0
700	-97.21	40	-180	0
700	-97.21	40	-225	0
700	97.21	97	11.25	0
700	97.21	97	51.25	0
700	97.21	97	91.25	0
700	97.21	130	22.5	0
700	97.21	130	67.5	0
700	97.21	130	112.5	0
700	97.21	130	157.5	0
700	97.21	130	202.5	0
700	97.21	130	247.5	0
700	97.21	130	292.5	0

Así se tiene estructurada la primera iteración de los parámetros orbitales para poder simular el funcionamiento del sistema.

2.11.4 Arquitectura seleccionada.

La arquitectura que plantea y que será simulada corresponde así a 16 microsátélites y un satélite geoestacionario, los parámetros de las arquitecturas a simular se encuentran en la Tabla 2-32 a continuación.

Tabla 2-32: Tabla resumen de las arquitecturas planteadas. Elaboración propia.

Arquitectura	Masa [kg]	Ancho de banda total [MHz]	Orbita
Microsatélite	100	~1,050	SSO
Satélite geoestacionario	3,000	~17,275	GEO

El funcionamiento de esta arquitectura híbrida está planeado para funcionar de forma similar al planteamiento de sistemas como los de “Alcatel Sky-Bridge”, “Loral Cyberstar” o “Globalstar GS-2” los cuales son sistemas que combinan el uso de satélites geoestacionarios y satélites pequeños ubicados en la región de LEO. El funcionamiento se basa en utilizar los satélites pequeños como la fuente conexión primaria para los usuarios del sistema, utilizando al satélite geoestacionario como un relé de conexiones entre la constelación de microsátélites ubicada en LEO, el satélite geoestacionario también tendría la capacidad de conectar a una cantidad limitada de clientes, en caso de ser necesario.

2.12 Simulación.

El proceso de simulación se separa en 3 etapas, programación de la herramienta de simulación y procesamiento de datos mediante la creación de algoritmos en FreeFlyer y Python respectivamente, simulación de las arquitecturas planteadas y finalmente el procesamiento de los datos obtenidos de la simulación

El algoritmo de simulación primero necesita el input manual en su código de los parámetros de la arquitectura, estos parámetros corresponden principalmente a los elementos keplerianos de que se requieren para cada elemento de la constelación, esto debe ser complementado con cualquier cambio a los parámetros de funcionamiento de los objetos a simular en el caso de que se quiera alterar la arquitectura de los satélites simulados. Luego el algoritmo lee un grupo de datos entregados como archivos KML, los cuales deben estar localizados en la misma carpeta que el archivo de simulación de FreeFlyer, junto con el adjunto “KMLtoRegion” (la cual corresponde a una función gratuita puesta a disposición por A.I Solutions), esto permite la generación de regiones y sus bordes geográficos con una alta precisión, estos archivos pueden ser encontrados como datos abiertos en páginas del gobierno de Chile. Una vez cargadas las regiones, se genera grupos de puntos homogéneos, los cuales se ajustarán a los bordes de las distintas regiones de la simulación, esto permite la generación de un mallado, el cual podrá almacenar información sobre la cobertura sobre cada uno de los puntos generados. El programa luego procede con la simulación, generando los objetos solicitados y almacenando los datos en archivos de texto que servirán para luego poder procesar los datos de forma externa, se entrará en más detalle sobre los archivos y su información más adelante. El proceso de simulación de un día toma aproximadamente 30 minutos, mientras que el desarrollo de una simulación de por lo menos una semana toma aproximadamente 2 horas y 15 minutos. Un diagrama que muestra de forma simplificada el funcionamiento del algoritmo usado para la simulación se puede apreciar en la Figura 2-19.

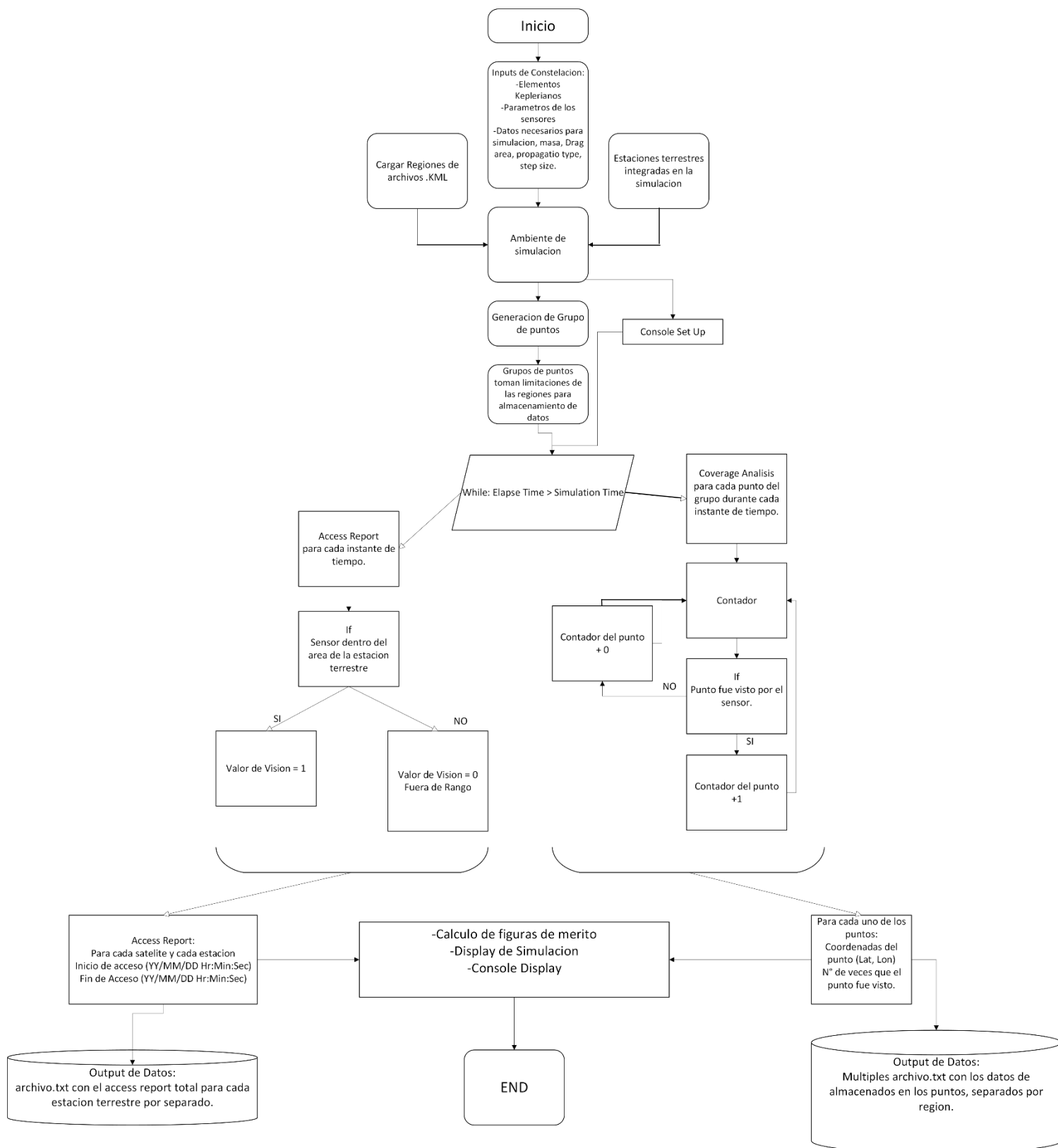


Figura 2-19: Representación esquemática del algoritmo desarrollado para poder simular y recolectar datos de la arquitectura planteada. Elaboración propia.

Como se explicó anteriormente el algoritmo generar grupos de puntos homogéneos sobre cada una de estas regiones, adaptándose a los bordes de cada región. Esto genera un mallado el cual nos permitirá analizar las condiciones sobre cada punto que compone a la región. Junto con esto se generan las estaciones planteadas dentro de la arquitectura haciendo uso de las herramientas de objetos de la herramienta de FreeFlyer.

Los archivos exportados de la simulación contienen datos asociados a la cobertura, estos son principalmente:

- **Análisis de cobertura por punto.**
 - Coordenadas de cada punto. Debido a la cantidad de puntos totales, se agrupan los puntos dependiendo de la región a la que estos puntos pertenecen.
 - Número de visitas al punto. Cada punto almacena la información del número de visitas que se tuvieron durante la duración de la simulación, esto permite acertar la capacidad que tiene el sistema de poder cubrir las distintas regiones del país.
 - El porcentaje de los puntos cubiertos. Este parámetro es autoexplicativo, poder comparar este parámetro es fácil y eficiente para poder determinar la efectividad de una arquitectura.
- **Análisis de acceso a las estaciones terrestres.**
 - Fechas y horarios del inicio de acceso y fin del acceso a las distintas estaciones terrestres planteadas en la arquitectura.

El estudio inicial que se quiere realizar está dedicado a la cobertura del sistema y la característica de la cobertura que se logra mediante el uso de la arquitectura propuesta.

Figuras de mérito

Otro archivo exportado tiene datos “generales” de la simulación, estos datos traen parámetros de la simulación, como lo son el inicio y fin de la ventana de simulación, más importante que estos son la entrega de las figuras de mérito de cobertura. Estas figuras de mérito son un mecanismo numérico para comparar la cobertura de satélites y constelaciones. En general son usadas para poder obtener estadísticas de cobertura que permiten evaluar la cualidad de cobertura de una constelación y compararla con la cobertura de otra constelación. Las figuras de mérito más comunes, según el libro SMAD (Wertz & Larson, 1999, p. 176) son las siguientes:

- **Percent Coverage**: Para cualquier mallado de puntos, es simplemente el número de veces que un punto fue cubierto por un satélite, dividido por el número total de “steps” de la simulación, o, en otras palabras, el porcentaje de veces que fue cubierto dividido la totalidad de veces que pudo ser cubierto.
- **Maximum Coverage Gap (= Maximum Response Time)**: Es simplemente la mayor extensión de tiempo que se tiene para un “gap” en la cobertura para un punto cualquiera. Para grupos de puntos como el que se presenta, se tiene la certeza que puede haber puntos en específico que nunca fueron cubiertos, por lo cual se tendrá el cuidado de revisar esta misma figura de mérito para regiones individuales y el país completo.
- **Mean Coverage Gap**: Corresponde a la extensión promedio de tiempo durante un corte en la cobertura cualquiera para cualquier punto del mallado.

- **Time Average Gap**: Corresponde a la duración del corte de cobertura promedio (mean gap duration) dividido por el tiempo de la simulación. Otra forma de ver esta figura de mérito corresponde a la duración promedio de tiempo que se tendría para cualquier corte en la cobertura (*gap*) si se tomara una muestra al azar.
- **Mean Response Time**: Corresponde al tiempo promedio que se demora en observar un punto, desde el momento de la solicitud hasta que el punto es observado.

Las figuras de mérito entregan una buena estadística para la comparación de distintas arquitecturas de misión, permitiendo obtener resultados numéricos con los cuales poder acertar el grado de eficiencia de una arquitectura frente a otra.

Dentro de la literatura se aclara que las 2 figuras de mérito que mejor representan la efectividad de una constelación o satélite corresponden a “*average gap*” y “mean response time” debido a que estas entregan medidas más acertadas para poder justificar el rendimiento de una constelación sobre otra, también se aclara que debido a que estas figuras de mérito evalúan distintos aspectos de una constelación, se deben evaluar varias de estas juntas, y la evaluación debe ser cualitativa y no cuantitativa.

2.13 Procesamiento de datos.

Una vez simulada la arquitectura, se procesa los datos mediante el uso de un algoritmo generado en Python. Este algoritmo lee y reorganiza los datos obtenidos desde los archivos de texto correspondientes.

Se generan diferentes “Data Frames” para cada grupo de datos, de forma de poder limpiar y agrupar los datos conjuntos que puedan ser procesados en tiempos reducidos. No obstante, dependiendo de la cantidad de datos que se quiera analizar, y que análisis se quiera aplicar sobre los datos, el procesamiento completo tiene una duración de tiempo variable. Se separa el algoritmo en varias secciones distintas, las cuales pueden ser corridas de forma independiente, lo que limita el tiempo y uso de RAM necesarias. Se aclara, para aumentar la claridad de los datos obtenidos, los aportes realizados por el satélite geoestacionario estudiarán por separado, esto para evitar realizar estudios donde elementos como la cobertura sean del 100% debido a la cobertura constante del satélite geoestacionario.

En general todo el procesamiento de datos sigue una estructura generalizada. Esta se presenta en la Figura 2-20 a continuación.

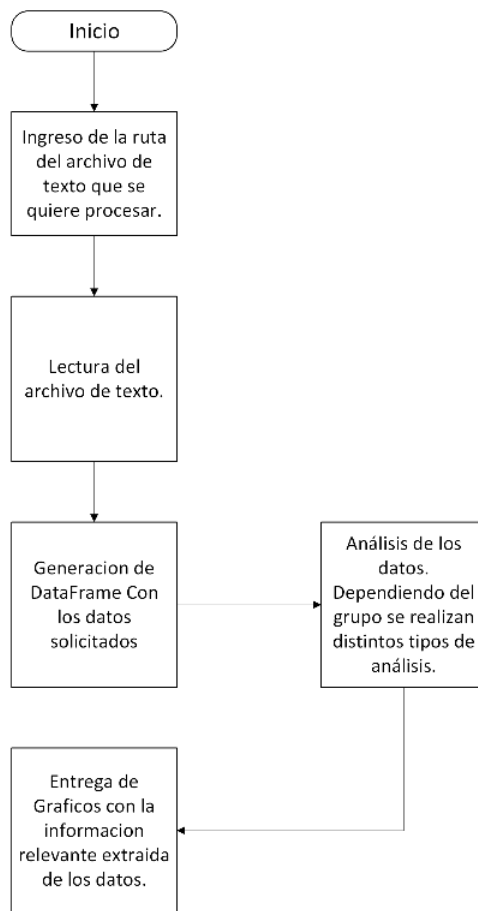


Figura 2-20: Representación esquemática del algoritmo desarrollado para poder procesar los datos obtenidos de la simulación de la arquitectura. Elaboración propia.

Se mantuvo esta línea de pensamiento general para todo el procesamiento de datos. Esto es suficientemente simple para poder obtener resultados, sin la necesidad de un algoritmo en extremo sofisticado.

El procesamiento de datos se enfoca en la obtención de gráficos los cuales puedan ilustrar de forma clara los resultados de las simulaciones anteriores. A continuación, se nombran los análisis más importantes generados para la simulación anterior.

- **Generación de un mapa de calor para análisis regionales:** Con la información almacenada en el mallado de puntos de cada región se puede generar un mapa de calor básico, que indique los sectores de la región que reciben una mayor cantidad de visitas durante la duración de la simulación. Este mapa también puede ser entregado por parte del software de simulación de FreeFlyer, se utilizará este como el mapa principal en caso de querer mostrar un enfoque general de la constelación.

- **Gráficos de Acceso por Región/Estación:** Se organiza los datos por evento, el evento de inicio de Acceso, el cual indica que el sensor puede “ver” el mallado de puntos de la región o entra dentro del cono de visión de la estación terrestre, este una vez que se inicia este evento el algoritmo retorna el valor “1”. El segundo evento corresponde al fin del acceso, el cual retorna el valor “0”. Gracias a esto se puede graficar el acceso dentro del rango de tiempo determinado. Esta medida sirve para visualizar el funcionamiento y tasa de visitas de la constelación de satélites.
- **Estudio del porcentaje de tiempo que se cubre el país:** Este análisis permite visualizar el porcentaje de tiempo de la simulación, durante la cual se tiene por lo menos un satélite el cual tiene cobertura del país o región. Permite rápidamente acertar un porcentaje de tiempo de cobertura de la totalidad y es una medida rápida de comparación para determinar la eficiencia de la constelación.
- **Aporte individual de cada satélite de la constelación a la cobertura del sistema:** El análisis permite visualizar el aporte individual de cada satélite a la totalidad de la cobertura de la constelación, de esta forma permitiendo estudios de los componentes individuales de la constelación, y permitiendo el análisis completo de las mejoras de futuras iteraciones.

2.14 Resultados de la simulación.

Un análisis detallado de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos entregados por la simulación puede ser encontrados en esta sección. Para empezar, se muestran los resultados obtenidos del procesamiento de datos, esto en la forma de los gráficos y análisis mencionados en la sección anterior. Para luego revisar la significancia de los resultados obtenidos frente a las necesidades del sistema. Se procederá indicar un análisis de flujo de caja para ilustrar la capacidad del país de realizar un sistema similar. Para luego pasar a detallar los problemas que se tuvieron, principalmente en el desarrollo de las simulaciones y procesamiento de datos.

2.14.1 Análisis de la cobertura de la arquitectura Propuesta.

El dimensionamiento de las capacidades de cobertura de la constelación se inicia estudiando las figuras de mérito de la constelación. Estas se presentan en la Tabla 2-33 a continuación.

Tabla 2-33: Resultados de las figuras de mérito por región. Elaboración propia.

<i>Región</i>	<i>Maximum Coverage Gap [Días]</i>	<i>Mean Coverage Gap [Días]</i>	<i>Time Average Gap [Días]</i>
Chile Continental	2.0	0.24	0.38
Región I	2.0	0.33	0.55
Región II	1.5	0.32	0.50
Región III	1.1	0.32	0.46
Región IV	1.1	0.29	0.43
Región V	1.4	0.27	0.44
Región VI	1.5	0.25	0.40
Región VII	1.3	0.45	0.36
Región VIII	1.0	0.23	0.33
Región IX	1.0	0.23	0.32
Región X	0.79	0.21	0.31
Región XI	1.0	0.21	0.33
Región XII	1.0	0.20	0.35
Región XIII	1.4	0.26	0.42
Región XIV	1.0	0.22	0.32
Región XV	2.0	0.31	0.52
Región XVI	1.1	0.25	0.33
Rapa Nui	0.73	0.32	0.44
Juan Fernández	1.0	0.33	0.53

Se nota que la arquitectura actual propuesta, tiene un mejor rendimiento en la zona sur del territorio continental, pero tiene aún en estas zonas, se tienen extensos periodos de ausencia de satélites, de esta forma teniendo interrupciones largas durante el funcionamiento del sistema (se nota que existen interrupciones en el sistema de hasta 2 días).

2.14.2 Contribución Satelital y análisis de la cobertura global.

A continuación, en la Figura 2-21, se presenta el resultado del procesamiento de los datos de cobertura y la duración total de la simulación, junto con la contribución individual a la totalidad del tiempo que se tuvo cobertura del territorio (Chile continental e Insular)

Análisis de Contribución Satelital | Cobertura Global: 11.4% | Tiempo Total: 19.1/168 horas

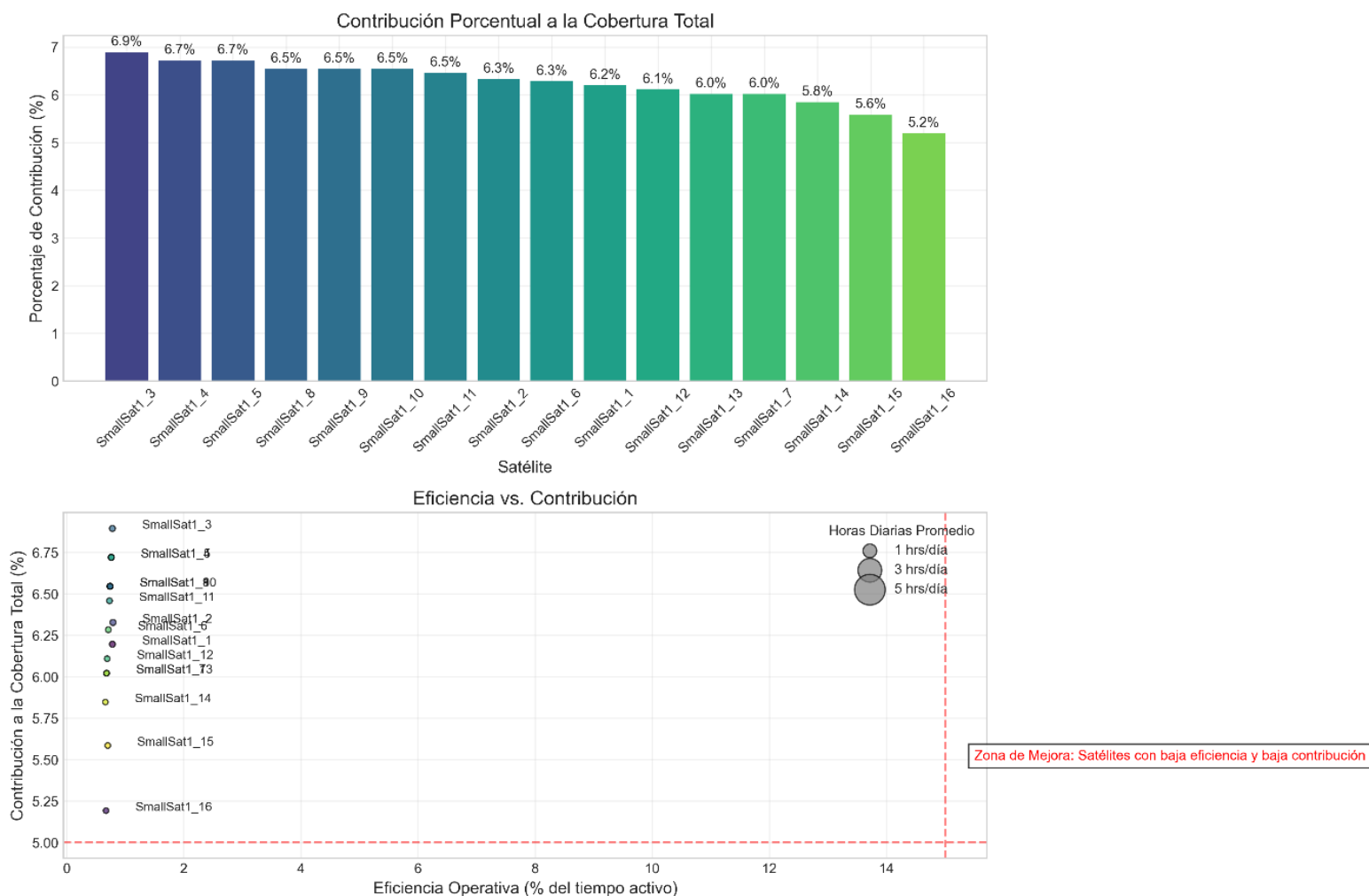


Figura 2-21: Análisis de contribución satelital a la cobertura de la constelación simulada. Elaboración propia.

En este gráfico se puede apreciar la contribución que cada satélite tuvo sobre la totalidad de la cobertura de la constelación, como se puede apreciar, la constelación funciona de una forma bastante uniforme, teniendo una diferencia en el aporte de cobertura, de un máximo de un 1.7% (porcentaje de las horas totales de cobertura), no obstante, tomando en cuenta que el porcentaje de cobertura del país es extremadamente bajo, sé estos aportes siguen siendo insuficientes para una constelación con las características deseadas.

2.14.3 Análisis de la distribución del tiempo de cobertura de la constelación.

La Figura 2-22 presenta la distribución en horas de la cobertura de la constelación con la arquitectura presentada, el gráfico presenta la cantidad de tiempo combinado que se tuvo cobertura del área de estudio, también se indica si esta cobertura fue entregada por solo un satélite o más de un satélite a la vez.

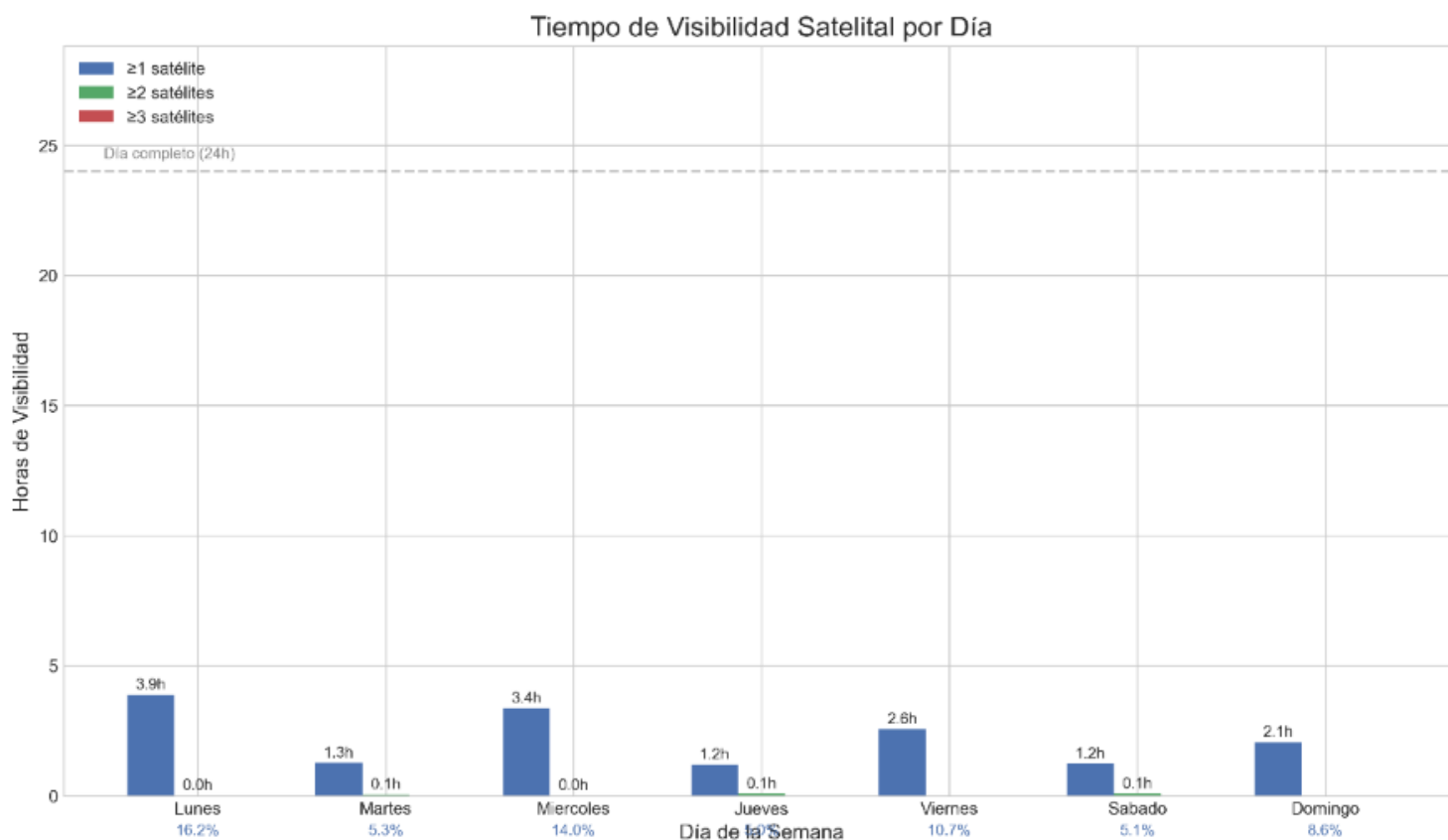


Figura 2-22: Análisis de horas de visibilidad por día de la constelación simulada. Elaboración propia.

Como se puede notar, este gráfico deja aún más en evidencia la falla de parte de la constelación actual, teniendo una tasa muy baja de tiempo muy baja de cobertura por hora, en su mayoría esta cobertura es gracias a un solo satélite, lo cual puede indicar que durante el periodo de tiempo que se tiene cobertura, solo limitadas regiones tendrían acceso al servicio y esto durante periodos de tiempo reducidos, ya que los satélites al estar en órbitas bajas, tiene velocidades de pasada rápidas.

2.14.4 Análisis del acceso total de la constelación a las regiones de interés.

La Figura 2-23 presenta el acceso de la constelación a las regiones de interés a lo largo de la semana, cada par de líneas representan el inicio de la cobertura y su subsecuente fin de cobertura de la constelación.

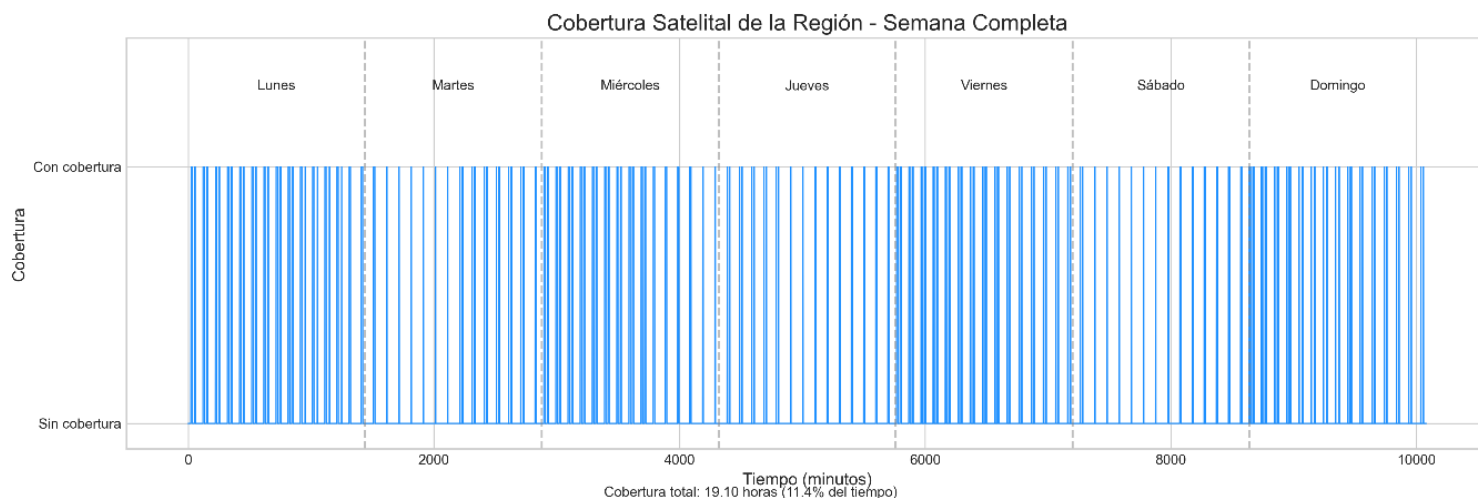


Figura 2-23: Análisis del acceso de la constelación a Chile continental. Elaboración propia.

El siguiente análisis se intentó limitar a periodos de tiempo más cortos, pero resultaba difícil intuir la diferencia que se tenía entre los distintos días analizados. Finalmente, se optó por la versión que se presencia en la Figura 2-23, ya que esta permite al lector intuir la tasa de cobertura y como está varía a lo largo de la semana, no solo eso, pero también nota que durante algunos días que tienen una alta cobertura, la mayor parte de esta se da durante ciertas horas del día y no se distribuye de forma uniforme.

2.14.5 Mapa de calor de la constelación.

A continuación, en la Figura 2-24, se muestra un mapa de calor de la constelación, este mapa de calor final busca poder dar al lector la capacidad de analizar las regiones que tiene una cobertura más completa por parte de la constelación.

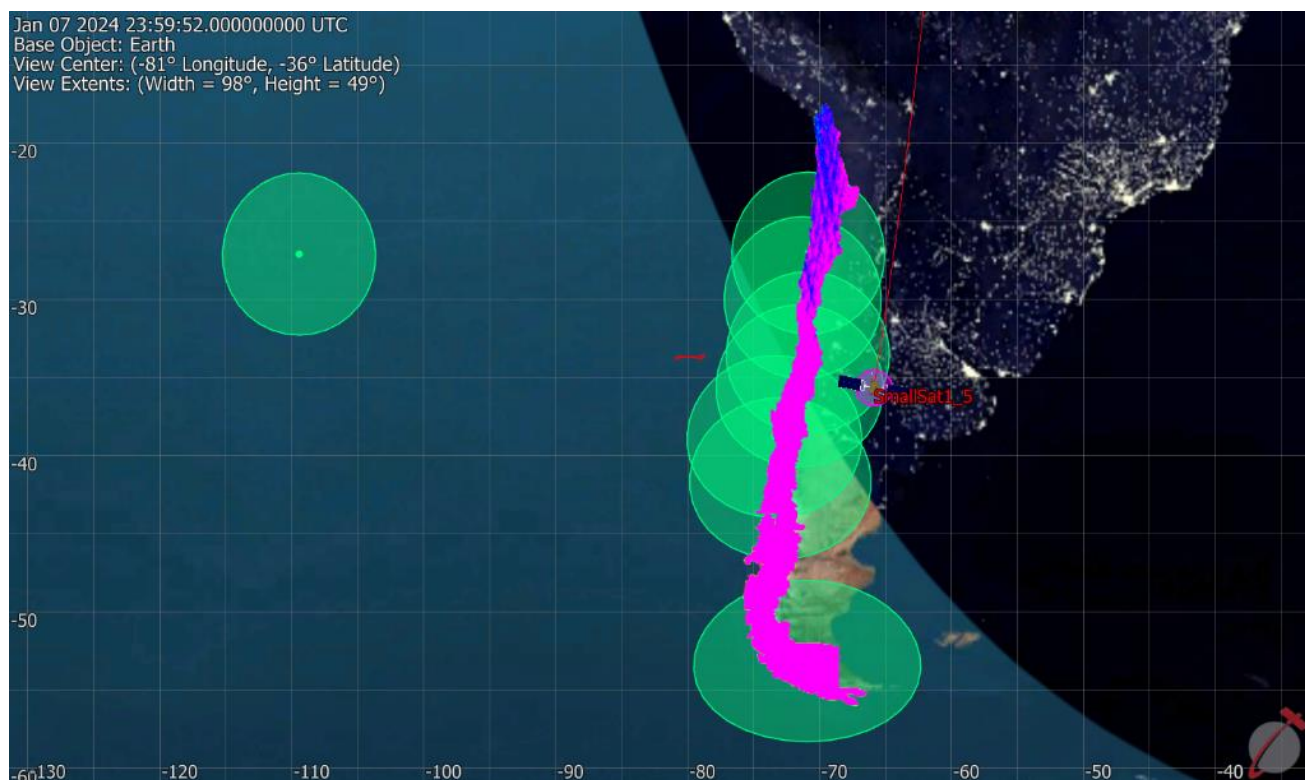


Figura 2-24: Mapa de calor general de la constelación sobre Chile.

Se puede notar que la constelación en general tiene una mejor cobertura de las regiones del sector sur y centrales del país. Si bien este gráfico entrega una idea general del desempeño y capacidad de cobertura de la constelación, se considera que el tiempo que se dedica para el análisis trae consigo dificultades de visualización, ya la tasa de revisitas lo suficientemente variable, para que durante algunos días este mapa cambie en regiones muy específicas, esto se apoya del análisis del acceso total mostrado en la sección 2.14.4.

2.15 Flujo de caja.

Para la dimensión de la necesidad estimada en la sección 1, se quiere presentar un flujo de caja simplificado, que muestre a grandes rasgos la estimación de la posible ganancia que se puede llegar a tener de parte del sistema, de forma de demostrar que un sistema como el que se presenta en este trabajo es una posibilidad frente a la necesidad proyectada.

Estimando que el sistema que se presenta será comparado a servicios de internet satelital competitivos como los servicios de Starlink, se usará el precio estándar de este para poder estimar un costo por cliente. En la Tabla 2-34 se muestran los distintos precios de los servicios de Starlink junto con una estimación del costo del servicio actual.

Tabla 2-34: Proyección del costo teórico del sistema. Elaboración propia basada en (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 28)

Servicio	Costo mensual [CLP]	Costo inicial [CLP]	Reducción del costo del servicio
Residencial	\$ 47,000	\$ 150,000	-
Residencial LITE	\$ 35,000	\$ 150,000	25%
Proyecto Costo estimado	\$ 10,000	\$ 0	78.72%

El costo Estimado anteriormente correspondería al cobro mensual por cliente individual, este cobro se mantiene pensando en hogares individuales que contraten el servicio, si se tiene en cuenta empresas y otras organizaciones este costo debería variar. En la Tabla 2-35 se muestra la estimación de la mensualidad para grupos como empresas y otras instituciones que utilizaran más conexiones por servicio que un hogar. Notar que el servicio de Starlink utilizado como comparativa se recomienda para “Ideal para pequeñas empresas que necesitan un ancho de banda inferior al promedio, por ejemplo, de 2 a 4 usuarios” por lo cual se considera que este precio es conservado en comparación a cobros reales que se deben realizar a empresas.

Tabla 2-35: Proyección del costo teórico del sistema. Elaboración propia.

Servicio	Costo mensual	Costo inicial	Reducción del costo del servicio
Empresa (500 GB)	\$ 138,000	-	-
Servicio	\$ 100,000	-	27.5%

A continuación, se muestra la proyección teórica de la ganancia que se tendría durante el lapso de 17 años fiscales (cobro de la mensualidad durante 12 meses). Se aclara que este flujo de caja corresponde a la versión más simplificada posible de la ganancia del sistema, dado que se tiene una variedad de incógnitas que podrían alterar el flujo, los valores calculados corresponden a un caso donde no se considera la demanda proyectada, y solo se asume que la tasa de abandono y entrada de clientes al sistema se mantiene estable, manteniendo el número de clientes igual a la demanda actual calculada (236,833 clientes actuales), este caso se considera como el caso base, donde la demanda no evoluciona (lo que se considera poco realista pero útil para este ejercicio, donde se presenta un caso poco optimista en comparación a utilizar la demanda proyectada para los próximos 15 años)

La Tabla 2-36 muestra estas ganancias por año, solo para la demanda actual.

Tabla 2-36: Proyección del flujo de caja teórico del sistema. Elaboración propia.

Año fiscal	Ganancia [MCLP]	Ganancia [MUSD]
1	\$ 35.266	\$ 35
2	\$ 70.532	\$ 71
3	\$ 105.798	\$ 106
4	\$ 141.064	\$ 141
5	\$ 176.330	\$ 176
6	\$ 211.596	\$ 212
7	\$ 246.861	\$ 247
8	\$ 282.127	\$ 282
9	\$ 317.393	\$ 317
10	\$ 352.659	\$ 353
11	\$ 387.925	\$ 388
12	\$ 423.191	\$ 423
13	\$ 458.457	\$ 458
14	\$ 493.723	\$ 494
15	\$ 528.989	\$ 529
16	\$ 564.255	\$ 564
17	\$ 599.521	\$ 600

2.16 Limitaciones y Posibles mejoras de la simulación.

El funcionamiento actual de los algoritmos de simulación y “data processing” están poco optimizados, ya que durante el desarrollo de estos se enfocó solo en su funcionalidad. No obstante, los algoritmos tienen una variedad de problemas con su origen en la falta de documentación disponible para FreeFlyer, donde se tiene una falta de soluciones de fácil acceso a usuarios, junto con la poca experiencia de uso del software. Esto llevo a problemas tales como.

- Poca optimización del algoritmo: El algoritmo consume una gran cantidad de tiempo y recursos del ordenador que esté simulando, el ordenador utilizado para las simulaciones tiene especificaciones técnicas medias/altas y aun así se tuvo problemas de apagones súbitos del ordenador durante algunas de las simulaciones, esto combinado con la lentitud que se tiene para poder simular las arquitecturas

cargadas genera que los tiempos de simulación sean largos y puedan ser interrumpidos por errores no previstos.

- Los archivos de texto obtenidos son muy grandes para poder ser utilizados y en algunos casos guardados. Durante el desarrollo de las simulaciones se notó el tamaño de los archivos como el principal problema para poder guardar datos de múltiples simulaciones en el ordenador, con tamaños de hasta 23 GB de datos por archivo, siendo que se están obteniendo datos por cada región del país, junto con algunos archivos que guardan datos generales de la simulación, es obvio que la cantidad de datos solicitada por simulación es excesiva. La idea de hacer simulaciones por regiones individuales se descartó debido a la falta de tiempo y posibilidades de la pérdida de datos a errores como apagones súbitos del ordenador.
- Debido a la combinación de los problemas anteriores se vuelve imposible generar simulaciones por periodos de tiempo superiores a una semana, lo que genera problemas serios para poder evaluar la arquitectura durante periodos de tiempo extensos, dejando así una idea muy limitada del funcionamiento de la constelación a largo plazo.
- Debido a una combinación de factores, el nivel de iteración dentro de la simulación deja mucho que desear. Se considera que las iteraciones realizadas tuvieron resultados mixtos, debió a que se quería iterar aumentando el aporte individual de cada satélite a la cobertura general de la constelación, pero debido a la lentitud de las simulaciones y falta de espacio esto se volvió imposible, dejando una constelación que deja mucho que desear en temas de cobertura.

3 Discusión.

En el presente capítulo se busca discutir la significancia de los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, tanto en términos de poder validar la viabilidad del sistema y la hipótesis principal, como para poder validar la simulación e hipótesis secundaria del trabajo.

- **Discusión de los resultados del estudio de la necesidad.**

Estas demandas son el resultado de la interpretación y la proyección de datos obtenidos de fuentes abiertas y solicitudes de datos directas a subsecretarías del gobierno de Chile, aun así, esta demanda se considera bastante incompleta. Lo anterior debido a la falta de datos en general, esta conclusión comenzó a presentar una problemática para poder generar una demanda desde que se comenzaron a obtener resultados de las subsecretarías de gobierno, ya que muchas de estas entidades no tienen datos almacenados referentes al uso y acceso de las mismas a internet, en algunos casos, los datos entregados están incompletos o carecen de identificadores claves que permitan comprender la totalidad de los datos entregados, un ejemplo de esto corresponde a los datos entregados por la SUBTEL sobre “Empresas comerciales” un nombre que no entrega mucho para poder caracterizar la demanda de estos grupos, de esta forma forzando el uso de características asumidas o bien la necesidad de ignorar el grupo de datos en su totalidad. Se sabe, dados estudios anteriores (CTI Engineering Co. et al., 2016) que existe una demanda real por parte del gobierno para redes de comunicaciones satelitales como la propuesta, una

demanda que tiene una gama de consideraciones importantes las cuales no pueden ser asumidas fácilmente, un ejemplo de lo anterior corresponde a los cálculos de la demanda para entidades de gobierno en casos “normales” y en “casos de emergencia” una distinción importante que solo puede ser entregada por las mismas entidades de gobierno. Si bien se tienen los datos de los trabajos anteriores la antigüedad de estos no permite su uso, dada la evolución y creciente demanda por comunicaciones, sobre todo después de la pandemia del año 2020. No solo existe una demanda insatisfecha dentro de las entidades de gobierno, sino que también se carecen de datos relevantes para poder estimar la demanda civil completa del país, habiendo dificultades serias para poder definir elementos como por ejemplo la última milla digital o los límites de la urbanización para todas las ciudades del país, de esta forma limitando las capacidades del estudio, de existir estos datos se podrían plantear regiones o sectores de impacto críticos para el sistema. Así también se tienen vacíos para poder definir en su completitud demandas por estratos socioeconómicos y otros grupos dentro del país. Es así como se puede intuir con facilidad, que existe una gran demanda la cual no está siendo considerada dentro de este trabajo.

Aun teniendo un vacío dentro de la dimensión de la posible demanda real, la demanda actual y proyectada superan la demanda esperada en la hipótesis.

- **Resultados del estudio del servicio.**

Los estándares de servicio trabajados en este informe fueron diseñados bajo el supuesto de poder habilitar un sistema que permita el acceso a internet desde dispositivos móviles, lo anterior debido a que el acceso a internet mediante dispositivos móviles es apreciada por la población como una alternativa más flexible a las redes fijas, en términos de precio y accesibilidad, esto último debido a que este tipo de acceso a internet requiere de menor infraestructura para su funcionamiento (uno de los grandes problemas asociados a las redes de comunicación fija). El estándar seguido y generado busca poder integrar el sistema dentro del mercado de telecomunicaciones, permitiendo balancear la calidad del servicio con factores como el precio. La demanda total actual calculada se debe tomar como la aproximación la cual permite planear el despliegue de la solución, y así mismo ayudando a intuir la dimensión que debe tener la solución para poder suplir la demanda estimada.

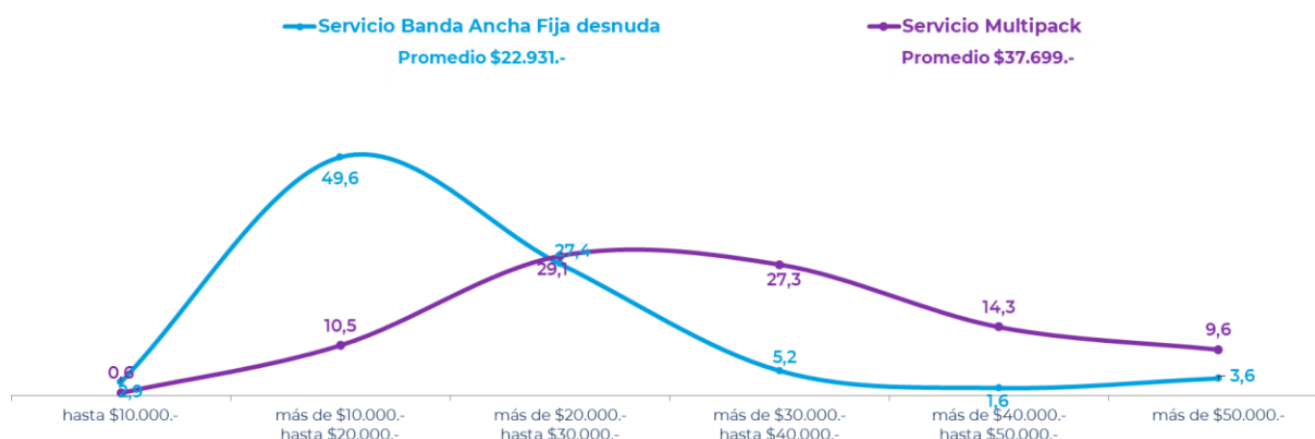
Este grupo de resultados resultan más relevantes para el trabajo específico realizado en este informe, dado que cambios sutiles en la necesidad o bien en características como la codificación pueden entregar resultados variados, es así como se considera que este apartado debe ser considerado como el lineamiento general que busca principalmente, permitir el dimensionamiento de la solución propuesta.

Los resultados de la viabilidad económica del sistema son uno de los aspectos que se quiere resaltar dentro del trabajo, dado que estos entregan información crucial para validar la hipótesis del trabajo. La definición de viabilidad económica viene ligada a la suposición que el costo total del sistema se puede aproximar a \$500[MUSD], esta suposición es el principal pilar sobre el cual se sostiene la viabilidad económica del sistema. Para poder validar la viabilidad del sistema se busca trabajar con valores conservadores, dado que, si se logra demostrar la viabilidad con una demanda incompleta y un cobro mensual lo más bajo posible, se puede indicar que la hipótesis señalada tiene validez para una variedad de

casos que se consideren mejores que el analizado. Así fue como simuló el flujo de caja para el sistema solo considerando la demanda actual y el precio más accesible que se tiene dentro de los datos entregados por la SUBTEL, según los datos entregados por esta, el 100% de los grupos encuestados estarían dispuestos a pagar \$10,000[CLP] mensualmente por el servicio. La información graficada sobre la disposición de pago se puede encontrar en la Figura 3-1.

*Figura 3-1: Tendencia de la disposición al pago del servicio de internet dependiendo del costo mensual.
Fuente: (Subsecretaría de Telecomunicaciones, 2024, p. 28)*

Bajo los supuestos mostrados los resultados resaltan que para los primeros 15 años de



servicio y solo para la demanda actual dimensionada, se tiene una ganancia de \$529[MUSD] lo que bajo los supuestos iniciales permite confirmar, parcialmente la hipótesis.

Dentro del contexto entregado por el estado del arte, este resultado no representa una anomalía, sino que, más bien confirma lo que otros estudios ya validan, un sistema de comunicaciones satelitales soberano es una opción viable y respaldada por distintos estudios que permiten acertar esto.

- **Resultados de diseño.**

Los resultados del trabajo de diseño son relevantes por 2 motivos distintos, el primero corresponde a la capacidad de simplificar arquitecturas investigadas a cajas negras, esto aunque no único al trabajo presente, logra generar un modelo que permite un rápido entendimiento de los parámetros que más peso tienen para el diseño y la presentación de una arquitectura para fines de entender el impacto, posible funcionamiento y la dimensión de la solución que se necesita para poder habilitar el sistema propuesto.

La segunda razón por la cual los resultados de diseño son relevantes es la posibilidad de estimar la capacidad tecnológica actual, frente a la problemática planteada, es aquí donde se tuvieron una mayor cantidad de problemas, dado que la capacidad de obtención de muchas de las tecnologías analizadas es difícil de dimensionar. Es más, se tiene una cantidad de factores externos no considerados los alcances de este trabajo, que pueden

dificultar o derechamente imposibilitar la obtención de tecnologías al nivel de lo propuesto por el trabajo. Chile carece de la capacidad para poder siquiera ensamblar muchas de las tecnologías planteadas, y esto podría verse beneficiado por proyectos actuales, por lo cual se buscó trabajar con satélites que se espera puedan ser ensamblados en Chile (MicroSat), pero para poder decir que lo propuesto por el trabajo es tecnológicamente viable de forma asertiva se necesitan estudios interdisciplinarios más profundos que los realizados por él trajo presente y dependerán de una combinación de factores externos que pueden variar rápidamente.

- **Resultados de la simulación.**

Los resultados de la simulación como ya se discutió anteriormente fueron menos que satisfactorios, los parámetros no son indicados para el propósito que se quería. Estos resultados son la consecuencia de problemas de optimización del algoritmo, lo que dificultó la iteración de la constelación para poder alcanzar parámetros satisfactorios, junto con esto se tuvieron distintos problemas con el hardware utilizado para realizar las simulaciones, nuevamente dificultando la iteración sobre la constelación que está siendo trabajada.

Dado el nivel de complejidad de la simulación que se debía generar, se debe trabajar para poder alcanzar un mayor dominio del software de simulación que se desea utilizar.

Otro de los resultados de las simulaciones es la necesidad de alterar la cantidad y los intervalos en los cuales se recopilan datos de las simulaciones, dado que la cantidad de datos fue uno de los grandes problemas que no permitieron simulaciones de sobre 7 días, dadas la naturaleza de la problemática, se consideró que poder medir la cobertura en segundos sería una unidad de medida que permitiría entender de mejor forma el comportamiento de la constelación y de cada satélite individual, no obstante no se contaba con las consecuencias técnicas que esto traería sobre el hardware.

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones así no pueden validar la hipótesis secundaria.

4 Conclusiones.

El trabajo presente abordó el desafío de poder validar la viabilidad de un sistema de comunicaciones satelitales soberano para Chile, proponiendo la arquitectura de misión que pueda dar solución a la problemática y evaluando sus resultados, lo anterior mediante modelos simplificados, proyecciones de demandas y ganancias, generando métodos empíricos para el dimensionamiento de arquitecturas y simulando las arquitecturas.

El trabajo concluyó que la red de comunicaciones más importante para Chile corresponde al internet, teniendo una penetración del 96.5% dentro de toda la población de Chile, y un 40.72% de la población total utiliza las redes para trabajar, dejando claro que el enfoque del satélite estará en entregar acceso a internet, principalmente internet móvil. Se declara que el estándar estará a la par con tecnologías 4G actuales, caracterizando el servicio que se evaluará, este estándar está ideado para la posible integración de las telecomunicaciones satelitales al mercado una opción accesible para los sectores rurales y aislados, junto al complemento de redes modernas mediante a las capacidades “direct to cell” que se proponen (*objetivo 2*).

Los resultados del trabajo demostraron un claro mercado para un sistema satelital en Chile, con 236,833 potenciales clientes entre los que se incluyen hogares sin acceso, infraestructuras vulnerables y grupos de trabajadores distintas áreas como salud, educación, entre otras. Este mercado presenta potencial de crecimiento exponencial si se optimiza la relación calidad-precio, en este estudio se detectó un posible mercado de 562,511 hogares que podrían ser posibles clientes fuera de la demanda estimada, esto indica un crecimiento potencial del 237.5% del posible mercado del servicio. Se identificaron 261,148 hogares dependientes de conexiones fijas sin tecnología de fibra óptica, y 226,773 hogares que derechamente no tienen acceso a internet, estos hogares están expuestos a aislamiento total ante desastres, reforzando la necesidad de soluciones satelitales. Según lo analizado en trabajos anteriores (CTI Engineering Co. et al., 2016) también se tiene una amplia demanda no explorada por este trabajo, la demanda de las distintas entidades de gobierno actualmente se desconoce, ya que los estudio anteriores muestran proyecciones que dados varios eventos globales como la pandemia del 2020 y el aumento de la dependencia de las redes como consecuencia de lo anterior, no se consideran acordes a la realidad, lo anterior no considera tampoco que la demanda de redes de comunicaciones varía dependiendo de si se habla de la demanda normal y la demanda en casos de emergencias, lo que altera las demandas por las telecomunicaciones (*objetivo 1*).

La arquitectura simulada se compone de 16 microsátélites de 100 [kg] de masa cada uno, estos satélites se ubicaron órbitas SSO y se distribuyeron en 3 planos distintos. Junto a estos se utilizó un satélite geoestacionario de 3,000 [kg] de masa. Las arquitecturas se dimensionaron en base a un parámetro de eficiencia en *mega Hertz por kilogramo de masa* el cual se obtuvo del estudio empírico de una lista de distintas satélites de comunicación. Se concluyó que los parámetros orbitales utilizados no son los indicados, se tuvo cobertura del país durante un 11.4% de la duración de la simulación y se sufrieron desfases diarios

que disminuyen la visibilidad de la constelación a medida que pasan los días desde el inicio de la simulación, junto con eso se tienen problemas para mantener un número de horas de cobertura y, por lo tanto, servicio activo, durante la semana, teniendo una disminución de aproximadamente el 50% de las horas de servicio por día, siendo los días lunes, miércoles, viernes y domingo los días con la mayor cantidad de horas de servicio, en comparación al resto de la semana (*objetivo 4*).

La herramienta de simulación de la arquitectura propuesta demostró ser insuficiente para poder estudiar el comportamiento de la simulación durante periodos extendidos de tiempo, y la baja cantidad de iteraciones dentro de la arquitectura actual demostraron que esta tiene resultados de cobertura pobres bajo el estándar general.

Este trabajo consigue seguir en los pasos de trabajos anteriores, demostrando que a diferencia de lo que se podría pensar, la demanda por un sistema de comunicaciones satelitales es real, y esta no ha hecho más que crecer desde el trabajo (CTI Engineering Co. et al., 2016) realizado en 2016, este al igual que otros trabajos (Durairajan et al., 2024) considera que para países como Chile, donde se tiene una necesidad imperativa y clara por redes de comunicaciones resilientes (dadas las condiciones de nuestro país, y la constante necesidad de combatir distintos desastres) deberían seguir en los pasos de países como Japón, donde las comunicaciones satelitales, son una potente herramienta del control, prevención y combate de estos eventos. Ante la compleja tarea que es el diseño de arquitecturas complejas que permitan evaluar el posible comportamiento del sistema este trabajo busca simplificar el dimensionamiento de arquitecturas de misiones espaciales, mediante el uso de estudios empíricos de arquitecturas actuales y la teorización de posibles tendencias que permitan generalizar los parámetros de estas. Como se vio con los 2 grupos de tendencia generados, para 2 grupos distintos de satélites, que permitieron generar una tendencia entre los parámetros que más impacto tenían sobre la arquitectura. Este primer modelo trabajado es en extremo simple, principalmente debido a que se buscaba mantener toda la infraestructura interna del satélite como un elemento no detallado, trabajando en las arquitecturas de estos como si fueran “cajas negras”, este principio limita que aspectos se pueden trabajar en una sola iteración, y se considera que trabajos futuros deben concentrarse en agregar traer más complejidad al modelo, a modo de poder englobar de forma clara una mayor cantidad de parámetros de funcionamiento de las arquitecturas (*objetivo 3*).

Los modelos de arquitectura planteados, principalmente el modelo físico de los satélites puede indicar que Chile podría ingresar al mercado espacial mediante la integración de microsatélites, lo anterior tiene mérito cuando se está atacando el desafío de poder desarrollar las capacidades espaciales de un país y presenta una posible ventana de oportunidad, la cual requiere una menor capacidad en comparación al desarrollo e integración de arquitecturas satelitales de mayor tamaño.

Es por lo anterior que se planteó que la hipótesis propuesta fue validada parcialmente, ya que según lo visto en los resultados del trabajo, el mercado objetivo que se dimensionó fue superior al límite planteado en esta hipótesis, el retorno del flujo de caja desarrollado fue superior al número que se proponía para determinar la rentabilidad, y la arquitectura presentada, se basa en el uso de datos empíricos para arquitecturas las cuales no superen

los 15 años, permitiendo plantear la factibilidad de la misma. Lo mismo no puede ser planteado para la hipótesis secundaria, la cual, dados los resultados encontrados en la simulación realizada, no puede ser validada de forma satisfactoria.

Para futuros trabajos se tiene una gama de distintas recomendaciones, para empezar el primer y claro aspecto que debe tener un mayor enfoque corresponde a las simulaciones, una amplia gama de problemas de optimización de la herramienta creada imposibilitó la obtención de datos a un ritmo y cantidad que permitieran poder obtener resultados satisfactorios. Estos problemas se concentran en la duración de la simulación y la cantidad de datos obtenidos, ambos siendo problemas que entorpecieron y en última instancia fueron los principales catalizadores de la falta de iteración dentro de la misma arquitectura planteada.

También se recomienda el desarrollo de algoritmos que permitan el desarrollo de simulaciones longevas que permitan estudiar el comportamiento de la constelación de satélites durante largos periodos de tiempo. Junto con lo anterior es necesario generar nuevas herramientas o algoritmos que permitan desarrollar la simulación de forma óptima, debido a que actualmente el algoritmo utilizado es lento, pesado y regularmente produce apagones dentro del sistema operativo, limitando la cantidad de datos y simulaciones que se pudieron desarrollar durante este trabajo, lo cual fue uno de los principales factores de la insatisfacción con los datos obtenidos de la simulación.

Para futuras investigaciones se considera importante enfocar parte de la investigación a satélite de menor tamaño, para ser más específicos Microsatélites ($\leq 100[kg]$) esto debido a que las comunicaciones satelitales actuales se están enfocando principalmente en constelaciones de satélites pequeños ubicados en LEO. Este enfoque puede ser respaldado por la futura posibilidad de integrar este tipo de satélites en Chile.

Otro aspecto que también es importante de poder profundizar es la demanda en Chile, dado que para el presente trabajo se tuvo dificultad para obtener datos oficiales de las distintas subsecretarías del gobierno de Chile, se podría cambiar el enfoque a una encuesta similar a la aplicada por el trabajo anteriormente realizado (CTI Engineering Co. et al., 2016) en 2016. Si bien esta metodología podría ser lenta, se considera que sería mucho más apropiada para poder determinar la dimensión de la necesidad actual por estas entidades, a forma de poder tener una poderosa herramienta de comparación y evaluación de la evolución de la demanda desde el año 2016 hasta la actualidad.

5 Referencias.

- A. López-Telgie, M. Quappe-Gutierrez, & W. A. Dos Santos. (2024). An Automated Data-Gathering Tool for Earth Observation CubeSat Classification. *IEEE Latin America Transactions*, 22(6), 451–459. <https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/8620>
- Airbus. (2024). *UTF-8SPANISH 2024 06 05 SNSat-Com Chile - FINAL* (pp. 1–9).
- Aizaz U. Chaudhry, & Halim Yanikomeroglu. (2020). *WHAT IS FREE SPACE OPTICS?*
- Aizaz U. Chaudhry, & Halim Yanikomeroglu. (2021). *Laser_Inter-Satellite_Links_in_a_Starlink_Constellation*. 1–7.
- Arbour MaryCatherine, Murray Kara, Arriet Felipe, Moraga Cecilia, & Vega Miguel Cordero. (2011, junio). *Lessons from the Chilean earthquake: How a human rights framework facilitates disaster response*. Harvard University.
- BryceTech. (2025). *Smallsats by the Numbers*. 1, 1–34.
- Crawley, E. F. ., Cameron, Bruce., & Selva, Daniel. (2016). *System architecture : strategy and product development for complex systems*. Pearson.
- CTI Engineering Co., Ltd., SKY Perfect JSAT Corporation, & ITOCHU Corporation. (2016). *Investigación sobre la Utilización de un Sistema de Comunicación Satélite en la República de Chile*.
- Dr. Sergei Pekhterev. (2021, noviembre). *The Bandwidth Of The StarLink Constellation...and the assessment of its potential subscriber base in the USA*. . <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1026762698>.
- Durairajan, R., Stevens, A., Iradukunda, B., & Bailey, B. (2024). *Can LEO Satellites Enhance the Resilience of Internet to Multi-Hazard Risks?* <https://gitlab.com/onrg/maze>.
- eoportal. (2025, mayo 18). *OneWeb Minisatellite Constellation*. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/oneweb>.
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). *Censo 2024*.
- International Trade Administration. (2023, diciembre 7). *Chile Country Commercial Guide* . International Trade Administration Country Commercial Guide.
- Mark Jackson. (2024, enero 5). *Starlink Test Space Direct to Cell Mobile Data Service to 17Mbps*. <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2024/03/starlink-test-space-direct-to-cell-mobile-data-service-to-17mbps.html>.
- marketgrowthreports. (2025, junio 26). *Hall-Effect Thruster System for Satellite Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Electromagnetic Thrusters, Ion Thrusters, Hall-Effect Drive Systems), By Application (Aerospace, Satellite Communications, Space Exploration, Defense), Regional Insights and Forecast to 2033*. <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/hall-effect-thruster-system-for-satellite-market-113403>.

- Mohamed Abdel Monem. (2019, agosto 6). *Why 15 KHz as 4G Sub-Carrier Spacing?* .
https://moniem--tech-com.translate.google.com/questions/why-15-khz-as-4g-sub-carrier-spacing/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc.
- Pratt, T., & Allnutt, J. (2020). *Satellite Communications Third Edition* (3^a ed.). Wiley.
- Silva Alfonso, & Osses Matías. (2021). *Chile: digital economy developments and challenges during the Covid-19 pandemic, from a TMT law perspective*. International Bar Association.
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2024). *Informe-Final-Subtel-Acceso-y-Uso-Internet-2024*. 1–75.
- Swinford, R., Gertrau, B., & Bestwick, D. (2015). *High Throughput Satellites: Delivering future capacity needs*.
- Viasat. (2025). *How Much Internet Speed You Need To Work From Home 2025*.
<https://www.rsinc.com/how-much-internet-speed-you-need-to-work-from-home-2025.php>.
- Wertz, J. Richard., & Larson, W. J. . (1999). *Space mission analysis and design* (3^a ed.). Microcosm ; Springer.
- Weston, S. V, Burkhard, C. D., Stupl, J. M., Ticknor, R. L., Yost, B. D., Austin, R. A., Galchenko, P., Newman, L. K., & Santos Soto, L. (2025). *State-of-the-Art Small Spacecraft Technology*. <http://www.sti.nasa.gov>

RESULTADO	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	HITO	INICIO DE LA ACTIVIDAD (Indique el mes en que se iniciará la actividad)	DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD (Semanas)	LOGRO DE HITO (Indique la semana en la que se logrará el hito respecto de la duración total del proyecto)	SEMANAS																		
Resultado 1: Formulación y Contextualización del proyecto	Objetivo 1.- Análisis de misiones similares	1.- Revisión Bibliográfica de Arquitecturas de sistemas	Hito 1 - Entrega del primer avance	1	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		2.- Revisión Bibliográfica de sistemas espaciales de comunicación		1	4																				
		3.- Revisión bibliográfica de posibles indicadores de necesidad para el		1	4																				
		4.- Redacción del avance 1		4	2																				
	Objetivo 2.- Cuantificación de necesidad del sistema	1.- Simulación de la necesidad del sistema	Hito 2 - Generación de índice de necesidad del	6	3	9																			
		Objetivo 3.- Caracterización de	2.- Caracterización de sistemas similares	8	1																				
	Objetivo 4.- Simulación de arquitecturas diseñadas	3.- Aproximación de diseño de arquitecturas posibles	Hito 3 - Entrega del segundo avance	8	2	10																			
		4.- Redacción del avance 2	9	2																					
		1.- Planteamiento final sobre los límites operacionales, funcionales y físicos del	10	2																					
		2.- Diseño de las arquitecturas a simular	10	2																					
Resultado 2: Diseño y simulación de las arquitecturas	3.- Simulación de las arquitecturas diseñadas	Hito 4 - Simulación de las arquitecturas	11	4	16																				
	4.- Iteración sobre las arquitecturas simuladas	13	3																						
	Objetivo 5.- Evaluación y comparación de	1.- Análisis y evaluación de los resultados obtenidos de la simulación	Hito 5 - Entrega del informe final	15		3	18																		
	2.- Redacción y entrega del informe final	17	2																						
Resultado 3: análisis y evaluación de resultados y trade-offs																									