



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN COMPUTACIÓN

Despliegue de una arquitectura de comunicaciones inteligentes con SDN para la Infraestructura de Medición avanzada de la Red Eléctrica Chilena

Arturo Ignacio Alvarez Aguilera

Profesor Guía: Ricardo Enrique Pérez Guzmán

Curicó – Chile
Mayo, 2025

Índice general

RESUMEN	VII
1. Diseño de la Propuesta	1
1.1. Contexto	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Propuesta de solución	2
1.4. Trabajo relacionado	3
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo General	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. Alcances	5
3.1. Alcances técnicos	5
3.1.1. Desarrollo de prototipo	5
3.1.2. Simulación del entorno AMI	5
3.1.3. Implementación de módulos de comunicación	6
3.2. Alcances de validación	6
3.2.1. Pruebas en laboratorio	6
3.2.2. Métricas de evaluación	6
3.3. Limitaciones explícitas	7
3.3.1. Integración institucional	7
3.3.2. Escalabilidad	7
3.4. Resultados esperados	7
4. Metodología	8
4.1. Metodologías de desarrollo	8
4.2. Metodologías de evaluación	9
5. Plan de Trabajo	11
5.1. Descripción de etapas del proyecto	11
5.1.1. Fase de Inicio (1 mes)	11
5.1.2. Fase de Elaboración (2 meses)	12
5.1.3. Fase de Construcción (6 meses)	12
5.1.4. Fase de Transición (1 mes)	14

5.1.5.	Cronograma General	15
5.2.	Tareas para Objetivos Específicos	16
5.2.1.	Desarrollo de microservicios con Kubernetes	17
5.2.2.	Integración de algoritmos de control inteligentes	17
5.2.3.	Implementación de políticas de seguridad avanzadas	18
5.2.4.	Implementación del Concentrador de Datos Inteligente (DCU)	18
5.2.5.	Desarrollo de plataforma de monitoreo y gestión basada en Prometheus y Grafana	19
5.2.6.	Implementación de aprendizaje reforzado para QoS adaptativa	19
A.	Protocolos de comunicación	23
A.1.	Power Line Communication (PLC)	23
A.2.	RF-Mesh	23
A.3.	LTE	23
	Glosario	24

Índice de figuras

4.1. Fases e iteraciones del Rational Unified Process. Fuente: <i>A Review of RUP (Rational Unified Process)</i> (2020).	9
5.1. Diagrama de Gantt	16

Índice de cuadros

5.1. Cronograma general del proyecto	15
------------------------------------------------	----

RESUMEN

El sistema eléctrico nacional chileno enfrenta desafíos críticos en su modernización, impulsados por la Ley 21.194 y la necesidad de incorporar energías renovables no convencionales a su matriz energética. La implementación de la infraestructura de medición avanzada (AMI) en la red de distribución (relacionada con los medidores inteligentes), se ve afectada por los altos costos de inversión y operación, además de la limitada adopción de tecnologías inteligentes en telecomunicaciones. Las vulnerabilidades cibernéticas y la limitada capacidad para responder de manera autónoma a las contingencias naturales constituyen retos técnicos importantes para la modernización del sistema eléctrico del país.

Para abordar estos desafíos, se propone el desarrollo de un dispositivo de comunicación basado en Redes Definidas por Software (SDN), capaz de modernizar y optimizar la infraestructura de comunicaciones AMI de la red chilena de medidores inteligentes. El dispositivo actúa como un concentrador de datos inteligente, utilizando un Raspberry Pi industrial (RevPi) como controlador de fog computing y módulos de comunicación certificados para Smart Grids. Cada elemento se configura para adaptarse a los protocolos de comunicación predominantes en la red de distribución chilena como Power Line Communication (PLC) y radiofrecuencia (RF-Mesh).

En caso de fallas del sistema eléctrico, o de comunicaciones, la arquitectura SDN facilita el aislamiento automático de nodos comprometidos, reduciendo la pérdida de paquetes y notificando en tiempo real la localización de la falla. Además, el dispositivo permitirá gestionar políticas de seguridad avanzadas como zero trust, mejorar la calidad de servicio (QoS) y optimizar la comunicación entre los dispositivos en la red. Estas mejoras incrementan la disponibilidad de los datos para las empresas distribuidoras, mejoran la experiencia de los usuarios finales y ofrecen una perspectiva en tiempo real de cada sector gracias a la implementación integrada de autenticación mutua, priorización inteligente del tráfico y capacidades de procesamiento distribuido en tiempo real.

Capítulo 1

Diseño de la Propuesta

1.1. Contexto

La evolución del sistema eléctrico nacional chileno hacia un modelo energético descentralizado y renovable requiere una modernización importante en la red de distribución y el despliegue de la AMI, esencial para la sostenibilidad y diversificación de la matriz energética. Sin embargo, su desarrollo se ve significativamente obstaculizado por problemas técnicos y tecnológicos que limitan su efectividad y escalabilidad. Uno de los principales desafíos es el elevado costo asociado tanto a la inversión inicial como a la operación continua de esta infraestructura.

Según datos actualizados de la Comisión Nacional de Energía (CNE), la implementación de la AMI en Chile representa una inversión estimada de US\$1.000 millones para el recambio de 6.5 millones de medidores [3], [9]. De ese monto, los sistemas de comunicación constituyen entre el 20 % y 30 % del total, incluyendo antenas y repetidoras (US\$120–180 millones), software de gestión (US\$2–15 millones) y redes de comunicación (US\$40–60 millones) [8]. Por otro lado, el mantenimiento anual representa entre el 15 % y 20 % del costo inicial [8], lo que incrementa significativamente el gasto operativo a largo plazo. Estos altos costos se trasladan directamente a los usuarios finales, resultando en un aumento aproximado del 5 % en las tarifas eléctricas, según informes de [4].

La dispersión geográfica de la población chilena, con centros urbanos concentrados y extensas zonas rurales, incrementa la complejidad y el costo del despliegue de las redes de comunicación robustas para soportar la AMI a nivel nacional. Este desafío quedó en evidencia durante el apagón masivo del 25 de febrero de 2025, donde fallas en la línea de transmisión de 500 kV entre Vallenar y Coquimbo provocaron un colapso en cadena que dejó sin electricidad al 90 % del país, afectando servicios críticos como el transporte, telecomunicaciones y el suministro de agua [5] [11].

Durante el apagón, los sistemas de monitoreo en tiempo real colapsaron, dejando a los operadores sin datos para gestionar la crisis [5], mientras los usuarios reportaban hasta 15 horas sin energía en zonas rurales [2]. Aunque el sistema SCADA proporcionaba visibilidad parcial de las zonas afectadas, los operadores tuvieron que reconectar manualmente esos sectores mediante llamadas telefónicas ante la incapacidad de ejecutar comandos automatizados, ya que los protocolos de reactivación fallaron en 17 intentos consecutivos. Esta dependencia

de métodos análogos se hizo evidente cuando Enel Distribución Chile coordinó por teléfono la activación de generadores para 2,602 pacientes electrodependientes [7], mientras el 62 % de las subestaciones claves seguían operando con GSM (Global System for Mobile Communications), tecnología que colapsó durante las primeras horas del apagón por saturación de la red móvil.

1.2. Descripción del problema

El problema que aborda esta propuesta se centra en las insuficiencias de la infraestructura de comunicaciones de la red de distribución eléctrica para soportar la creciente integración de fuentes de generación distribuida y la implementación masiva de medidores inteligentes en Chile, mandatadas por las leyes 21.194 y 21.076 respectivamente.

A pesar de que el gobierno aplazó la obligatoriedad de la instalación de medidores inteligentes hasta el 2027, existe un desafío crítico en la modernización de la red de distribución relacionado con la infraestructura y el incremento de la inteligencia y seguridad del sistema eléctrico nacional. Este problema impacta directamente al 100 % de los hogares chilenos, representando un mercado significativo para las empresas distribuidoras de energía.

La masificación de los medidores se ha visto frenada por diferentes preocupaciones relacionadas a posibles aumentos tarifarias, desconfianza en las mediciones y temores sobre la privacidad de los datos y el incremento del consumo. Por otro lado, existe una percepción generalizada de que estos medidores benefician principalmente a las empresas eléctricas, sin un claro beneficio para los usuarios en términos de reducción de costos o mejora del servicio.

La meta de 6.5 millones de medidores inteligentes para el periodo 2025-2027 (definida por la Ley 21.076) intensifica la necesidad de una infraestructura robusta y eficiente, capaz de responder a las inquietudes de la ciudadanía a través de beneficios tangibles y transparentes para todos los actores del sistema.

1.3. Propuesta de solución

La solución propuesta para modernizar la infraestructura AMI en Chile se centra en el desarrollo de un Concentrador de Datos Inteligente (DCU) que integra de manera innovadora Redes Definidas por Software (SDN), fog computing, algoritmos de control inteligentes y un conjunto de microservicios orquestados por Kubernetes.

El DCU, basado en un controlador industrial RevPi y módulos de comunicación certificados (IEC 61131-2, EMC IEC 61000-6-4 e IEC 61000-6-2, IEEE 61850), se posiciona como una alternativa innovadora y de alto impacto frente a las soluciones existentes, ofreciendo ventajas sustanciales en términos de costo, seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

A diferencia de los DCUs tradicionales como el DiMEC-P PLC de DISCAR [12], Itron y Landis+Gyr [6], caracterizados por arquitecturas propietarias, elevados costos (entre 2 y 15 millones de CLP cotizados de forma personalizada según los requerimientos técnicos) y funcionalidades fijas; la propuesta se distingue por una arquitectura SDN, basada en software y hardware abierto, que permite programar y reconfigurar dinámicamente la red AMI, adaptándola en tiempo real a las necesidades específicas de cada despliegue y a las condiciones del tráfico.

Esta flexibilidad permite la integración de diversos protocolos de comunicación (PLC, RF-Mesh, LTE, entre otros), optimiza el flujo de datos, favorece la implementación de políticas para priorizar información crítica y posibilita una gestión distribuida y eficiente de la red, superando las limitaciones y la rigidez de las soluciones convencionales.

1.4. Trabajo relacionado

La tesis doctoral de Ricardo Enrique Pérez Guzmán, titulada «Mejoras en la Resiliencia de las Microrredes Jerárquicas con FCS-MPC y Redes Definidas por Software» (abril 2024) [10], aporta un marco integral para el control y la gestión de microrredes que resulta directamente aplicable al diseño de nuestro Concentrador de Datos Inteligente. En primer lugar, introduce un innovador entorno de co-simulación que integra MATLAB/Simulink y GNS3, permitiendo simular de manera conjunta el comportamiento eléctrico y de comunicaciones en un único escenario. Sobre esta base se valida una estrategia de control secundario distribuido, que combina FCS-MPC con un plano SDN para el intercambio de señales P-f y Q-V, logrando mejoras en la confiabilidad del sistema y en la respuesta dinámica ante perturbaciones.

En un segundo bloque, la tesis aborda las deficiencias de los controladores monolíticos mediante el diseño e implementación de una arquitectura de microservicios orquestada con Kubernetes en Raspberry Pi. Este enfoque demuestra ventajas claras en cuanto a despliegue ágil, portabilidad, tolerancia a fallos y recuperación rápida, aspectos clave para sistemas distribuidos de comunicaciones en la AMI. Finalmente, se presenta un esquema experimental de restauración de voltaje y frecuencia en microrredes aisladas, basado en un control droop reforzado por predicción de datos y SDN; los resultados muestran una regulación eficaz bajo diversas condiciones adversas. Estos tres ejes co-simulación integrada, microservicios en el borde y control predictivo SDN asistido constituyen el pilar teórico y práctico que inspira el desarrollo y la validación de nuestra propuesta.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar un dispositivo de comunicación basado en Redes Definidas por Software (SDN) que modernice y optimice la infraestructura de comunicaciones AMI de la red chilena de medidores inteligentes, mejorando la calidad de servicio (QoS), la seguridad y la eficiencia en la transmisión de datos.

2.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar microservicios orquestados por Kubernetes para gestionar la comunicación entre los dispositivos de la red.
- Integrar algoritmos de control inteligentes para optimizar la gestión del tráfico y la priorización de datos críticos.
- Implementar políticas de seguridad avanzadas, como zero trust, para proteger la infraestructura de comunicaciones.
- Implementar un Concentrador de Datos Inteligente (DCU) basado en un controlador industrial RevPi y módulos de comunicación certificados para Smart Grids.
- Proporcionar una plataforma de monitoreo y gestión en tiempo real de la infraestructura AMI, mejorando la experiencia del usuario final y la disponibilidad de datos para las empresas distribuidoras.
- Implementar aprendizaje reforzado para optimizar la gestión de la red y mejorar la calidad de servicio (QoS) adaptativa.

Capítulo 3

Alcances

El presente proyecto de memoria se enfoca en el desarrollo y validación de un prototipo funcional de un Concentrador de Datos Inteligente (DCU) basado en Redes Definidas por Software (SDN) para optimizar las comunicaciones en la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI). A continuación, se detallan los alcances específicos que delimitan el trabajo a realizar:

3.1. Alcances técnicos

3.1.1. Desarrollo de prototipo

El proyecto contempla el desarrollo de un prototipo funcional utilizando exclusivamente dispositivos Revolution Pi (RevPi) como plataforma de hardware, sin realizar despliegues en infraestructura real de distribución eléctrica. Este prototipo permitirá validar conceptualmente la arquitectura propuesta, sin necesidad de integración con sistemas operacionales de empresas distribuidoras de energía.

3.1.2. Simulación del entorno AMI

Se implementará un entorno de simulación controlado que emule las condiciones de una red AMI típica con hasta 20 medidores virtuales. Este entorno permitirá probar las funcionalidades del sistema sin requerir acceso directo a la infraestructura eléctrica nacional, utilizando herramientas como:

- Emulación de tráfico AMI basado en los protocolos PLC, RF-Mesh y LTE.
- Simulación de escenarios de contingencia en la red (pérdida de conexión, sobrecarga, eventos críticos).
- Generación sintética de datos que representen lecturas de medidores inteligentes típicos del mercado chileno.

3.1.3. Implementación de módulos de comunicación

El proyecto abordará la integración de módulos de comunicación compatibles con RevPi para los principales protocolos utilizados en la AMI chilena (PLC, RF-Mesh, LTE), mediante:

- Configuración y adaptación de módulos comerciales certificados compatibles con RevPi.
- Desarrollo de interfaces software para la comunicación entre los módulos y la arquitectura SDN.
- Implementación de drivers para la traducción de protocolos entre los diferentes estándares de comunicación.

Sin embargo, no se contempla el desarrollo de hardware específico ni la modificación física de los dispositivos existentes más allá de su interconexión.

3.2. Alcances de validación

3.2.1. Pruebas en laboratorio

Todas las pruebas se realizarán en un entorno controlado de laboratorio, utilizando la siguiente infraestructura:

- Red local aislada para las pruebas de comunicación.
- Equipamiento RevPi configurado específicamente para el proyecto.
- Simuladores de carga y tráfico para emular condiciones reales de operación.

No se contempla la instalación de equipos en campo ni pruebas en infraestructura real de distribución eléctrica.

3.2.2. Métricas de evaluación

La evaluación del prototipo se centrará en métricas técnicas específicas que puedan medirse en el entorno de laboratorio:

- Latencia en la transmisión de datos entre nodos de la red.
- Capacidad de procesamiento y throughput bajo diferentes condiciones de carga.
- Tiempos de respuesta ante eventos simulados de contingencia.
- Eficacia de las políticas de seguridad implementadas frente a vectores de ataque comunes.
- Rendimiento de los algoritmos de aprendizaje reforzado en la optimización de QoS.

3.3. Limitaciones explícitas

3.3.1. Integración institucional

El proyecto no contempla:

- Coordinación directa con empresas distribuidoras de energía eléctrica.
- Integración con sistemas SCADA o DMS (Distribution Management System) reales.
- Validación de conformidad con políticas específicas de cada operador de red.
- Gestión de permisos o autorizaciones para pruebas en infraestructura eléctrica operativa.

3.3.2. Escalabilidad

El prototipo se diseñará considerando los principios de escalabilidad, pero las pruebas se limitarán a un entorno reducido que no superará:

- 20 nodos virtuales simulados.
- 5 dispositivos RevPi físicos interconectados.
- 3 protocolos de comunicación diferentes implementados simultáneamente.

Esta limitación permite validar los conceptos fundamentales de la arquitectura propuesta mientras se mantiene la viabilidad del proyecto dentro del marco académico.

3.4. Resultados esperados

Al finalizar el proyecto, se espera contar con:

- Un prototipo funcional del Concentrador de Datos Inteligente basado en SDN implementado en plataforma RevPi.
- Documentación técnica detallada de la arquitectura, implementación y resultados de las pruebas realizadas.
- Validación cuantitativa de las mejoras en rendimiento, seguridad y eficiencia frente a las soluciones tradicionales.
- Recomendaciones para una potencial fase futura de implementación en entornos reales.

Este enfoque permite validar la viabilidad técnica de la solución propuesta dentro de un entorno académico controlado, estableciendo las bases para posibles implementaciones futuras en infraestructura real de distribución eléctrica, sujetas a las coordinaciones pertinentes con las entidades del sector.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Metodologías de desarrollo

Para guiar el desarrollo del presente proyecto se utilizó la metodología **Rational Unified Process (RUP)**, una metodología ágil estructurada que permite gestionar proyectos de software de manera iterativa e incremental. Aunque fue concebida para grandes organizaciones, RUP puede adaptarse fácilmente a proyectos realizados por equipos pequeños, como es el caso de este trabajo de memoria, manteniendo un enfoque disciplinado pero flexible.

RUP divide el proceso en cuatro fases: *inicio*, *elaboración*, *construcción* y *transición*, abarcando múltiples disciplinas del desarrollo —como análisis, diseño, implementación y pruebas— con distinta intensidad en cada etapa. Esta organización favorece la evolución progresiva del sistema mediante iteraciones controladas [1].

La metodología fue especialmente adecuada considerando que el proyecto contempla el despliegue de una arquitectura crítica basada en SDN, donde la validación continua, la trazabilidad de decisiones y la documentación estructurada son esenciales. Mediante ciclos iterativos se avanzó desde prototipos iniciales hasta escenarios de prueba funcionales.

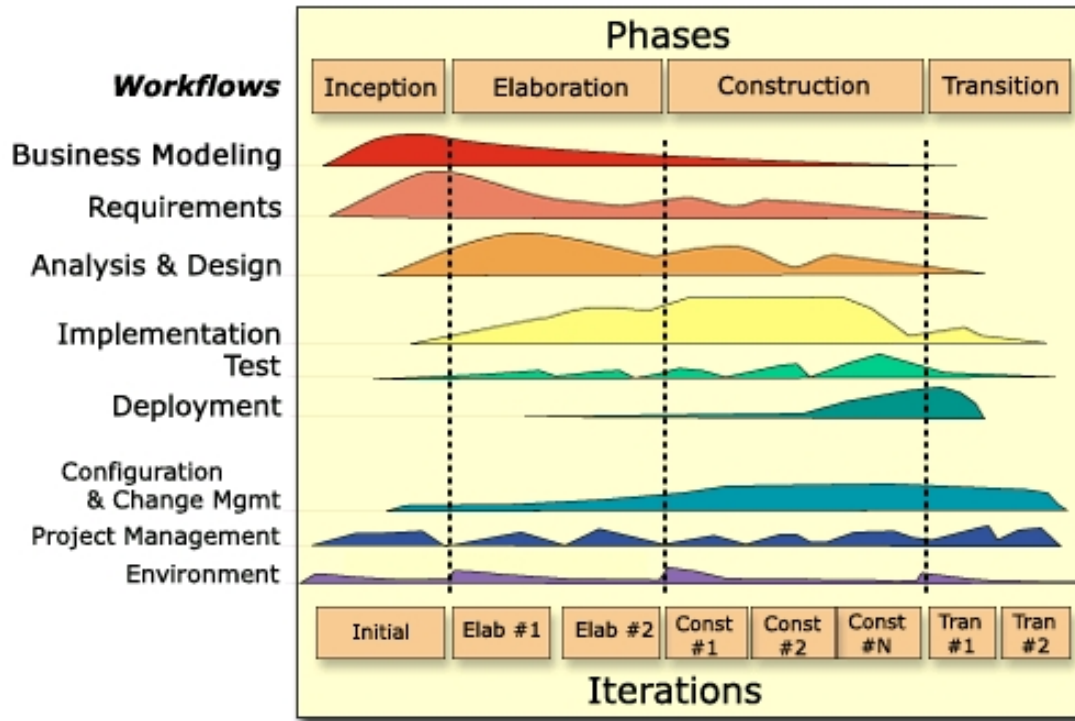


Figura 4.1: Fases e iteraciones del Rational Unified Process. Fuente: *A Review of RUP (Rational Unified Process)* (2020).

4.2. Metodologías de evaluación

Para validar el correcto funcionamiento y desempeño del Concentrador de Datos Inteligente (DCU), se utilizarán las siguientes metodologías de evaluación, todas realizadas en el laboratorio sobre dispositivos RevPi:

- **Pruebas funcionales** Se llevará a cabo un conjunto de pruebas de caja negra que verifiquen cada uno de los features del DCU (configuración SDN, orquestación de microservicios, generación de métricas, detección de anomalías).
- **Simulación de comunicaciones** Empleo de GNS3 para simular enlaces PLC y RF-Mesh, permitiendo reproducir condiciones de red adversas (pérdida de paquetes, retrasos) sin requerir hardware de campo.
- **Medición de rendimiento** Uso de Prometheus y Grafana para recopilar y visualizar métricas clave:
 - Latencia end-to-end en la reconfiguración de flujos.
 - Throughput de datos bajo diferentes cargas de tráfico.
 - Tiempo de recuperación tras la simulación de fallos en enlaces o nodos.

- **Pruebas de resiliencia** Escenarios de fallo inducido (corte de enlaces, reinicio de RevPi) para comprobar la capacidad de aislamiento y reconvergencia automática de la red definida por software.
- **Validación de seguridad** Implementación de microsegmentación y autenticación mutua (zero trust) en el laboratorio, evaluando la resistencia ante intentos de intrusión y la correcta separación de dominios de comunicación.

Capítulo 5

Plan de Trabajo

5.1. Descripción de etapas del proyecto

El proyecto se organiza siguiendo las cuatro fases principales del modelo Rational Unified Process (RUP): inicio, elaboración, construcción y transición. Cada fase está diseñada para abordar aspectos específicos del desarrollo, permitiendo una evolución progresiva y controlada del sistema. A continuación, se describe detalladamente cada etapa, especificando sus objetivos, actividades principales, entregables y criterios de evaluación.

5.1.1. Fase de Inicio (1 mes)

La fase de inicio establece los fundamentos del proyecto y define su viabilidad técnica y económica. Durante esta etapa se define el alcance del sistema, se identifican los principales riesgos y se planifica la estructura general del proyecto.

Actividades principales:

- Análisis del contexto regulatorio chileno referente a la implementación de AMI.
- Estudio de la infraestructura actual de comunicaciones en la red eléctrica chilena.
- Identificación de partes interesadas (stakeholders) y recopilación de requisitos iniciales.
- Evaluación preliminar de tecnologías SDN adaptables al contexto AMI.
- Establecimiento de métricas de éxito y criterios de aceptación del proyecto.

Entregables:

- Documento de visión del proyecto.necesarios.

Criterios de finalización:

- Acuerdo entre los stakeholders sobre el alcance y objetivos del proyecto.
- Validación preliminar de la viabilidad técnica de la solución propuesta.

5.1.2. Fase de Elaboración (2 meses)

La fase de elaboración profundiza en la comprensión del problema y establece la arquitectura base del sistema. Durante esta etapa se refinan los requisitos y se elabora un diseño detallado que servirá como base para la implementación.

Actividades principales:

- Análisis detallado de requisitos funcionales y no funcionales del sistema.
- Diseño de la arquitectura del Concentrador de Datos Inteligente (DCU) basado en SDN.
- Definición detallada de la arquitectura de microservicios y su orquestación con Kubernetes.
- Diseño de la infraestructura de seguridad basada en el modelo zero trust.
- Modelado de la arquitectura SDN y los flujos de comunicación.
- Selección definitiva de componentes hardware (RevPi y módulos de comunicación).

Entregables:

- Documento de arquitectura del sistema.
- Diagramas UML esenciales (componentes y despliegue).
- Especificaciones técnicas del hardware seleccionado.

Criterios de finalización:

- Estabilización de la arquitectura base.
- Aprobación del diseño propuesto por el profesor guía.

5.1.3. Fase de Construcción (6 meses)

La fase de construcción constituye el núcleo del desarrollo, donde se implementan los componentes del sistema según la arquitectura definida en la fase anterior. Esta etapa se organiza en dos iteraciones principales que permiten validar progresivamente la funcionalidad.

Fase de Construcción I: Infraestructura base, comunicaciones y seguridad (3 meses)

En esta primera etapa de construcción se implementarán los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar microservicios orquestados por Kubernetes para gestionar la comunicación entre los dispositivos de la red.
- Integrar algoritmos de control inteligentes para optimizar la gestión del tráfico y la priorización de datos críticos.

- Implementar políticas de seguridad avanzadas, como zero trust, para proteger la infraestructura de comunicaciones.

Actividades principales:

- Configuración del entorno de desarrollo y CI/CD.
- Implementación del núcleo SDN y configuración inicial de Open vSwitch.
- Desarrollo de microservicios básicos de gestión de dispositivos y flujos.
- Implementación de algoritmos de clasificación de tráfico y priorización.
- Desarrollo del sistema de detección de anomalías.
- Integración de políticas de seguridad zero trust.
- Pruebas unitarias y de integración de los componentes desarrollados.

Entregables:

- Repositorio de código con los microservicios implementados.
- Informe de pruebas unitarias y de integración.
- Demostración funcional de la infraestructura de comunicaciones.

Fase de Construcción II: Implementación del DCU, monitoreo y aprendizaje reforzado (3 meses)

En esta segunda etapa de construcción se implementarán los siguientes objetivos específicos:

- Implementar un Concentrador de Datos Inteligente (DCU) basado en un controlador industrial RevPi y módulos de comunicación certificados para Smart Grids con SDN.
- Proporcionar una plataforma de monitoreo y gestión en tiempo real de la infraestructura AMI, mejorando la experiencia del usuario final y la disponibilidad de datos para las empresas distribuidoras.
- Implementar aprendizaje reforzado para optimizar la gestión de la red y mejorar la calidad de servicio (QoS) adaptativa.

Actividades principales:

- Integración del controlador RevPi con la arquitectura SDN desarrollada.
- Implementación completa de la plataforma de monitoreo Prometheus/Grafana.
- Desarrollo de dashboards y sistemas de alertas.
- Implementación del sistema de aprendizaje reforzado para QoS adaptativa.

- Integración de todos los componentes en el prototipo final del DCU.
- Pruebas de sistema en entorno controlado.

Entregables:

- Prototipo funcional del Concentrador de Datos Inteligente (DCU).
- Plataforma de monitoreo implementada con dashboards operativos.
- Documentación técnica de implementación.

Criterios de finalización de la fase de construcción:

- Implementación completa de todas las funcionalidades definidas.
- Superación de las pruebas de rendimiento y calidad establecidas.
- Estabilidad del sistema en entornos controlados.

5.1.4. Fase de Transición (1 mes)

La fase de transición prepara el sistema para su evaluación final, realizando pruebas en condiciones simuladas y ajustando los aspectos necesarios para garantizar su correcta operación.

Actividades principales:

- Implementación de prueba piloto en entorno controlado.
- Monitorización y análisis de rendimiento en condiciones simuladas.
- Ajustes y optimizaciones finales del sistema.
- Elaboración de la documentación final del proyecto.
- Preparación de la defensa de memoria.

Entregables:

- Sistema completo validado en entorno controlado.
- Memoria técnica completa del proyecto.
- Presentación para defensa de memoria.

Criterios de finalización:

- Cumplimiento o superación de las métricas de rendimiento establecidas.
- Documentación completa y revisada del sistema.
- Aprobación final del profesor guía.

5.1.5. Cronograma General

El proyecto tiene una duración total estimada de 10 meses, cubriendo el año académico 2025:

Fase	Duración	Fechas estimadas
Inicio	1 mes	Marzo 2025
Elaboración	2 meses	Abril 2025 - Mayo 2025
Construcción I	3 meses	Junio 2025 - Agosto 2025
Construcción II	3 meses	Septiembre 2025 - Noviembre 2025
Transición	1 mes	Diciembre 2025

Cuadro 5.1: Cronograma general del proyecto

Este cronograma se ajusta al período académico y permite completar el proyecto dentro del año 2025, considerando la complejidad técnica del desarrollo y los objetivos planteados. La distribución de las fases permite abordar de manera secuencial y lógica los diferentes aspectos del sistema, priorizando la implementación de los componentes más críticos en las primeras etapas de la construcción.

Fase	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Fase de Inicio										
Documento de visión del proyecto.										
Fase de Elaboración										
Documento de arquitectura del sistema										
Diagramas UML esenciales										
Especificaciones técnicas del hardware seleccionado										
Fase de Construcción I										
Desarrollar microservicios orquestados por Kubernetes para gestionar la comunicación entre los dispositivos de la red										
Integrar algoritmos de control inteligentes para optimizar la gestión del tráfico y la priorización de datos críticos										
Implementar políticas de seguridad avanzadas, como zero trust, para proteger la infraestructura de comunicaciones										
Fase de Construcción II										
Implementar un Concentrador de Datos Inteligente (DCU) basado en un controlador industrial RevPi y módulos de comunicación certificados para Smart Grids con SDN.										
Proporcionar una plataforma de monitoreo y gestión en tiempo real de la infraestructura AMI, mejorando la experiencia del usuario final y la disponibilidad de datos para las empresas distribuidoras.										
Implementar aprendizaje reforzado para optimizar la gestión de la red y mejorar la calidad de servicio (QoS) adaptativa.										
Fase de Transición										
Sistema completo validado en entorno controlado										
Documento de Memoria										

Figura 5.1: Diagrama de Gantt

5.2. Tareas para Objetivos Específicos

A continuación, se detallan las tareas concretas para cada uno de los objetivos específicos del proyecto, estableciendo una hoja de ruta clara para la implementación y validación de la solución propuesta.

5.2.1. Desarrollo de microservicios con Kubernetes

Para desarrollar los microservicios orquestados por Kubernetes que gestionarán la comunicación entre los dispositivos de la red, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

1. Diseño de la arquitectura de microservicios

- Identificar los componentes funcionales y sus interdependencias.
- Definir interfaces de comunicación y contratos API utilizando OpenAPI 3.0.
- Elaborar diagrama de despliegue y comunicación entre microservicios.

2. Implementación de microservicios core

- Desarrollar microservicio de descubrimiento y registro de dispositivos.
- Implementar microservicio de gestión de flujos SDN.
- Crear microservicio de recolección y procesamiento de métricas.
- Implementar microservicio de logging centralizado y auditoría.

3. Adaptación de Kubernetes para entornos embebidos

- Configurar K3s o MicroK8s optimizado para recursos limitados.
- Implementar mecanismos de almacenamiento persistente adaptados al hardware industrial.
- Configurar políticas de QoS para garantizar recursos a servicios críticos.

4. Integración con infraestructura AMI

- Crear conectores para sistemas SCADA y DMS (Distribution Management System).

5.2.2. Integración de algoritmos de control inteligentes

Para integrar algoritmos de control inteligentes que optimicen la gestión del tráfico y la priorización de datos críticos, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

1. Desarrollo de modelos de clasificación de tráfico

- Implementar clasificador basado en aprendizaje supervisado para identificar tipos de tráfico AMI.
- Realizar entrenamiento y validación con datasets representativos de la red.

2. Desarrollo de sistema de detección de anomalías

- Implementar algoritmos de detección basados en modelos estadísticos y aprendizaje no supervisado.

3. Validación y ajuste de algoritmos

- Diseñar escenarios de prueba representativos con patrones de tráfico realistas.
- Realizar análisis de rendimiento comparativo con estrategias de control tradicionales.
- Documentar métricas de mejora en latencia, throughput y tasa de pérdida de paquetes.

5.2.3. Implementación de políticas de seguridad avanzadas

Para implementar políticas de seguridad avanzadas basadas en el modelo zero trust para proteger la infraestructura de comunicaciones, se realizarán las siguientes tareas:

1. Diseño de arquitectura de seguridad zero trust

- Definir perímetros de seguridad y microsegmentación de la red.
- Establecer modelo de control de acceso basado en identidad y contexto.
- Diseñar arquitectura de autenticación mutua entre todos los componentes.

2. Implementación de monitoreo de seguridad continuo

- Desarrollar sistema de detección de intrusiones (IDS) para tráfico específico de AMI.
- Implementar registro inmutable de eventos de seguridad.
- Crear mecanismo de alerta temprana ante comportamientos sospechosos.

5.2.4. Implementación del Concentrador de Datos Inteligente (DCU)

Para implementar el Concentrador de Datos Inteligente basado en un controlador industrial RevPi con SDN y módulos de comunicación certificados, se realizarán las siguientes tareas:

1. Análisis y selección de componentes hardware

- Evaluar diferentes modelos de Revolution Pi (RevPi Core, Connect o Compact) según requerimientos de procesamiento y conectividad.
- Seleccionar módulos de comunicación certificados compatibles con los protocolos PLC, RF-Mesh y LTE más utilizados en la red chilena.

2. Diseño e implementación de la arquitectura SDN

- Implementar Open vSwitch como switch virtual compatible con OpenFlow 1.5.
- Desarrollar un controlador SDN ligero basado en Ryu, uONOS u OpenDayLight adaptado a las limitaciones de recursos del RevPi.
- Diseñar y documentar la topología de red virtual, identificando los puntos de integración con la infraestructura existente.

3. Validación del prototipo hardware

- Validar el cumplimiento de certificaciones para equipos de automatización industrial.

5.2.5. Desarrollo de plataforma de monitoreo y gestión basada en Prometheus y Grafana

Para proporcionar una plataforma de monitoreo y gestión en tiempo real de la infraestructura AMI utilizando Prometheus y Grafana como tecnologías centrales, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

1. Implementación de Prometheus como sistema de monitoreo

- Configurar instancia de Prometheus optimizada para entornos edge con recursos limitados.
- Implementar exporters personalizados para métricas específicas de AMI y protocolos de comunicación.
- Configurar service discovery para el registro automático de medidores y concentradores.

2. Desarrollo de dashboards y visualizaciones en Grafana

- Diseñar dashboards operativos con métricas clave de rendimiento de la infraestructura AMI.
- Crear paneles específicos para monitoreo de calidad de servicio (QoS) de comunicaciones.

3. Implementación de alertas y notificaciones

- Implementar integración con sistemas de notificación (correo electrónico, SMS, plataformas de mensajería).
- Implementar sistema de escalado de alertas basado en gravedad y tiempo de resolución.

5.2.6. Implementación de aprendizaje reforzado para QoS adaptativa

Para implementar el aprendizaje reforzado que optimice la gestión de la red y mejore la calidad de servicio (QoS) adaptativa, se realizarán las siguientes tareas:

1. Definición del modelo de aprendizaje reforzado

- Identificar estados, acciones y recompensas relevantes para el entorno AMI.
- Diseñar arquitectura de red neuronal adaptada a las restricciones computacionales.

- Desarrollar simulador del entorno para entrenamiento acelerado.

2. Implementación del algoritmo de aprendizaje

- Desarrollar agente basado en Deep Q-Network (DQN) o Policy Gradient según evaluación preliminar.

3. Entrenamiento y optimización del modelo

- Generar dataset inicial con patrones de tráfico representativos de la red chilena.
- Realizar entrenamiento distribuido en múltiples nodos para acelerar el proceso.

4. Integración con el controlador SDN

- Desarrollar interfaz entre el agente entrenado y el controlador SDN.

5. Validación y ajuste continuo

- Definir métricas de evaluación específicas para QoS en entorno AMI.
- Implementar monitoreo continuo del desempeño del algoritmo.

Las tareas descritas establecen una hoja de ruta completa para la implementación de cada objetivo específico, considerando tanto los aspectos técnicos como los metodológicos. La secuencia propuesta sigue un enfoque incremental e iterativo, alineado con la metodología RUP seleccionada para el proyecto, permitiendo validaciones tempranas y ajustes progresivos a medida que se avanza en el desarrollo.

Bibliografía

- [1] Ashraf Anwar. A review of rup (rational unified process). *International Journal of Software Engineering (IJSE)*, 5(2):12–19, 2014.
- [2] BBC News. Chile power cut: ‘we were trapped like sardines in the dark.’. <https://www.bbc.com/news/articles/c3w182z9868o>, 2025. Accessed: Mar. 06, 2025.
- [3] CIPER Chile. Instalarán nuevos ‘medidores inteligentes’ de electricidad: el costo de us\$1.000 millones será asumido por clientes. Technical report, CIPER Chile, Santiago, Chile, 2019. Accessed: Feb. 19, 2025.
- [4] CIPER Chile. El hoyo negro que alumbraron los medidores inteligentes: las súper ganancias que la ley le asegura a las eléctricas. <https://www.ciperchile.cl/2019/03/29/el-hoyo-negro-que-alumbraron-los-medidores-inteligentes-las-super-ganancias-que-la-ley-le-asegura-a-las-electricas/>, 2019. Accessed: Mar. 10, 2025.
- [5] CNN. State of emergency declared after blackout plunges most of chile into darkness. <https://edition.cnn.com/2025/02/25/americas/chile-blackout-14-regions-intl-latam/index.html>, 2025. Accessed: Mar. 06, 2025.
- [6] Discar Metering. Medidores tecnología plc mesh para entornos urbanos. https://www.discar.com/?page_id=22, 2025. Accessed: Feb. 22, 2025.
- [7] Enel Chile. Statement. <https://www.enel.cl/en/meet-enel/media/press-enel-distribucion/d2025-02/statement-2602>, 2025. Accessed: Mar. 06, 2025.
- [8] GTD Ingeniería. Estudio de medidores inteligentes y su impacto en tarifas. informe final. Technical report, GTD Ingeniería, Chile, 2025. Accessed: Feb. 14, 2025.
- [9] Huichalaf.cl. Qué son los medidores eléctricos inteligentes y qué otros costos tienen asociados. Technical report, Huichalaf.cl, Chile, 2025. Accessed: Feb. 19, 2025.
- [10] Ricardo Perez Guzman. *Mejoras en la Resiliencia de las Microrredes Jerárquicas con FCS-MPC y Redes Definidas por Software*. PhD thesis, Universidad de Talca, April 2024. Tesis doctoral.
- [11] pv magazine International. Chile reels from impact of massive power outage. <https://www.pv-magazine.com/2025/03/04/chile-reels-from-impact-of-massive-power-outage/>, 2025. Accessed: Mar. 06, 2025.

- [12] Revolution Pi. The industrial raspberry pi - revolution pi. <https://revolutionpi.com/en>, 2025. Accessed: Feb. 17, 2025.

Apéndice A

Protocolos de comunicación

A.1. Power Line Communication (PLC)

La comunicación por línea de potencia (PLC) es una tecnología que permite la transmisión de datos a través de las líneas eléctricas existentes. Esta tecnología es especialmente útil en entornos donde la instalación de nuevas infraestructuras de comunicación es costosa o impracticable. En el contexto de la infraestructura de medición avanzada (AMI), el PLC se utiliza para conectar medidores inteligentes y otros dispositivos a la red eléctrica, facilitando la recopilación y transmisión de datos en tiempo real.

A.2. RF-Mesh

La red de malla de radiofrecuencia (RF-Mesh) es una tecnología de comunicación inalámbrica que permite la interconexión de dispositivos a través de una red descentralizada. En el contexto de la infraestructura de medición avanzada (AMI), las redes RF-Mesh son utilizadas para conectar medidores inteligentes y otros dispositivos a la red eléctrica, facilitando la recopilación y transmisión de datos en tiempo real. Esta tecnología es especialmente útil en entornos donde la instalación de nuevas infraestructuras de comunicación es costosa o impracticable.

A.3. LTE

La tecnología LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicación inalámbrica de alta velocidad que se utiliza en redes móviles. En el contexto de la infraestructura de medición avanzada (AMI), LTE se utiliza para conectar medidores inteligentes y otros dispositivos a la red eléctrica, facilitando la recopilación y transmisión de datos en tiempo real. Esta tecnología es especialmente útil en entornos donde la instalación de nuevas infraestructuras de comunicación es costosa o impracticable.

Glosario

AMI Infraestructura de Medición Avanzada

DCU Concentrador de Datos Inteligente (Data Concentration Unit)

PLC Power Line Communication

QoS Calidad de Servicio (Quality of Service)

RF-Mesh Radio Frequency Mesh Network

RevPi Revolution Pi (Raspberry Pi industrial)

SDN Redes Definidas por Software (Software Defined Networks)