



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA TECNOLÓGICO PARA
INVERNADEROS EN LA COMUNIDAD JOSÉ PAINECURA
HUEÑALIHUEN.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

OSCAR FELIPE POBLETE MANZANO

PROFESORA GUÍA:
DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

PROFESOR CO-GUÍA:
JUAN IGNACIO HUIRCAN QUILAQUEO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROSA MEDINA DURAN
CARLOS MUÑOZ POBLETE
ÁLVARO SILVA MADRID

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
ISCI ANID PIA/PUENTE AFB220003, SERC-Chile ANID/FONDAP/1522A0006
ANID/FONDECYT 1220507

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
ELÉCTRICO
POR: OSCAR FELIPE POBLETE MANZANO
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA TECNOLÓGICO PARA INVERNADEROS EN LA COMUNIDAD JOSÉ PAINECURA HUEÑALIHUEN.

Este trabajo consiste en el diseño y la realización de talleres participativos, un sistema tecnológico y un controlador para regular el riego en invernaderos, con estudiantes de dos escuelas rurales indígenas de la comunidad José Painecura Hueñalihuen, comuna de Carahue, Región de la Araucanía. El objetivo de este trabajo de título es realizar talleres participativos para co-diseñar e implementar un sistema tecnológico en invernaderos de estas dos escuelas. Estas actividades permiten que los y las estudiantes se familiaricen con los conceptos relacionados con la tecnología y el trabajo en invernaderos, fomentando así su conocimiento y experiencia en estos campos. Luego, se realiza un estudio de los principales trabajos ya realizados de invernaderos inteligentes, junto con proyectos en comunidades indígenas del área *Internet Of Things* y energías renovables. Se presenta el diseño del sistema tecnológico implementado en los invernaderos, que incluye un controlador difuso basado en reglas, el cual tiene el objetivo de automatizar el riego en los invernaderos, controlando así variables del micro-clima como humedad de suelo. El controlador es desarrollado utilizando sensores y actuadores para el monitoreo de las variables del micro-clima, junto con accionar actuadores que son capaces de regar los cultivos. Por último, se presentan los resultados, las principales conclusiones y el trabajo a futuro.

*Bendita sea la ignorancia, que nos muestra
el error y el aprendizaje al mismo tiempo.*

Oscar Poblete

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Subdirección de Pueblos Indígenas DDG FCFM, por darme la oportunidad de hacer este trabajo de título y la retroalimentación continua en el desarrollo de mi trabajo de título.

Quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo incondicional en mi proceso formativo como Ingeniero Civil Eléctrico. Por estar siempre en constante comunicación y preocupación por mi salud física y mental. Agradecer a mi madre Jeannette Manzano, ya que es y siempre será el pilar fundamental de mi familia. Es la que me ha dado una buena enseñanza, la cual se ve reflejada en el término de este proceso. También agradecer a mi padre Oscar Poblete, quien ha sido un buen referente de responsabilidad y perseverancia, que si no fuera por eso, no hubiese terminado este largo trayecto. Agradecer a mis hermanos Sebastián y Benjamín Poblete por acompañarme siempre y darme apoyo en los momentos difíciles. Decirles que si uno mezcla nuestras capacidades con la perseverancia, se puede llegar muy lejos. Quiero agradecer a mi polola Bárbara González, por ser una tremenda mujer, un excelente apoyo y por darme la confianza de estar en su vida. Llegaste en un momento crucial de mi vida universitaria y agradezco que hayas confiado en mí.

Quiero agradecer a mi profesora guía Doris Sáez Hueichapan quien me dio la oportunidad de trabajar en el proyecto invernaderos en escuelas rurales, por darme la confianza y mucho apoyo día a día en mi proceso formativo. Por descubrir a una persona que tenía escondido en mi interior, por hacerme ver que uno siempre puede hacer más cosas, no hay límites si uno es perseverante. También a mi profesor co-guía Juan Ignacio Huircan, quien ha sido protagonista de los desarrollos que se realizaron en este trabajo de título, por sus tremendas habilidades en el área de la ingeniería electrónica, por su formación en trabajos en terreno, del cual aprendí mucho. Agradecer también a los miembros de la comisión, a la académica Rosa Medina, por darme la confianza de trabajar en el proyecto, por su participación constante y presente en el proyecto y en mi trabajo de título. También agradecer al académico Carlos Muñoz, primero por su confianza en darme alojamiento, en todas las conversaciones que tuvimos respecto a diversos temas, de los cuales rescaté mucho aprendizaje, por sus conocimientos entregados y por apoyarme en este proceso.

Quisiera agradecer a mis amistades, las cuales han sido parte de todo el proceso de formación, a mis amigos del barrio, Sergio Miranda, Iván Jofre, Francisco Osses, Sergio Arce, Ricardo Sánchez y más, por comprender cuando no podía juntarme con ellos, por estar ahí en momentos tensos y también por estar en los momentos buenos. Agradecer por ser buenos amigos, por querer lo mejor para uno y para todos, por tener buenos sentimientos y la empatía constante de tener un amigo como yo. También agradecer a mis buenos amigos de la universidad, Ricardo Tralma, Mario Quevedo (también fue un honor aprender a integrar juntos), Ítalo Salazar, Bruno Pérez, Edinson Aguinaga, Francisco Rojas y más. Ustedes son parte importantísima de mi vida, vivieron conmigo el principio de la carrera, y el desarrollo posterior. Fuimos amigos desde que nos conocimos y no me arrepiento de nada con ustedes.

Son personas esforzadas, inteligentes, aprendí mucho de ustedes y espero nunca nos alejemos, pues marcaron a este hombre.

También quiero agradecer a la comunidad José Painecura Hueñalihuen por colaborar con nosotros en varios proyectos. En especial a Ermes García y su esposa, quienes nos ayudaron y permitieron utilizar su invernadero sobre el cual se trata este proyecto. También a las escuelas rurales, la Escuela Pública Bajo Yupehue, al director de la escuela, Jorge Henríquez, a los profesores y toda la comunidad escolar, inspectoras y personal de la escuela. También a la Escuela Privada Vista Hermosa, a sus profesores Manuel Carter, Claudia Quezada, Leonardo Davison, entre otros, y al personal de la escuela, que gracias a todos fue posible realizar este proyecto.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Metodología	2
1.4. Alcances	3
1.5. Estructura de la memoria	4
1.6. Publicación generada	4
2. Estado del arte	5
2.1. Proyectos tecnológicos en comunidades rurales indígenas	5
2.2. Experiencias de talleres participativos	6
2.3. Experiencias de tipos de control e implementación IoT en invernaderos	8
2.4. Discusión	12
3. Diseño e Implementación de un sistema tecnológico para Invernaderos	14
3.1. Diseño e implementación de talleres participativos tecnológicos	14
3.2. Encuestas talleres participativos	20
3.3. Planteamiento del sistema tecnológico	21
3.4. Sistema general	21
3.4.1. Tipo de invernadero	23
3.4.2. Tipo de riego	24
3.5. Sistema de nodos sensores y actuadores	25
3.6. Sistema de energía	28
3.7. Instrumentación invernaderos	30
3.7.1. Diseño diagramas P&ID	33
3.7.2. Sensores, actuadores y microcontrolador	38
3.8. Sistema de envío de información y visualización	42
3.9. Discusión	43
4. Diseño e Implementación de un Controlador Basado en Reglas	45
4.1. Planteamiento del problema	45
4.2. Sistema experto difuso propuesto	46
4.2.1. Diagrama de control	46
4.2.2. Controlador PID difuso	46
4.3. Implementación del controlador en laboratorio	49
4.4. Implementación descripción cualitativa	53

4.5. Discusión	56
5. Conclusión	58
5.1. Trabajo futuro	59
Bibliografía	61

Índice de Tablas

- 3.1. Tabla de sensores y actuadores en invernadero de Escuela Pública Bajo Yupehue. 36
- 3.2. Tabla de sensores y actuadores en invernadero de Escuela Privada Vista Hermosa. 38

Índice de Ilustraciones

1.1.	Metodología aplicada.	3
3.1.	Escuelas rurales indígenas, Carahue, Región de la Araucanía, Chile.	14
3.2.	Taller “Importancia del Agua”	16
3.3.	Taller de “Energía Renovable”	17
3.4.	Taller de “Sensores IoT”	19
3.5.	Trabajo en conjunto con estudiantes de Escuela Pública Bajo Yupehue	20
3.6.	Caja de protección servidor central.	22
3.7.	Diagrama sistema tecnológico.	23
3.8.	Invernadero construido en la Escuela Pública Bajo Yupehue.	24
3.9.	Invernadero construido en la Escuela Particular Vista Hermosa.	24
3.10.	Tipo de riego por goteo	25
3.11.	Esquemático del <i>NAE</i>	26
3.12.	Esquemático del <i>NST</i>	27
3.13.	Esquemático del <i>NSA</i>	27
3.14.	Nodos sensores instalados, fotografía dentro del invernadero.	28
3.15.	Paneles solares de mayor potencia, instalados en las escuelas rurales.	29
3.16.	Diagrama de conexiones Escuela Pública Bajo Yupehue.	30
3.17.	Diagrama de conexiones Escuela Privada Vista Hermosa.	31
3.18.	Sistema de nodos sensores instalados según el diagrama de conexiones presentado.	32
3.19.	Sistema de paneles solares instalados según el diagrama de conexiones presentado.	33
3.20.	Terminología diagramas P&ID.	34
3.21.	Diagrama de conexiones P&ID de la Escuela Pública Bajo Yupehue.	35
3.22.	Diagrama de conexiones P&ID de la Escuela Privada Vista Hermosa.	37
3.23.	Sensor AM2315 y microcontrolador ESP8266 utilizados.	39
3.24.	Sensor temperatura de suelo DS18B20 y sensor de humedad de suelo HD-38	40
3.25.	Sensor DN25 y Electroválvula Solenoide Latch Hunter.	41
3.26.	Sensor de nivel y bomba de agua.	42
3.27.	Panel desplegado por el servidor web instalado en el servidor PC. (Desarrollado principalmente por estudiante Oscar Villagra, de la Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.)	43
4.1.	Diagrama de control general para riego invernadero.	46
4.2.	Diagrama de un PID difuso.	47
4.3.	Conjuntos difusos para el error y cambio en el error con sus funciones de pertenencia asociados.	48
4.4.	Prueba en laboratorio con cultivo cactus.	49
4.5.	Diagrama de control para prueba en laboratorio con cultivo cactus.	50

4.6.	Gráfico de humedad medida vs. tiempo cada 10 minutos.	50
4.7.	Gráfico de acción de control vs. tiempo cada 10 minutos.	51
4.8.	Gráfico de error vs. tiempo cada 10 minutos.	52
4.9.	Gráfico de cambio en la acción de control vs. tiempo cada 10 minutos.	52
4.10.	Instalación nodos sensores en invernadero de Don Erme García y su familia. .	53
4.11.	Nodos sensores instalados.	54
4.12.	Visualización de datos obtenidos por prueba en terreno.	55
4.13.	Visualización de funcionamiento de controlador.	56

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Uno de los desafíos que enfrentan los y las estudiantes al finalizar su etapa escolar, es tomar decisiones sobre su futuro, como elegir entre estudios superiores o dedicarse a tareas domésticas junto a sus familias. Esta elección depende tanto de la cultura y crianza de cada estudiante como de la información disponible. Aunque existen varias formas de difundir información sobre las universidades, las personas de referencia fuera de sus familias es poco común. Por esto es que en este trabajo se propone un desarrollo de talleres participativos con estudiantes de escuelas, de manera que logren tener un acercamiento con el mundo de la educación superior.

La realización de los talleres involucra también un trabajo en conjunto con la comunidad escolar, definiendo puntos importantes de diseño del invernadero tecnológico.

La principal motivación es que la comunidad educativa pueda beneficiarse plenamente de la utilidad de la tecnología propuesta. Los invernaderos desempeñan un papel crucial al regular elementos cruciales como la temperatura, la humedad y la luz, lo cual otorga un control ampliado sobre el entorno de crecimiento de las plantas. Esta capacidad conlleva obtener cosechas más consistentes y de mayor calidad para los miembros de la comunidad. Es por esta razón que los invernaderos son un componente habitual en las áreas rurales habitadas por comunidades indígenas, ya que ofrecen resguardo a las plantas ante condiciones climáticas extremas como heladas, granizo y vientos intensos. La presencia de invernaderos también contribuye significativamente a la seguridad alimentaria al reducir el riesgo de pérdida de cultivos debido a eventos climáticos impredecibles. Estos espacios controlados se han integrado en la cultura de estas comunidades, adoptándolos como una medida valiosa en virtud de sus notables beneficios para la agricultura.

Con este fin, se propone el desarrollo de un sistema tecnológico basado en el concepto de *Internet de las cosas* (IoT) y el aprovechamiento de fuentes de energía renovable. Este sistema permitirá el control preciso de las variables del microclima en los invernaderos, brindando así un entorno óptimo para el crecimiento y desarrollo de las plantas. De esta manera, se busca maximizar la eficiencia y productividad de la agricultura familiar y local, promoviendo a su vez la sostenibilidad, el respeto por el medio ambiente en armonía con su cultura.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema tecnológico basado en IoT y energías renovables, a través de talleres participativos, que sea capaz de realizar mediciones y controlar, a base de reglas, las condiciones del microclima de tres invernaderos ubicados en la comunidad José Painecura Hueñalihuen, comuna Carahue, Región de la Araucanía, Chile. Dos de estos invernaderos se encuentran en escuelas rurales indígenas y el otro pertenece a una familia de la comunidad.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Diseñar y desarrollar talleres participativos para los y las estudiantes de las escuelas rurales mapuche.
2. Validar los talleres participativos con estudiantes de escuelas rurales indígenas, para tener un acercamiento de conceptos tecnológicos a través del trabajo en terreno.
3. Diseñar e implementar la instrumentación para co-diseñar los invernaderos de las escuelas rurales indígenas en la comunidad José Painecura Hueñalihuen.
4. Diseñar, implementar y evaluar un algoritmo de control basado en reglas, que mantenga la humedad de suelo de acuerdo a los requerimientos de los cultivos en los tres invernaderos.

1.3. Metodología

En esta sección se presenta la metodología utilizada en esta memoria, la cual se explica basándose en lo que indica en la Figura 1.1. Esta memoria de título es parte del proyecto "Sistema tecnológico de cultivos basado en IoT y energía renovable para escuelas rurales indígenas", el cual se desarrolla por el siguiente equipo de trabajo: Doris Sáez Hueichapan (Académica, Universidad de Chile), Rosa Medina (Académica, Universidad de Concepción), Carlos Muñoz (Académico, Universidad de la Frontera), Juan Ignacio Huircan (Académico, Universidad de la Frontera), Sonia Salvo (Académica, Universidad de la Frontera), Bryan Cartes (Estudiante Magíster Ingeniería Civil Electrónica, Universidad de la Frontera), Oscar Poblete (Estudiante Memorista Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile), Matías Alegría (Estudiante Magíster Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile), Oscar Villagra (Estudiante Memorista Ingeniería Civil Telemática, Universidad de la Frontera), Josefa Silva (Estudiante Magíster Ingeniería Civil Electrónica, Universidad de la Frontera). Cada individuo desempeña un rol específico y contribuye durante las reuniones, la organización de las salidas a terreno y la implementación en terreno. El esfuerzo conjunto de los integrantes de este equipo, en colaboración con los miembros de la comunidad, persigue la construcción exitosa y el correcto funcionamiento de los invernaderos. La metodología comienza con un estudio sobre los modelos de talleres participativos, esto con el objetivo de co-diseñar e implementar con los comuneros, un sistema tecnológico. Este sistema tecnológico debe ser capaz de realizar mediciones y acciones dentro del invernadero. Se realiza un estudio y trabajo en laboratorio de la instrumentación necesaria para realizar mediciones y acciones dentro del invernadero. Se realizan entrevistas a los comuneros y la comunidad escolar indígena sobre cultivos y usos del agua que se desean implementar en los invernaderos, con el objetivo de

determinar las condiciones de riego. De esta manera se realizan los talleres participativos en las escuelas, trabajando en conjunto con los y las estudiantes en los invernaderos. Con estos talleres participativos se puede mostrar a los estudiantes cómo funciona el sistema, esto de manera interactiva, junto con actividades teóricas, lúdicas y de contenidos para trabajar en conjunto en la implementación del sistema. Se realiza una investigación para determinar la instrumentación a escoger, considerando precios de componentes y compatibilidad de sensores/actuadores con los microcontroladores.

Se realiza un estado del arte de los controladores para invernaderos, incluyendo los automatizados. Tras examinar el estado del arte, se desarrollan controladores con la capacidad de automatizar el sistema de riego. Mediante la combinación de los talleres participativos y el diseño de los controladores, se logra obtener un sistema de riego completamente automatizado. Este enfoque permite optimizar la eficiencia del riego, integrando las ideas de co-diseño de la comunidad escolar y la tecnología de control avanzada, brindando así una solución efectiva y adaptada a las necesidades específicas de la comunidad.

El estudiante memorista se une al proyecto durante la fase de ejecución de los talleres participativos en las escuelas. Su contribución abarca diversas áreas, que incluyen la realización de talleres en las escuelas rurales, la organización de reuniones para planificar las visitas de terreno junto al equipo y la comunidad escolar, así como la participación activa en las salidas de terreno. Además, asume un rol clave en la investigación, desarrollo e implementación del sistema tecnológico destinado a los invernaderos. Su labor también engloba la coordinación integral de las actividades a llevar a cabo, incluyendo la gestión logística para las visitas.

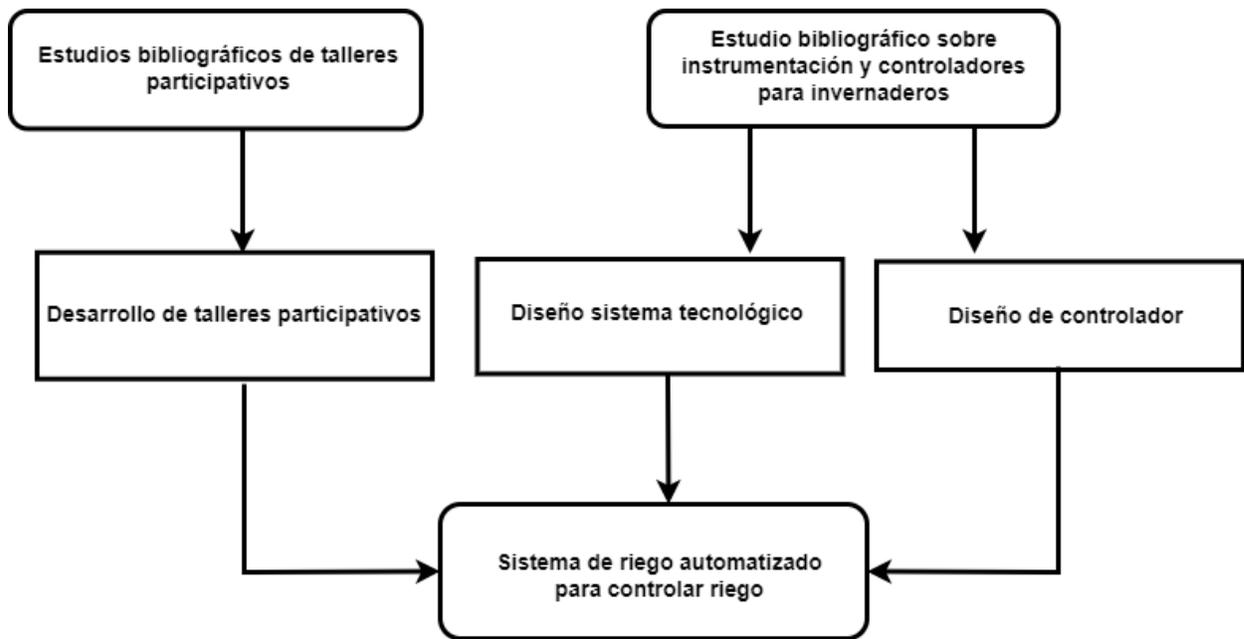


Figura 1.1: Metodología aplicada.

1.4. Alcances

En este trabajo se diseña un sistema tecnológico para invernaderos de comunidades rurales indígenas, el cual, mediante un controlador, debe mantener condiciones adecuadas de humedad de suelo, favoreciendo así el crecimiento de cultivos.

1.5. Estructura de la memoria

El primer capítulo de esta memoria tiene como objetivo introducir el trabajo realizado, incluyendo la motivación, los objetivos y la metodología empleada en su desarrollo. Se abordan tanto los objetivos generales como los específicos, junto con la descripción de la metodología utilizada.

En el segundo capítulo se realiza un análisis del estado del arte, donde se exponen proyectos y experiencias de talleres participativos y energías renovables/IoT llevados a cabo en comunidades indígenas. Además, se exploran diferentes enfoques de control difuso utilizados tanto en la industria como en invernaderos para regular variables como el microclima.

El tercer capítulo detalla el diseño de los talleres participativos realizados en las escuelas rurales indígenas, incluyendo los temas abordados y la importancia de trabajar con los estudiantes. Se describe el proceso de co-diseño, la interacción entre los participantes y la incorporación de tecnología. También se expone el diseño del sistema tecnológico implementado en los invernaderos, el cual se basa en la utilización de nodos sensores. Estos nodos incluyen sensores y actuadores ubicados dentro del invernadero. También se explica el sistema de energía utilizado para los nodos sensores y se presenta el diseño P&ID correspondiente.

El cuarto capítulo se describe el diseño e implementación del controlador difuso basado en reglas, desarrollado en el lenguaje de programación Python. Este controlador tiene como objetivo determinar la necesidad de riego de los cultivos según las mediciones de humedad del suelo. De esta manera, se logra controlar las variables del microclima del invernadero mediante actuadores, como las electroválvulas, en función de los valores captados por los sensores.

Por último, en el quinto capítulo se presentan las principales conclusiones y se plantean posibles líneas de trabajo futuro.

1.6. Publicación generada

C. Muñoz, J. Huircan, D. Sáez, R. Medina, O. Poblete, O. Villagra, B. Cartes, J. Silva, M. Alegría. "Participatory Development in Indigenous Rural Schools for Adopting IoT in Agrifood", CAFE 2023, 2023 IEEE Conference on AgriFood Electronics, 25– 27 September 2023, Torino, Italy.

Capítulo 2

Estado del arte

En esta sección, se aborda el estado del arte en cuanto a desarrollos que involucran avances tecnológicos relacionados con energía renovable y con Internet de las Cosas (IoT) en escuelas y comunidades indígenas en Chile. Posteriormente, se exploran las experiencias de diseño de talleres participativos. Por último, se examinan diversos esquemas de control aplicados en invernaderos. En la siguiente sección se presentan diferentes experiencias de proyectos tecnológicos desarrollados en comunidades rurales indígenas en Chile.

2.1. Proyectos tecnológicos en comunidades rurales indígenas

Los proyectos tecnológicos en comunidades rurales indígenas han demostrado ser una poderosa herramienta [1] para impulsar el desarrollo y mejorar la calidad de vida de estas comunidades. A través de la implementación de soluciones innovadoras, se busca abordar los desafíos y necesidades específicas que enfrentan, promoviendo la inclusión digital, la sustentabilidad y el fortalecimiento de sus conocimientos tradicionales. En este sentido, se han llevado a cabo diversas iniciativas que combinan tecnologías emergentes con el respeto a la cultura y cosmovisión de los pueblos indígenas. En esta sección se presentan algunos de los trabajos realizados en comunidades indígenas, relacionados con proyectos de energías renovables/IoT.

En [2], se realiza la instalación de paneles solares en una ruka ubicada en el Sector Tejas Verdes de la ciudad de Coyhaique, Chile. Este proyecto no solo se centra en el uso de la tecnología, sino que también se valora la cosmovisión de la naturaleza por parte de la comunidad y su relación con este tipo de iniciativas. En este contexto, la energía solar renovable se considera una fuente limpia que contribuye a la preservación del medio ambiente al no generar contaminación. Además de proveer energía sostenible, esta instalación promueve una armonía con la naturaleza, en línea con los valores y creencias de la comunidad. El proyecto ha desempeñado un papel fundamental en el fortalecimiento del uso de la ruka en la comunidad. Anteriormente, la falta de acceso a energía eléctrica limitaba las actividades diarias hasta las cuatro de la tarde. Sin embargo, gracias a la implementación de paneles fotovoltaicos, ahora tienen la capacidad de extender las jornadas hasta las siete u ocho de la tarde. Este cambio significativo ha tenido un impacto positivo en la cultura mapuche de la comunidad, fortaleciendo sus tradiciones y mejorando su calidad de vida.

En [3], se desarrolla taller de energía renovable en una comunidad mapuche. Bajo el liderazgo de Marcela Lincovil, presidenta de la comunidad, se realizaron diversas acciones para acercar a los miembros de la comunidad al uso de la energía solar. Una de estas iniciativas

destacadas es la creación de la Ruka Solar, que surgió a partir del programa de salud intercultural en el año 2000, cuando la comunidad comenzó a brindar atención médica en la ruka a través de la medicina mapuche. Este proyecto ha tenido un impacto positivo tanto en la preservación del medio ambiente como en la funcionalidad de la Ruka Solar como centro de atención médica. Se estima que alrededor de 200 personas reciben tratamiento semanalmente en este espacio. Cabe destacar que, debido a la cantidad de personas que son atendidas, se necesitan hervir grandes cantidades de hierbas medicinales. La utilización de paneles solares ha permitido a la comunidad contar con una alternativa de ahorro energético significativa, mejorando así su eficiencia y sostenibilidad.

En [4], se lleva a cabo la instalación de paneles solares en la Comunidad Mapuche Williche de Fresia, ubicada en la Región de Los Lagos, Chile. Fresia es una comuna situada en la provincia de Llanquihue, en la zona costera de la región. Este proyecto ha beneficiado a 30 familias y a los casi 40 socios de la comunidad Taiñi Mapu de Fresia. La inversión realizada ha permitido adquirir e instalar un kit de paneles solares fotovoltaicos, baterías, centros de iluminación y enchufes, brindando una fuente de energía autónoma, limpia y renovable. La implementación de esta infraestructura energética ha posibilitado a la comunidad desarrollar diversas actividades de carácter cultural, económico y recreativo, como encuentros y reuniones comunitarias, contribuyendo así a un desarrollo sostenible en concordancia con su identidad.

En [5], se presenta un proyecto que utiliza de manera eficiente el Internet de las cosas (IoT) para mejorar la gestión del agua. Este proyecto se enfoca en la implementación de sensores IoT para monitorear y predecir niveles de agua perjudiciales en una instalación de tratamiento de agua, brindando a las comunidades indígenas una solución más eficiente y confiable para garantizar el acceso a agua potable segura. Esto beneficia a las comunidades, ya que estas han tenido que hervir el agua antes de consumirla durante décadas como medida preventiva contra enfermedades transmitidas por el agua. Se utiliza tecnología basada en sensores para medir la profundidad del agua y los elementos químicos presentes. Los datos recopilados se envían mediante conectividad $4G$ para comunicarse directamente con una plataforma en una nube. Este enfoque permite a las comunidades indígenas tener un monitoreo continuo y en tiempo real de los niveles de agua, proporcionando información crucial para prevenir la contaminación y garantizar la seguridad del suministro de agua potable.

En esta sección, se han expuesto diversas experiencias relacionadas con el desarrollo de tecnologías de energía renovable, así como la integración de tecnologías IoT en comunidades rurales indígenas. Es evidente que la implementación de estas tecnologías conlleva resultados significativos, permitiendo llevar a cabo actividades tradicionales, de manera más eficiente, sustentable y segura. Por ejemplo, el uso de paneles solares para iluminar una ruka destinada a la atención médica [3] es un claro ejemplo de ello. Así, la sinergia entre la aplicación de tecnologías innovadoras y el conocimiento tradicional de las personas puede generar impactos positivos significativos en una comunidad rural indígena. En la siguiente sección, se presentan diferentes experiencias de talleres participativos en comunidades rurales indígenas, las cuales se consideran para el desarrollo de este trabajo de título.

2.2. Experiencias de talleres participativos

Los talleres participativos son actividades interactivas en las que los participantes trabajan juntos para abordar un tema específico, compartir conocimientos, discutir ideas y tomar decisiones de manera colaborativa. En esta sección se presentan distintos ejemplos y diseños

de talleres participativos, que se han llevado a cabo.

En [6], se emplean metodologías participativas en promoción y educación para la salud, enfocándose en aspectos clave como la planificación participativa, la capacitación, el aprendizaje significativo, el trabajo en grupo y las técnicas participativas. El trabajo resalta especialmente las técnicas participativas, las cuales se dividen en tres etapas: inicio, construcción de aprendizajes y evaluación.

En [7], se desarrolla una propuesta metodológica para promover la inclusión tecnológica de la comunidad indígena Wayuu. Esta propuesta se basa en estrategias de inclusión que permiten el acceso a la tecnología preservando sus características lingüísticas y culturales. El objetivo de este artículo es justificar, a través de la revisión de teorías y experiencias, que las comunidades indígenas también pueden participar y beneficiarse de estas técnicas educativas. Finalmente, se concluye que el uso de herramientas de tecnología de la información y comunicación (TIC) puede generar un progreso significativo en las comunidades indígenas, ya que mejora los resultados académicos y reduce las barreras ocasionadas por las diferencias lingüísticas y culturales. Estas herramientas brindan oportunidades para superar obstáculos y facilitar el acceso a la educación en entornos indígenas.

En [8], se documenta el cierre del Programa Educativo *Artesanías en tu Región* en la Escuela de Villa Quilquén, ubicada en la Región de la Araucanía, Chile. Este programa, impulsado por la Fundación Artesanías de Chile, tiene como objetivo contribuir a los procesos de descentralización cultural del país mediante la implementación de actividades educativas relacionadas con el patrimonio artesanal. El artículo destaca el impacto positivo que estas iniciativas tienen en la comunidad escolar y en la preservación de la identidad cultural. Este proyecto tiene como objetivo fomentar y difundir la textilería tradicional de Chile entre niños y niñas, especialmente en escuelas rurales. Para lograrlo, se llevan a cabo diversas actividades, como visitas guiadas a la exposición interactiva *La Memoria de los Hilos*, talleres en colaboración con maestras artesanas locales, y como culminación, una exposición que muestra las piezas creadas por los niños y las niñas durante la semana. De esta manera, se promueve la participación activa de los estudiantes en el aprendizaje y preservación de las técnicas textiles tradicionales de Chile.

En [9], se describe la realización de un taller participativo en la Región de Los Ríos, Chile, con la asistencia de 94 personas provenientes de diferentes áreas. Este taller tiene como objetivo promover actividades adicionales para la recuperación y protección del bosque nativo y de formaciones xerofíticas en el país. La Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV) se enfoca en debatir medidas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través del reconocimiento del papel de los recursos vegetacionales como capturadores y almacenadores de GEI. Durante el taller, se formaron grupos focales que representan diferentes sectores de la sociedad, incluyendo la participación activa de los Pueblos Indígenas, comunidades locales y mujeres. Una de las conclusiones destacadas es el reconocimiento de los beneficios de la retribución a través de la educación para los niños y niñas de las localidades. Este taller participativo es un ejemplo de cómo se deberían adoptar los diferentes puntos de vista de los participantes, obteniendo así conclusiones respecto a sus necesidades.

En [10], se presenta una recopilación de experiencias en comunidades escolares en colaboración con la Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe de la UNESCO. Este trabajo investiga los conocimientos, habilidades, valores y destrezas que los docentes de aula deben dominar para ser considerados altamente experimentados y destacados en su profesión. Además, se examina cómo desarrollar y fortalecer el conocimiento pedagógico y de

enseñanza, subrayando la importancia del perfeccionamiento y la investigación pedagógica para la profesionalización docente.

En este contexto, se evidencia un enfoque multidisciplinario y diverso en el desarrollo de experiencias en comunidades indígenas. Estas iniciativas tienen como objetivo fomentar el beneficio mutuo y la transferencia de conocimientos de manera interactiva y participativa. Además, se busca rescatar y preservar saberes ancestrales para que perduren en el tiempo.

Es crucial reconocer el valor de estos conocimientos y transmitirlos a las futuras generaciones, tanto aquellos que han sido transmitidos desde tiempos remotos como los nuevos conocimientos que se incorporan. Es por ello que se proponen talleres participativos como parte de este trabajo de título. Estos talleres buscan acercar a estudiantes de escuelas rurales indígenas a conceptos innovadores que, de una forma poco común, llegan a lugares remotos como sus comunidades, como lo son el uso de energías renovables y tecnologías IoT. De esta forma, se destaca la importancia de la interacción entre la sabiduría ancestral y el avance tecnológico para el desarrollo sostenible y el progreso en las comunidades indígenas, en armonía con la preservación de sus tradiciones y valores culturales.

La siguiente sección presenta trabajos y proyectos enfocados en invernaderos inteligentes, donde se aplican diversos sistemas de control para mantener condiciones favorables para cultivos en invernaderos. Asimismo, se explora el uso de tecnologías IoT para el monitoreo de variables del micro-clima dentro de los invernaderos.

2.3. Experiencias de tipos de control e implementación IoT en invernaderos

Los invernaderos son estructuras diseñadas y construidas con el propósito de crear un entorno controlado para el cultivo de plantas. Este entorno controlado ha sido objeto de numerosas investigaciones en ingeniería. Con el avance de la tecnología, el uso de sensores y el Internet de las Cosas (IoT) es una herramienta ampliamente utilizada para regular las variables dentro de los invernaderos. En esta sección, se presentan trabajos que emplean diversas estrategias de control para regular la temperatura, la humedad, la ventilación y otros factores, con el objetivo de mejorar las condiciones para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En [11], se presenta una propuesta de algoritmo computacional difuso basado en IoT y lógica difusa para invernaderos. En este estudio, se emplean sensores para registrar la temperatura y la humedad del suelo, con el objetivo de utilizar estos datos recopilados en la aplicación de un algoritmo difuso que apoye a los agricultores en la toma de decisiones y lograr un rendimiento aceptable. Estos sensores registran de manera continua la temperatura y la humedad del suelo, lo cual permite detectar la cantidad de agua presente y la humedad en el entorno. A partir de los datos recopilados, el software implementa un algoritmo computacional difuso para brindar asistencia a los agricultores en la toma de decisiones. En este artículo se combina la tecnología de sensores conectados a microcontroladores, junto con el uso de una base de datos para el registro de las mediciones realizadas. Este trabajo se distingue de la presente memoria de título por el tipo de microcontrolador utilizado. Aquí se emplea un módulo ARDUINO, el cual carece de conectividad inalámbrica wifi integrada, a diferencia del módulo ESP8266 utilizado en esta memoria. Este último proporciona conectividad wifi a dispositivos electrónicos para proyectos de IoT, lo que representa una ventaja significativa

al permitir el envío de información de manera inalámbrica, reduciendo la necesidad de cables para conectar servidores y microcontroladores. Además, este trabajo emplea *Microsoft Visual Studio* como plataforma para visualizar los datos recopilados por el microcontrolador, mientras que en el presente trabajo de título se utiliza *Spring* para este propósito, el cual trae como beneficios su flexibilidad, modularidad, independencia de plataforma y la amplia comunidad de soporte que lo respalda.

En [12], se desarrolla un invernadero de agricultura de precisión basado en IoT y lógica difusa. En este proyecto se utilizan tres tipos de nodos: el nodo de adquisición, encargado de realizar mediciones de temperatura, humedad, concentración de CO₂, intensidad de luz, entre otros; el nodo de control, que recibe y recopila la información, enviándola al nodo puerta de enlace; y finalmente, el nodo de ejecución, que ejecuta acciones en el invernadero basándose en los comandos de control recibidos. El nodo principal envía los datos recopilados por el nodo de adquisición al software de aplicación a través del módulo *GPRS (General Packet Radio Service)*. Además, en caso de que los datos de los sensores sean anormales, se envía un mensaje de alarma al teléfono móvil de los agricultores, alertándolos de la situación. Los datos se publican en la web, con la consideración que solo los usuarios autorizados pueden verificar de forma remota la información en un navegador. Este trabajo se diferencia del trabajo de título por el uso de sensores adicionales, como el de concentración de CO₂ y la intensidad de luz, los cuales brindan información más detallada sobre las condiciones del invernadero. Esta ventaja es significativa, ya que se consideran más variables para el control preciso del microclima del invernadero. Además, se diferencia por el tipo de tecnología de comunicación inalámbrica utilizada. En [12] se emplea la tecnología *GPRS (General Packet Radio Service)*, en cambio, el trabajo de título, opta por el uso de wifi para la comunicación inalámbrica. La distinción radica en que GPRS es una tecnología de red móvil que permite el acceso a datos en dispositivos móviles, mientras que wifi es una tecnología inalámbrica local que proporciona acceso a Internet en un área más limitada, con velocidades de datos más altas.

En [13], se presenta el desarrollo de un controlador PID difuso para abordar el control inteligente en invernaderos. Se establecen reglas de control difuso basadas en la experiencia de expertos y en el modelo de calefacción del invernadero. El enfoque principal del artículo es optimizar el uso de las ganancias del controlador PID convencional (K_p , K_i y K_d). Estas ganancias se ajustan en línea utilizando reglas de tipo *Si-Entonces*, tomando como variables de entrada el error y la variación del error. El error se define como la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura de referencia. Se demuestra que el uso de un controlador PID con las ganancias determinadas por las reglas establecidas resulta en una mayor eficiencia y un mejor rendimiento dinámico en comparación con el PID convencional. Este trabajo presenta dos controladores, un PID normal y otro PID difuso. Una diferencia clave con el trabajo de la memoria de título radica en el enfoque del controlador PID difuso utilizado. En este enfoque, se propone una base de reglas que depende del error y del cambio en el error pasado para ajustar las ganancias del PID convencional, convirtiéndolas en ganancias difusas (K_I , K_{PY} y K_D). Mediante esta base de reglas, se determina un valor para las ganancias, lo que permite adaptar el controlador en función del error y su variación. Otra distinción importante es el uso de herramientas para realizar las simulaciones. En [13], se utilizó *MATLAB* para llevar a cabo las simulaciones, mientras que en este trabajo de título se opta por la programación del controlador utilizando *Python*. Estas diferencias resaltan la diversidad de enfoques y tecnologías utilizadas en ambos trabajos, lo que puede influir en los resultados y conclusiones obtenidos.

En [14], se presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control en

tiempo real basado en lógica difusa para regular la temperatura y humedad en un invernadero ubicado en la Universidad de Filadelfia en Jordania. El sistema incluye dos controladores difusos: el primero controla las operaciones de calefacción y ventilación en función de las variaciones en las variables medidas de temperatura y humedad relativa, mientras que el segundo controlador difuso se encarga de mantener la humedad del invernadero utilizando las mismas variables mencionadas anteriormente. Para el procesamiento de datos y la generación de acciones de control, se utiliza una placa de microcontrolador del tipo *ATMEGA 2560 de Atmel*, con comunicación a través del protocolo *SPI*. El microcontrolador es capaz de leer las solicitudes y cuenta con un servidor web integrado que ofrece varias páginas HTML a las que se puede acceder. Esto permite al agricultor monitorear las variables del invernadero utilizando tecnología web o teléfonos inteligentes. El diseño propuesto ofrece diversas ventajas significativas. En primer lugar, se destaca por contar con una interfaz flexible de entrada/salida que permite una fácil integración de sensores y actuadores. Esto brinda versatilidad y adaptabilidad al sistema. Además, se destaca su facilidad para modificar y ajustar los parámetros del controlador, lo que permite una optimización continua del rendimiento. Otra ventaja destacada es la posibilidad de obtener video en vivo para monitorear el crecimiento y la salud de los cultivos en tiempo real. Esta función resulta invaluable para los agricultores, ya que les permite tener un control más preciso y una visión detallada del estado de sus plantas. Además, se subraya que el diseño propuesto es confiable, lo que asegura un funcionamiento consistente y preciso del sistema. A su vez, se destaca su carácter económico, lo que lo hace accesible y viable para su implementación en diferentes contextos agrícolas. Este trabajo se diferencia del trabajo de título en los sensores utilizados, los cuales son sensores para la temperatura del aire, la humedad del aire, la humedad del suelo, el CO_2 y la radiación solar. También, se diferencia en el uso de actuadores tales como: una unidad de calefacción, una unidad de iluminación, una unidad de rociado: utiliza aspersores para suministrar agua en tuberías. Una unidad de enfriamiento: un ventilador con motor de corriente continua controlado por una señal *PWM* se utiliza para enfriar la temperatura dentro del invernadero. Y una unidad de ventilación: se utilizan dos motores paso a paso para controlar la apertura de las ventanas laterales de la ventilación. También, se utiliza un módulo *ARDUINO ATMEGA 2560*, para procesar la data de los nodos sensores y también generar una acción de control en el invernadero.

En [15], se desarrolla un sistema inteligente para el monitoreo y control difuso de un invernadero agrícola basado en Internet de las Cosas (IoT). En este sistema, se recopilan datos climáticos del invernadero mediante un nodo y se envían al servidor utilizando el módulo *NRF24L01+* conectado al Raspberry Pi. El servidor analiza, procesa y muestra los datos en una Interfaz Hombre-Máquina (*HMI*) y envía comandos a los diferentes actuadores (ventilador, calefacción, extractor y humidificador) en el invernadero a través de comunicación de radiofrecuencia (RF). Los datos del invernadero se almacenan en la nube, lo que permite al usuario monitorear y controlar el invernadero utilizando una PC o un teléfono inteligente en cualquier momento y desde cualquier lugar, siempre que haya una conexión a Internet disponible. El controlador difuso utilizado considera como entradas las variables de error de temperatura y humedad según un valor de referencia, y como salida genera la tasa de activación de los actuadores que controlan la ventilación, calefacción, humidificación y deshumidificación. Estas decisiones se basan en un conjunto de reglas que se crean a partir del conocimiento de los agricultores. Este trabajo resalta las principales ventajas de implementar un invernadero inteligente, que incluyen el monitoreo y control remoto del invernadero, el uso optimizado de la energía, la reducción de los esfuerzos del agricultor y la utilización de

la comunicación inalámbrica. La diferencia de este trabajo con el trabajo de título está en que la visualización de la data es en *Node-Red dashboard*, que es en donde el usuario puede monitorear la temperatura y la humedad dentro del invernadero mediante medidores para una visualización instantánea, así como gráficas para representar los valores en intervalos de tiempo. También está la diferencia que existen varios actuadores, tales como para la iluminación, calefacción, deshumidificador, extractor. La forma de enviar los datos también es una diferencia importante, ya que en [15] se utiliza el módulo *NRF24L01+* con un Arduino UNO, que forma un nodo de red de sensores inalámbricos (*WSN*). Este se utiliza para enviar y recibir datos entre el invernadero y el servidor *Node-Red*. Los datos enviados desde el invernadero son recibidos por un segundo nodo y transferidos a *Node-Red* a través de un puerto serie USB. La ventaja de usar esta comunicación inalámbrica es que *NRF24L01+* es ideal para aplicaciones de redes de sensores inalámbricos o proyectos de IoT de alcance limitado, mientras que wifi es más adecuado para proporcionar acceso a Internet y comunicación en áreas más grandes y con mayor cantidad de dispositivos. Siempre dependerá del proyecto en específico.

En [16], presenta dos técnicas de control difuso aplicadas a un invernadero. Se utiliza un modelo de identificación del invernadero basado en ecuaciones fenomenológicas, el cual se desarrolla a partir de una evaluación exhaustiva de los datos recopilados en el invernadero a lo largo de varios años (desde 1991) y del conocimiento experto del cultivador. El primer controlador difuso considera perturbaciones externas, como la temperatura y humedad externas al invernadero, y se basa en una base de reglas compuesta por 81 reglas. Sin embargo, este controlador solo es válido durante una parte del día y no puede funcionar de manera óptima durante todo el día. El segundo controlador difuso es una versión optimizada que se basa en nueve reglas. Además de tener en cuenta las variaciones en sentido de las variables de entrada, este controlador también aborda el estudio de estabilidad y la consideración de perturbaciones externas. Se plantea que el controlador optimizado presenta varias ventajas, como la capacidad de funcionar durante todo el día, la facilidad de uso debido al menor número de reglas y la facilidad para analizar la estabilidad en bucle cerrado del sistema. Este estudio demuestra que el control difuso puede ser una técnica efectiva para regular el clima en invernaderos. El controlador optimizado muestra mejoras significativas en comparación con el controlador básico, proporcionando un rendimiento más sólido. La principal diferencia de este trabajo con el trabajo de memoria de título, es que en [16] se modela un invernadero basándose en variables tales como temperatura externa, el comando de techo, la velocidad del viento, el comando de calefacción, la radiación global, el comando de humidificación y la higrometría externa del invernadero. Una vez se tiene el modelo, se realizan dos tipos de control difuso basado en reglas por simulación.

En [17], se presenta un controlador difuso para regular la ventilación y las persianas de un invernadero utilizando la tecnología de Internet de las Cosas (IoT). El trabajo se centra en controlar la temperatura, humedad e intensidad lumínica del invernadero mediante el funcionamiento de dispositivos de ventilación (ventiladores y motores paso a paso). Los sensores de temperatura y humedad se integran con el kit Arduino UNO. Se emplea un controlador difuso para encender o apagar un ventilador en función de las lecturas de los sensores de temperatura y humedad. Además, se utiliza un controlador difuso con variador de frecuencia para controlar varios ventiladores y motores paso a paso, lo que permite regular la velocidad de movimiento de las persianas. Una vez que se tenga data, esta se transmite y se recibe a través de wifi utilizando el entorno MATLAB. Para este propósito, se utiliza el servidor en la nube *ThingSpeak*, una plataforma de datos abierta y una API de IoT que

permite realizar operaciones en los datos, como almacenamiento, análisis y visualización. La lógica difusa se aplica dentro de la nube de IoT para evaluar la decisión adecuada para operar cada uno de los motores de forma individual. De esta manera, se toman decisiones basadas en reglas difusas y se envían señales de control a través de wifi.

En [18], se propone un controlador difuso basado en IoT para el control de los parámetros de crecimiento en invernaderos utilizando una red de niebla (fog network). Este controlador difuso utiliza reglas para determinar la duración del riego por goteo, mientras que la red de niebla se utiliza como plataforma para superar los problemas de latencia de red durante los procesos de recolección de datos. El sistema se compone de nodos de sensores equipados con sensores de temperatura, humedad del suelo, humedad del aire e intensidad de luz, que están conectados a un microcontrolador *ESP8266-WIFI*. Este microcontrolador se encarga de recopilar los datos de los sensores y transmitirlos a través de redes wifi hacia el servidor de niebla, utilizando el protocolo MQTT como bloque publicador. El sistema no experimenta problemas de latencia durante la recopilación de datos en tiempo real. Se utiliza el algoritmo basado en reglas difusas implementado en el lenguaje de programación PHP, lo que permite controlar el riego de forma remota y ajustar su duración según las condiciones climáticas del invernadero. Esto reduce el riesgo de muerte de las plantas debido a la influencia de factores climáticos inciertos. La principal diferencia de este trabajo con el trabajo de título es en el uso de la red de niebla (fog network) y que la implementación se realiza en el lenguaje de programación *PHP* con *Arduino IDE*, *MQTT*, *Node Js*, *MySQL* y *Sublime Text 3*. La codificación de la aplicación se lleva a cabo mediante el navegador web *Google Chrome*. De los resultados se concluye que el tiempo de transmisión de la red de niebla (fog network) es más rápido que la red en la nube (cloud network). El promedio de velocidad de los datos para la red de niebla es de 471 [ms], mientras que la velocidad de transmisión de datos para la red en la nube es de hasta 1349 [ms]. La velocidad se ve afectada por la arquitectura de la red, como el uso de la red de niebla y la medición de datos de objetos desde sensores en una red de alcance más corto. Estas son otras formas de envío de datos, que pueden considerarse para otra aplicación.

2.4. Discusión

Cada año, los avances tecnológicos se incrementan de manera significativa. Si bien existen numerosas investigaciones sobre tecnologías basadas en IoT y energías renovables, existe un campo más reducido que se enfoca en aplicar estas tecnologías en comunidades indígenas. Estos avances en las comunidades abren nuevas oportunidades de investigación, como es el caso de los invernaderos inteligentes. Actualmente, las mejores tecnologías se centran principalmente en la industria, con el objetivo de reducir costos de producción y maximizar las utilidades. Sin embargo, también es posible encontrar tecnologías que mejoren la producción en otros contextos, como el ejemplo presentado por [3], donde se pueden atender en medicina, a más personas en una ruka alimentada por energía solar. Por lo tanto, es posible combinar tecnologías de control, las energías renovables y el IoT para beneficiar a pequeños proyectos comunitarios, como los invernaderos.

Es importante considerar también la transferencia de conocimiento, ya que el uso de nuevas tecnologías en comunidades resalta la urgencia de que las nuevas generaciones de jóvenes conozcan y consideren las tecnologías relacionadas con la energía renovable, por ejemplo, debido al aumento del cambio climático. Por lo tanto, los talleres participativos desempeñan un papel fundamental en este trabajo, ya que permiten un intercambio de información tanto

sobre tecnología como sobre agricultura y cuidado de la naturaleza.

En el ámbito de los invernaderos inteligentes, se han llevado a cabo numerosas investigaciones y trabajos que se centran en la implementación de tecnologías de sensores IoT para realizar mediciones y brindar apoyo en la toma de decisiones a los agricultores. Estas investigaciones muestran una tendencia común en el uso de sensores en combinación con software para facilitar la toma de decisiones. Por lo general, se utilizan microcontroladores, bases de datos y sensores, además del conocimiento de expertos en cultivos. El objetivo principal de todas estas investigaciones es lograr la implementación a nivel industrial de sistemas de sensores IoT con una base de datos, ya que contar con un conocimiento detallado sobre el estado de los cultivos permite obtener mejores resultados en términos de calidad y productividad de las plantas en el futuro.

Al igual que en otros casos [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], los invernaderos inteligentes consideran el uso de microcontroladores conectados a sensores, y la información obtenida se envía a una base de datos a través de algún protocolo de comunicación. Las variables del micro-clima que generalmente se consideran, son la temperatura y humedad del ambiente, junto con otras variables como la humedad del suelo o variables climáticas externas al invernadero. El control difuso en los invernaderos se enfoca principalmente en controlar la temperatura y la humedad, pero es posible obtener mejores resultados si se controlan más variables dentro del invernadero, teniendo en cuenta las perturbaciones externas, considerando modelación fenomenológica. Este trabajo de título se diferencia de los presentados en que la implementación de invernaderos inteligentes se lleva a cabo en una comunidad indígena chilena, en lugar de ser en una industria o área de prueba convencional. Además, la aplicación tiene como objetivo proporcionar beneficios y fomentar el intercambio de conocimientos entre disciplinas distintas, como la agricultura y la tecnología.

En el siguiente capítulo se muestra el sistema tecnológico diseñado para los invernaderos de la comunidad indígena. Inicialmente, se describen los talleres participativos llevados a cabo en las escuelas rurales. A continuación, se presenta la instrumentación y el diseño tecnológico utilizados, acompañados de los diagramas *P&ID* correspondientes para ambos invernaderos.

Capítulo 3

Diseño e Implementación de un sistema tecnológico para Invernaderos

En este capítulo se presenta el diseño del sistema tecnológico utilizado en dos escuelas rurales indígenas: Escuela Pública Bajo Yupehue y Escuela Particular Vista Hermosa, observar Figura 3.1. Ambas escuelas están ubicadas en la comuna de Carahue, Región de la Araucanía, y parte de sus estudiantes, pertenecen a la comunidad José Paineicura Hueñalihuen. Primero se describen los talleres participativos realizados, los cuales tienen como objetivo introducir los conceptos a los estudiantes y fomentar la colaboración en el diseño e implementación de los invernaderos. Además, se proporciona información detallada sobre la instrumentación utilizada en los invernaderos, el funcionamiento del sistema completo y la ubicación de los componentes del invernadero, así como el sistema tecnológico de energía empleado.



(a) Escuela Pública Bajo Yupehue



(b) Escuela Particular Vista Hermosa

Figura 3.1: Escuelas rurales indígenas, Carahue, Región de la Araucanía, Chile.

3.1. Diseño e implementación de talleres participativos tecnológicos

Se diseñan y desarrollan talleres participativos con los y las estudiantes de dos escuelas rurales indígenas, esto con el fin de que trabajen en la implementación tecnológica de inver-

naderos. Ambas escuelas cuentan con invernaderos donde se busca cultivar una variedad de vegetales, como tomates, ajíes, lechugas y otros. Tanto los profesores como los estudiantes se encargarán de cuidar y mantener los cultivos y los invernaderos. Estos talleres tienen como objetivo que los y las estudiantes sean parte del desarrollo e implementación de la instrumentación en los invernaderos. En cada taller los y las estudiantes pueden interiorizar los distintos conceptos que se presentan en cada uno. En los siguientes párrafos se presentan tres talleres participativos realizados en las escuelas rurales, en donde se explican las actividades realizadas, junto con sus objetivos y metodologías empleadas.

Los talleres participativos tienen como objetivo explicar los conceptos generales del proyecto y, al mismo tiempo, conocer a los estudiantes de las escuelas, su funcionamiento como grupo y su dominio general de las temáticas relacionadas con la tecnología que se desea implementar. El desafío planteado es lograr la atención activa de los y las estudiantes durante el desarrollo de los talleres, al mismo tiempo que se genera confianza con ellos para garantizar un trabajo exitoso. Estos talleres se dividen en tres etapas. En la primera etapa, se lleva a cabo una dinámica recreativa con el objetivo de que los y las estudiantes puedan establecer una mayor confianza con el equipo. Esta dinámica busca ayudar a los estudiantes a superar la timidez y prepararlos para las etapas siguientes. En la segunda etapa, se realiza una presentación de los contenidos del taller, donde se lleva a cabo una conversación y exposición teórica con el apoyo de una presentación visual y una actividad interactiva. El propósito de esta etapa es que los y las estudiantes puedan familiarizarse y comprender a fondo los temas que se tratan. Por último, se desarrolla una actividad práctica participativa en la que los estudiantes aplican los conocimientos adquiridos durante el taller. Esta actividad está diseñada para que los estudiantes pongan en práctica lo aprendido y trabajen juntos para lograr un buen desempeño en la implementación de los invernaderos.

Los talleres fueron realizados por el equipo de trabajo: Doris Sáez Hueichapan (Académica, Universidad de Chile), Rosa Medina (Académica, Universidad de Concepción), Christian Antileo (Académico, Universidad de la Frontera), Carlos Muñoz (Académico, Universidad de la Frontera), Juan Ignacio Huircan (Académico, Universidad de la Frontera), Sonia Salvo (Académica, Universidad de la Frontera), Bryan Cartes (Estudiante Magíster Ingeniería Civil Electrónica, Universidad de la Frontera), Oscar Poblete (Estudiante Memorista Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile), Matías Alegría (Estudiante Magíster Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile), Oscar Villagra (Estudiante Memorista Ingeniería Civil Telemática, Universidad de la Frontera), Josefa Silva (Estudiante Magíster Ingeniería Civil Electrónica, Universidad de la Frontera) y Alexandra Fuenzalida (Estudiante Magíster en Meteorología y Climatología, Universidad de Chile). A continuación se describen los talleres participativos realizados.

- Taller “Importancia del Agua”: dictado por Rosa Medina, Christian Antileo y Bryan Cartes.

En este taller se resalta la importancia del agua para los seres vivos, especialmente para los cultivos, y se aborda el ciclo del agua y sus diferentes estados físicos. El objetivo es que los y las estudiantes adquieran una comprensión más profunda sobre la conservación y recuperación del agua, así como el cuidado del medio ambiente. El taller comienza con una presentación que abarca conceptos generales sobre el agua, su importancia, sus usos, formas de obtención y conservación. También se explora la importancia de las cuencas

hidrográficas del Río Imperial y el Río Tolten, para que los y las estudiantes comprendan el entorno en el que se encuentran. Se presentan las condiciones necesarias para el ciclo del agua, se analiza el agua subterránea y su relación con el uso del suelo, se aborda el cambio climático y sus consecuencias, y se explican las razones de su existencia. Además, se muestra el consumo de agua en Chile y se introduce la instrumentación necesaria para realizar mediciones en el agua, como el pH, el oxígeno, la temperatura, la conductividad y la turbidez mediante sensores. El taller participativo incluye una actividad práctica en la que se exhiben y utilizan dispositivos tecnológicos relacionados con el monitoreo y filtrado del agua para su uso adecuado. De esta manera, los y las estudiantes comprenden la importancia de cuidar el agua, también en sus hogares, considerando que se utiliza para el consumo humano, para dar de beber a los animales y para el riego de los cultivos. Esta actividad práctica se divide en tres estaciones. En la primera estación, el profesor Christian Antileo explica el proceso de filtrado a través de arena. Además, los estudiantes realizan la actividad de colocar un clip en una cubeta con agua para observar la tensión superficial del agua, ya que el clip flota en ella. La segunda estación está dedicada a la medición del pH y el oxígeno mediante sensores. En esta actividad se explica cómo realizar estas mediciones. La tercera estación consiste en la presentación del ciclo del agua mediante una maqueta. Rosa Medina fue responsable de explicar el ciclo del agua, tal como se puede observar en la Figura 3.2. La maqueta se utiliza para captar la atención de los y las estudiantes y facilitar una mejor comprensión de los términos y teorías. Con esta actividad, los estudiantes se familiarizan con los conceptos relacionados con el uso del agua. El equipo proporciona tanto conceptos como herramientas para que los estudiantes puedan utilizarlos y comprender los pasos necesarios para un uso adecuado del agua.



(a) Escuela Pública Bajo Yupehue



(b) Escuela Pública Bajo Yupehue

Figura 3.2: Taller “Importancia del Agua”

- Taller de “Energía Renovable”: dictado por Doris Sáez Hueichapan, Matías Alegría, Oscar Villagra, Alexandra Fuenzalida, **Oscar Pobleto** y Josefa Silva.

En este taller participativo se destaca la importancia de la energía solar como una fuente fundamental de suministro de energía eléctrica limpia. Se llevan a cabo actividades prácticas y educativas en las que se aplican conceptos relacionados con la energía solar para la construcción de prototipos. Estas actividades permiten evaluar el aprendizaje de los estudiantes mediante preguntas de retroalimentación, promoviendo así una com-

prensión activa y práctica de la importancia y aplicación de la energía solar. El taller de energía renovable comienza con una actividad práctica, la cual fue dirigida por la académica Doris Sáez Hueichapan y Alexandra Fuenzalida, la cual consiste en que los y las estudiantes se familiaricen con el equipo de trabajo y puedan desarrollar de manera óptima las actividades del taller. A continuación, Matías Alegría, Oscar Villagra y Oscar Poblete, realizan una presentación sobre los conceptos generales de la energía renovable. Se explica la importancia de la energía solar, sus usos y las formas de obtenerla. Con esta exposición, los estudiantes adquieren conocimientos básicos sobre la energía solar, su significado y cómo se puede aprovechar la energía del sol. Por último, Josefa Silva y el resto del equipo trabajaron en la actividad práctica con los y las estudiantes, la cual consistió en que los y las estudiantes construyeran prototipos, ver Figura 3.3, los cuales fueron un ventilador y un automóvil. Ambos prototipos debían ser energizados a través de un panel solar y debían utilizar materiales reciclables para su armado. Los grupos trabajaron en la construcción de un ventilador solar, fabricando las aspas con cartulinas y dibujos de diferentes colores y formas. Luego, decoraron la base del ventilador solar y construyeron la plataforma que sería el cuerpo del ventilador utilizando palitos de helado, todo unido con silicona líquida. A continuación, fijaron el panel solar en una posición favorable al sol. Una vez que la estructura estuvo lista, unieron las aspas a un motor de corriente continua que estaba conectado al panel solar. De esta manera, los estudiantes colocaron el panel solar bajo el sol, lo que energizó el motor y puso en funcionamiento el ventilador solar. Además, se realizaron automóviles solares utilizando tapas de botellas para las ruedas y el cuerpo de la botella para la estructura del automóvil. Se armaron ejes con palitos de brocheta donde se montaron las ruedas (tapas). Luego, se conectaron los ejes mediante elásticos al motor de corriente continua, el cual estaba conectado al panel solar ubicado sobre la botella, de manera que recibiera la máxima exposición al sol. De esta manera, los y las estudiantes trabajan con sus prototipos solares, notando así la utilidad de la energía solar. El equipo de trabajo proporciona a los y las estudiantes los materiales necesarios para que puedan darles un uso propio o llevar a cabo otros tipos de experimentos solares. De esta manera, el equipo logra brindar tanto los contenidos como las herramientas relacionadas con la energía solar, fomentando su aplicación para el cuidado del medio ambiente.



(a) Escuela Pública Bajo Yupehue



(b) Escuela Particular Vista Hermosa

Figura 3.3: Taller de “Energía Renovable”

- Taller de “Sensores IoT”: dictado por Juan Ignacio Huircan, Doris Sáez Hueichapan, Rosa Medina, **Oscar Poblete**, Oscar Villagra y Matías Alegría.

El objetivo de este taller es abordar diversos aspectos fundamentales, como el reconocimiento de la función de sensores que miden temperatura y humedad, y sus múltiples aplicaciones en la vida cotidiana. La comprensión del concepto de Internet de las Cosas (IoT) y su influencia en el mundo moderno, y la aplicación de los conceptos de sensores en el cuidado y supervisión de los cultivos. Para iniciar, se realiza una actividad en la que cada estudiante toca su frente para percibir el calor. Luego, se realiza una dinámica, la cual consiste en que los y las estudiantes miden su pulso cardíaco, de esta manera logran sentir la frecuencia de su pulso. Posteriormente, los y las estudiantes realizaron movimientos físicos para aumentar su pulso cardíaco, para después tomar una nueva medición de su pulso, con el objetivo de que noten que era más rápido que el inicial. De esta forma, los y las estudiantes comprenden el significado de una medición, cómo puede variar en el tiempo según los cambios y entender el concepto de “variable medida”. El académico Juan Ignacio Huircan, realizó una presentación sobre los conceptos generales de la medición de variables mediante sensores. Se explica cómo se utiliza la programación para que los sensores realicen mediciones y obtengan una variable climática (temperatura y humedad), estableciendo una conexión con el invernadero. Se introdujo el concepto de señal y su variabilidad en el tiempo, ejemplificándolo con variables como la temperatura y la humedad. También se explica la relación entre este taller de sensores y el invernadero de la escuela, para que los y las estudiantes comprendan su utilidad y objetivo. Durante el desarrollo del taller, se lleva a cabo una actividad práctica, en donde Doris Sáez Hueichapan, Oscar Poblete y Oscar Villagra se encargaron de realizar mediciones de temperatura y humedad del suelo y del ambiente, utilizando sensores conectados a un microcontrolador ESP8266 en maseteros con plantas. Se puede observar al equipo trabajando en el taller en la Figura 3.4. Este microcontrolador tiene como función enviar los datos de las mediciones realizadas por los sensores a través de wifi, a una página web, en donde se pueden visualizar. Los y las estudiantes utilizaron sus dispositivos, como tablets o celulares, para acceder a la página web, diseñada por el equipo, conectándose a la red wifi proporcionada en el taller, lo cual fue requisito para visualizar las mediciones obtenidas. Así se desarrolla el taller de sensores IoT, ejemplificando con mediciones en tiempo real, logrando apreciar en forma práctica el concepto de variable medida por un sensor. De esta manera, el equipo logra brindar tanto los contenidos como las herramientas relacionadas con los sensores IoT, explica la importancia que puede tener la medición de una variable como la humedad y la temperatura, asociando estos conceptos para su uso en los invernaderos.



(a) Escuela Pública Bajo Yupehue



(b) Escuela Particular Vista Hermosa

Figura 3.4: Taller de “Sensores IoT”

Como se mencionó anteriormente, los talleres tienen el propósito de explicar los conceptos generales del proyecto para que los y las estudiantes adquieran un dominio general de las temáticas relacionadas con la tecnología que se desea implementar. Estas tecnologías se detallan en las siguientes secciones, donde se presenta el planteamiento del sistema tecnológico implementado.

Cada taller es una parte esencial del planteamiento del sistema tecnológico, ya que los conocimientos y temas tratados en ellos se aplican directamente en los invernaderos, incluyendo el uso de energía solar y sensores IoT. Esto permite que los y las estudiantes trabajen en los invernaderos de las escuelas con un conocimiento claro de sus acciones y puedan explicar a los visitantes lo que están haciendo en el lugar. Este trabajo busca validar el trabajo en conjunto con las escuelas rurales, que estos talleres participativos permitan a la comunidad escolar desarrollar sus propios proyectos. El trabajo en conjunto es fundamental para lograr el término de los proyectos y futuros desafíos que se presenten. Los y las estudiantes trabajan en conjunto con el equipo, diseñando e instalando la instrumentación en los invernaderos, todo es un trabajo en equipo, ver Figura 3.5. Este es uno de los objetivos planteados, validar este trabajo de título presentado en forma de talleres participativos, en donde se trabaja en equipo con la comunidad educativa.



(a) Instalación instrumentación con estudiantes.



(b) Momentos de actividades con estudiantes dentro del invernadero.

Figura 3.5: Trabajo en conjunto con estudiantes de Escuela Pública Bajo Yupehue

Es relevante destacar que, aunque los invernaderos inteligentes son solo una de las aplicaciones posibles de IoT/energías renovables que se plantea, el objetivo principal de los talleres es proporcionar a los estudiantes los conocimientos necesarios para que puedan desarrollar sus propias aplicaciones o ideas en el futuro.

Tras completar los talleres participativos, en los cuales se lleva a cabo un trabajo colaborativo para diseñar los invernaderos, se presenta en la siguiente sección de este informe, el planteamiento del sistema tecnológico, el cual detalla la instrumentación que se emplea y se expone el sistema general que se tiene previsto implementar.

3.2. Encuestas talleres participativos

Como se menciona en las secciones anteriores, los talleres participativos se componen de una etapa inicial de saludos y explicación de actividades, luego se realiza una actividad teórica y práctica del taller y por último, se realiza una encuesta relacionada con el taller para corroborar si los y las estudiantes captaron los conceptos generales.

A continuación se expone el resultado de las encuestas para algunos talleres realizados, los cuales se analizan según las respuestas de los y las estudiantes.

- Taller "Importancia del agua": en este taller se analiza una de las preguntas, la cual fue:

¿Qué podemos hacer para cuidar el agua?, en donde los y las estudiantes respondieron, en su mayoría, *No contaminar*, como segundo lugar respondieron *Consumir menos agua* y por último *Plantar más árboles*.

- Taller "Energía renovable": en este taller una de las preguntas analizada es: *¿Por qué es bueno utilizar energías renovables?*, en donde los y las estudiantes respondieron en su mayoría, *Para cuidar el medio ambiente*, como segundo lugar respondieron *Para tener energía eléctrica limpia* y por último *Para tener ahorros en gasto de luz*.
- Taller "Sensores IoT": en este taller una de las preguntas analizada es: *¿Qué magnitud física es importante medir en las plantas?. Nombra al menos una.* en donde los y las estudiantes respondieron en su mayoría *Humedad y temperatura*, como segundo lugar respondieron *El agua*.

3.3. Planteamiento del sistema tecnológico

Para garantizar un buen desarrollo de los cultivos en un invernadero, es esencial mantener condiciones óptimas de temperatura y humedad. Esto implica realizar un monitoreo constante de estas variables, lo cual puede requerir una gran cantidad de tiempo y esfuerzo. Esta situación puede convertirse en un problema si no se dispone de personal dedicado a controlar estas condiciones. Además, muchas personas que tienen invernaderos en sus hogares también enfrentan dificultades debido a sus múltiples responsabilidades, como trabajo, entre otros.

Como solución a este desafío, se propone un diseño de talleres participativos para estudiantes de escuelas rurales indígenas, con el objetivo del diseño e implementación de un invernadero inteligente difusos. El diseño considera sensores y actuadores que, trabajando en conjunto, son capaces de medir y realizar acciones respectivamente, según el controlador difuso, manteniendo así las condiciones ambientales según reglas, dentro de invernaderos. De esta manera, se automatiza el monitoreo y ajuste de la temperatura y humedad, liberando a los usuarios de la tarea constante de supervisión y permitiéndoles dedicar su tiempo a otras responsabilidades. Con esto, los y las estudiantes pueden trabajar los cultivos en los invernaderos, con la ayuda de tecnologías IoT/renovable.

3.4. Sistema general

Trabajar en un invernadero implica una variedad de tareas relacionadas con el cuidado y cultivo de plantas en un entorno controlado. Uno de los aspectos más importantes es el riego de los cultivos. Garantizar que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua mediante el riego por goteo o aspersores es fundamental. Además, es necesario monitorear y controlar constantemente los niveles de temperatura, humedad, luz y CO₂ dentro del invernadero para crear un entorno adecuado para el crecimiento de las plantas.

Estas tareas requieren una dedicación significativa, así como una atención y cuidado constante. El trabajo en un invernadero demanda paciencia, habilidad y compromiso para asegurar el éxito en el cultivo de las plantas. Es por esto que se propone la implementación de un diseño de invernadero inteligente basado en IoT y energías renovables. A través de un software, junto con sensores y actuadores, se realizan mediciones y acciones para mantener las condiciones adecuadas para los cultivos dentro de los invernaderos. Este enfoque busca optimizar y automatizar los procesos de riego y control ambiental, brindando un entorno más eficiente y favorable para el crecimiento de las plantas.

Dentro de los invernaderos, se propone el uso de kits que consisten en nodos sensores y actuadores, los cuales trabajan en conjunto para adquirir y visualizar datos de mediciones. Estos datos son medidos por los sensores y se pueden visualizar en dispositivos digitales como smartphones y tablets.

Para realizar las acciones dentro del invernadero, se tiene un ordenador dentro de cada escuela, ver Figura 3.6, el cual a través de un software recibe la data de los microcontroladores/sensores para efectuar una acción con los actuadores. Este servidor central toma decisiones, dependiendo de la información recibida, para mantener el entorno controlado del invernadero. Esto se explica en mayor detalle en el capítulo siguiente, control PID difuso.



Figura 3.6: Caja de protección servidor central.

En cuanto a la estructura general, se encuentra un estanque cerca del invernadero para almacenar agua destinada al riego. La regulación del nivel de agua en el estanque se lleva a cabo mediante una bomba que es alimentada por paneles solares, como se puede observar en la Figura 3.7.

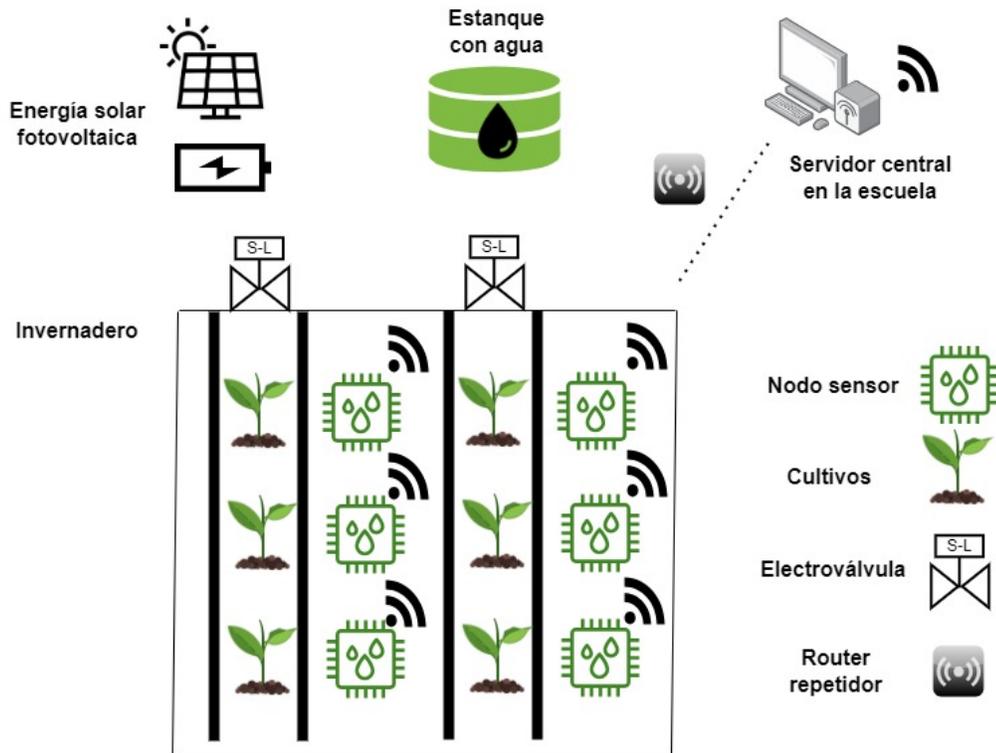


Figura 3.7: Diagrama sistema tecnológico.

Además, se construye una caseta cerca del invernadero que alberga el sistema de energía fotovoltaica. Esta caseta es el lugar donde se encuentran los paneles solares y otros componentes del sistema de generación de energía renovable.

A continuación, se describen los principales componentes del sistema tecnológico del invernadero, comenzando por el tipo de invernadero y el sistema de riego utilizado.

3.4.1. Tipo de invernadero

El tipo de invernadero en donde se desarrolla este trabajo de memoria pertenece a los invernaderos del tipo túnel. Los invernaderos del tipo túnel se caracterizan por su forma de arco o túnel, ver Figura 3.9, el cual proporciona una mayor altura y espacio para el crecimiento de las plantas en comparación con otros tipos de invernaderos. Este tipo de invernadero está compuesto por una estructura metálica o de plástico que forma un arco o techo curvado, con paredes laterales rectas o ligeramente inclinadas. La cubierta del invernadero suele ser de polietileno, policarbonato u otro material transparente que permite el paso de la luz solar necesaria para la fotosíntesis de las plantas. El invernadero tipo túnel se utiliza para proteger los cultivos de condiciones climáticas adversas, como heladas, vientos fuertes o lluvias intensas. Además, crea un ambiente controlado que permite regular la temperatura, humedad, ventilación y niveles de luz, lo que favorece el crecimiento saludable de las plantas y aumenta la producción.

El trabajo de memoria de título se lleva a cabo en dos invernaderos. Uno de ellos pertenece a la Escuela Pública Bajo Yupehue, el cual fue construido por el equipo en junio de 2022, ver Figura 3.8. Este se encuentra a una distancia de 12 metros de la escuela. El segundo invernadero es propiedad de la Escuela Particular Vista Hermosa, y ya estaba construido antes del inicio del proyecto, ver Figura 3.9. Este se ubica a tan solo 6 metros de la escuela.



(a) Invernadero visto por dentro.



(b) Invernadero visto desde fuera.

Figura 3.8: Invernadero construido en la Escuela Pública Bajo Yupehue.



(a) Invernadero visto por dentro.



(b) Invernadero visto desde fuera.

Figura 3.9: Invernadero construido en la Escuela Particular Vista Hermosa.

3.4.2. Tipo de riego

Se utiliza en los invernaderos, el riego por goteo accionado por electroválvulas, el cual es un método de irrigación, que consiste en aplicar agua de manera precisa y controlada directamente a las raíces de las plantas. En este sistema, se utilizan mangueras con pequeños orificios, en donde se coloca un gotero, lo que permite que el agua gotee lentamente cerca de las plantas, el cual se puede observar en la Figura 3.10.

El tipo de riego se utiliza debido a sus ventajas, las cuales son las siguientes: es altamente eficiente en términos de uso de agua, ya que proporciona agua directamente a las raíces de las plantas, minimizando las pérdidas por evaporación y el escurrimiento superficial. También, este método evita el contacto del follaje con el agua, lo que reduce el riesgo de enfermedades

y plagas. Además, permite una aplicación precisa del agua, lo que puede resultar en un mejor crecimiento y desarrollo de las plantas.

El riego por goteo es ampliamente reconocido por su capacidad de adaptarse a la automatización, especialmente mediante el uso de tecnología IoT y sensores. Esta es la principal razón por la cual este método de riego es elegido, ya que la implementación de IoT permite monitorear y controlar el sistema de riego de forma remota. Esta tecnología brinda una gestión del riego más eficiente y precisa, ya que se puede ajustar la cantidad de agua suministrada de acuerdo a las necesidades específicas de las plantas y las condiciones ambientales. Esto asegura que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua en el momento preciso, optimizando su crecimiento y desarrollo.



Figura 3.10: Tipo de riego por goteo

En la siguiente sección, se presenta la idea de *nodo sensor*, la cual se explica en detalle, la estructura, su uso e implementación en los invernaderos.

3.5. Sistema de nodos sensores y actuadores

Un nodo de sensor está equipado con sondas para medir la temperatura y humedad tanto del suelo como del ambiente. Por otro lado, un nodo de actuador contiene electroválvulas, que se utilizan para programar el riego dentro del invernadero, asegurando un desarrollo adecuado de los cultivos. Tanto los nodos de sensor como los de actuador comparten la misma arquitectura, que incluye un microcontrolador, un panel solar y baterías para su alimentación.

Los nodos sensores se clasifican en tres tipos diferentes, los cuales se explican a continuación:

- *Nodo actuador electroválvula (NAE)*: Este nodo es del tipo actuador, posee un sensor de flujo y una electroválvula tipo Latch, ver Figura 3.11. Su principal característica es que una vez que recibe una señal eléctrica para cambiar de estado (abrir o cerrar), la electroválvula mantendrá esa posición sin requerir un suministro constante de energía, que en este caso, el cambio de estado se rige por un módulo relé de cuatro canales, el cual es controlado por el microcontrolador *ESP8266*, el cual es explicado en detalle en secciones posteriores. La electroválvula posee un mecanismo de retención interno que asegura que la válvula permanezca en su última posición hasta que reciba una señal opuesta para cambiar de estado nuevamente. El sistema fotovoltaico instalado proporciona energía eléctrica, de la cual se extraen de 9 [V] DC, provenientes de las baterías. Con esto es posible energizar las electroválvulas tipo Latch, un módulo relé

y un sensor de flujo. Para cada invernadero se instalan dos NAE, con el propósito de controlar dos electroválvulas y por consecuencia, la capacidad de aplicar dos tipos de riego, los cuales pueden ser diferentes. La elección del tipo y los tiempos de riego, está sujeto al tipo y los requerimientos de los cultivos dentro de los invernaderos.

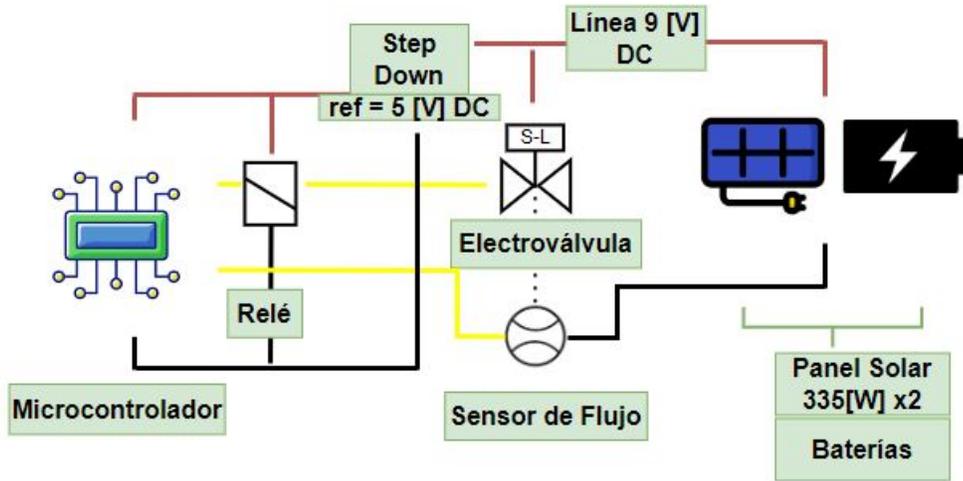


Figura 3.11: Esquemático del NAE.

- *Nodo sensor tierra (NST)*: Este nodo sensor se compone por dos sensores, el *DS18B20* (temperatura de suelo) y *HD-38* (humedad de suelo). También posee un microcontrolador ESP8266, ver Figura 3.12. Este nodo sensor se ubica en distintos puntos del invernadero, para así obtener mediciones de diferentes lugares. Con esto es posible obtener información del estado del invernadero de manera general. El NST se energiza de la misma forma que el NSA, la cual se explica en la siguiente sección. Este nodo sensor es uno de los más importantes para el trabajo de título, ya que se encarga de enviar la información de la humedad de suelo de los cultivos. Esta información es utilizada para controlar la humedad de los cultivos, logrando así un crecimiento favorable de las plantas dentro del invernadero.

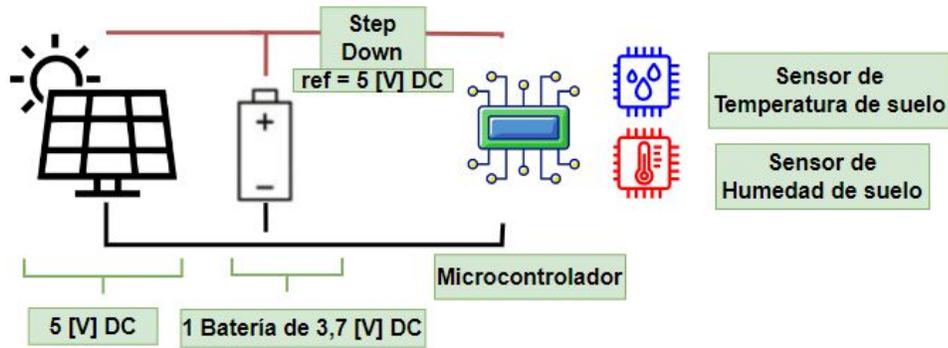


Figura 3.12: Esquemático del *NST*.

- *Nodo sensor ambiente (NSA)*: El nodo sensor de ambiente, se encarga de medir condiciones del microclima del invernadero, tales como temperatura y humedad ambiente. En su interior posee el sensor *AM2315*. Este se ubica en el centro del invernadero, captando una medida general de estas variables. Este nodo sensor solo se encarga de realizar mediciones y enviar los datos a un servidor central ubicado dentro de cada escuela. Por cada invernadero se instala un NSA, el cual se energiza mediante una batería recargable de 3.7 [V] DC. Esta batería se recarga mediante paneles fotovoltaicos de 5 [V]. Con este sistema, es posible energizar el microcontrolador, junto con el sensor *AM2315*. El esquemático de sus conexiones se puede observar en la Figura 3.13.

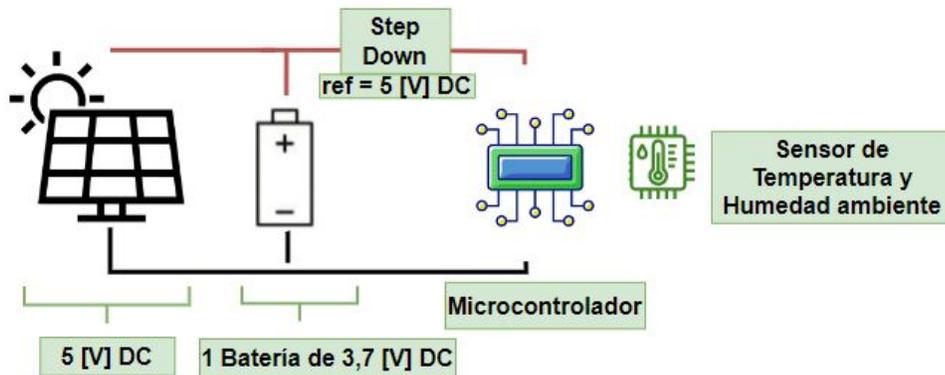
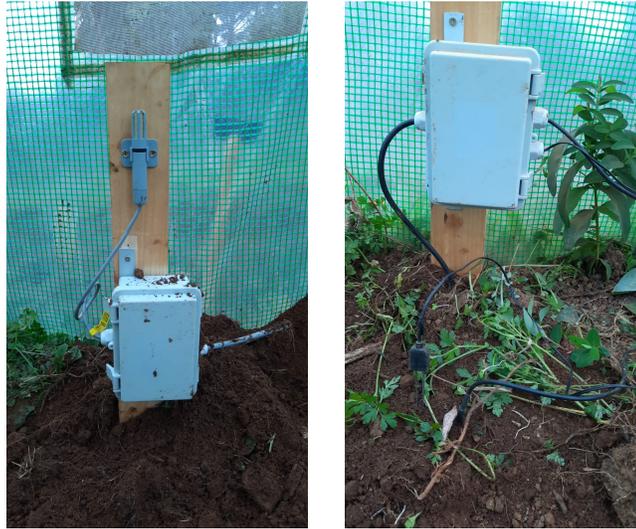


Figura 3.13: Esquemático del *NSA*.

Los nodos sensores son la instrumentación de los invernaderos, los cuales se instalan con una tabla como soporte, en donde dentro de una caja estanca ip 65 para su seguridad frente a agua o cualquier material que pueda afectar a los circuitos dentro de los nodos sensores, ver Figura 3.14. Estos nodos sensores envían la información al servidor central, guardando la data en una base de datos, lo cual se explica en mayor detalle en la sección de envío de información.



(a) Nodo sensor tipo ambiente (NSA) instalado en invernadero.

(b) Nodo sensor tipo tierra (NST) instalado en invernadero.

Figura 3.14: Nodos sensores instalados, fotografía dentro del invernadero.

Los nodos sensores de tierra y de ambiente poseen un sistema de alimentación a base de baterías recargables con paneles solares de bajo voltaje. Los nodos actuadores se energizan mediante paneles fotovoltaicos con almacenamiento energético a base de baterías de mayor potencia. Esto se detalla en la siguiente sección.

3.6. Sistema de energía

El sistema de energía suministra energía a los nodos sensores, lo cual implica alimentar tanto al microcontrolador como a los sensores que se encuentran en su interior. A continuación, se describe detalladamente el proceso de alimentación de cada nodo sensor.

El principal componente de cada nodo sensor es el microcontrolador (ESP8266), el cual necesita un voltaje de entrada de 5 [V] DC para funcionar. La batería encargada de energizar cada nodo sensor es la batería del tipo Litio Li-ion 18650 de 3.7 [V] DC 3350 [mAh]. Para recargar la batería con los paneles fotovoltaicos de 5 [V] DC, se utiliza el módulo cargador de batería Li-ión LiPo *TP4056*, el cual posee dos entradas, *IN +* y *IN -* correspondientes a los 5 [V] DC de los paneles solares. Una vez energizado el módulo *TP4056* a través de los paneles, la batería se conecta a las terminales *BAT +* y *BAT -* para recargar el voltaje de la batería. Para utilizar el voltaje de la batería, se extrae energía a través de las terminales de salida del *OUT +*, *OUT -* del módulo. Gracias a este módulo es que se pueden utilizar las baterías y al mismo tiempo cargarlas con los paneles solares. Se utiliza el módulo *Step Up*, el cual eleva el voltaje de 3.7 [V] DC que llega de la batería a 5 [V] DC. El módulo *TP4056*, posee la seguridad de que la energía no se devuelva al panel fotovoltaico y cause algún deterioro, así se corta el paso de corrientes que puedan existir de retorno al panel.

También en cada escuela, existe un sistema solar fotovoltaico de energía eléctrica, el cual utiliza dos paneles solares de 335 [W] cada uno, para convertir la luz solar en electricidad, ver Figura 3.15. Estos sistemas son una forma sostenible y limpia de producir energía, ya

que no generan emisiones de gases de efecto invernadero ni contribuyen a la contaminación atmosférica.



(a) Paneles solares instalados en Escuela Pública Bajo Yupehue.



(b) Paneles solares instalados en Escuela Privada Vista Hermosa.

Figura 3.15: Paneles solares de mayor potencia, instalados en las escuelas rurales.

El sistema fotovoltaico se compone principalmente de los siguientes elementos:

- **Paneles solares:** Los paneles solares están formados por celdas fotovoltaicas que convierten la radiación solar en electricidad. Estas celdas están hechas de silicio y, cuando se exponen a la luz solar, liberan electrones que generan una corriente eléctrica.
- **Baterías:** para el almacenamiento de energía solar fotovoltaica se utilizan baterías, las cuales son un componente clave en los sistemas solares. Estas baterías permiten almacenar el exceso de energía producido por los paneles solares durante períodos de alta generación (como durante el día) para utilizarla posteriormente cuando la demanda de electricidad es mayor o cuando los paneles solares no están generando suficiente energía (por ejemplo, durante la noche o en días nublados).
- **Inversor:** La corriente eléctrica generada por los paneles solares es de corriente continua (DC). El inversor es el dispositivo encargado de convertir esta corriente continua en corriente alterna (AC), que es la forma de electricidad utilizada en los hogares y las empresas.
- **Sistema de montaje:** Los paneles solares deben ser colocados en una estructura de montaje que los mantenga firmes y bien orientados hacia el sol para maximizar la captación de energía solar.

En la siguiente sección, se presenta la instrumentación que se utiliza en la implementación de los invernaderos en ambas escuelas, junto con los esquemas de posición de los nodos de sensores y actuadores, mostrando también el sistema que cuenta con goteros para que el riego sea controlado mediante goteo directamente en las raíces de los cultivos. Además, se presentan los diagramas P&ID, con la estructura general del sistema tecnológico completo de ambas escuelas.

3.7. Instrumentación invernaderos

Es esta sección se presenta la instrumentación dentro del invernadero. La instrumentación para invernaderos puede incluir una variedad de dispositivos y equipos para monitorear y controlar las condiciones del micro-clima que existe dentro del invernadero, con el objetivo de optimizar el crecimiento de los cultivos. Algunos de los elementos comunes de la instrumentación para invernaderos son: sensores de temperatura y humedad, sensores de luz, sensores de CO₂. Es importante la posición de los sensores, para que las mediciones que capten sean una representación correcta de las condiciones dentro de los invernaderos. La ubicación de los nodos sensores se presenta en la Figura 3.16, para la Escuela Pública Bajo Yupehue, y por la Figura 3.17 para la Escuela Privada Vista Hermosa. El área de cultivo es de aproximadamente 16 m² en cada invernadero.

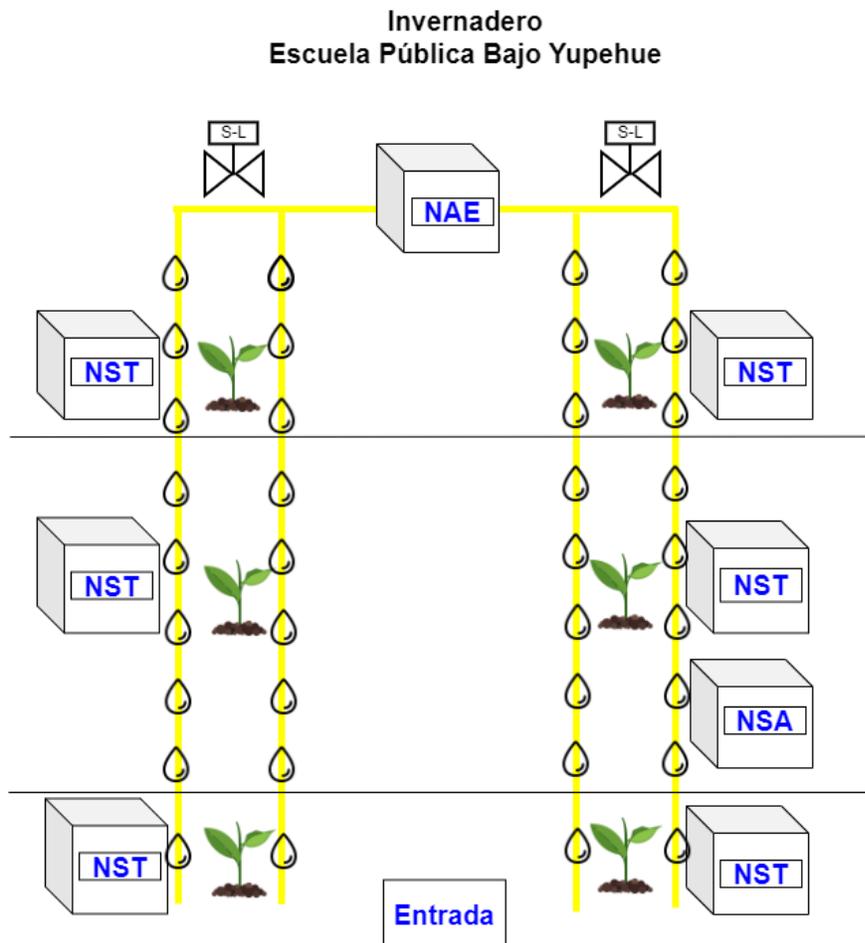


Figura 3.16: Diagrama de conexiones Escuela Pública Bajo Yupehue.

Invernadero Escuela Privada Vista Hermosa

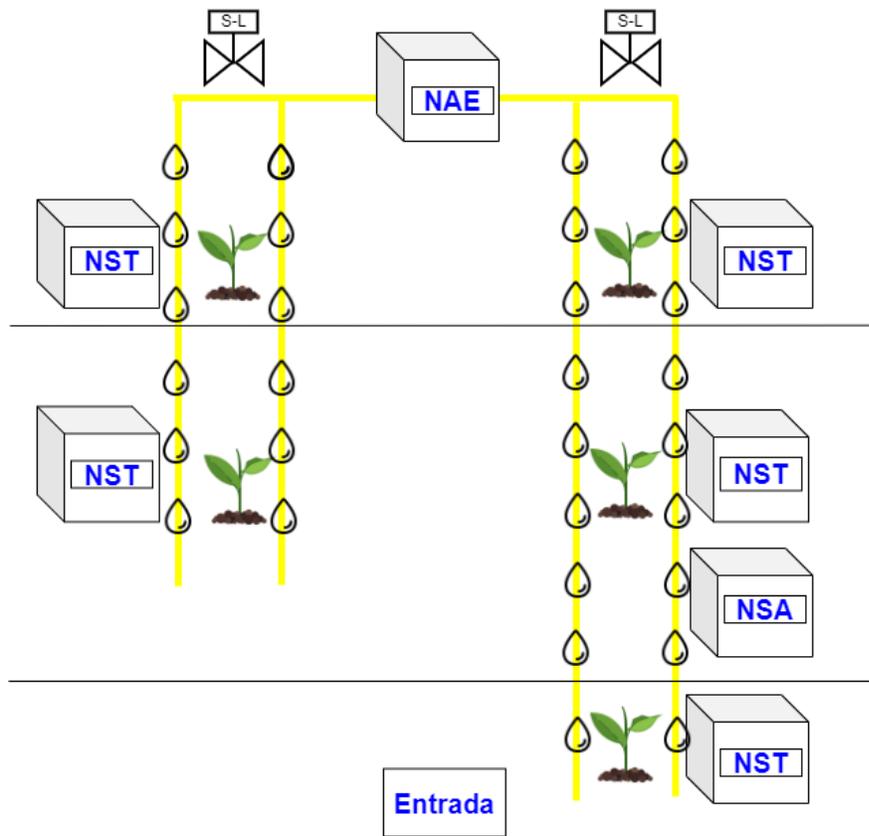


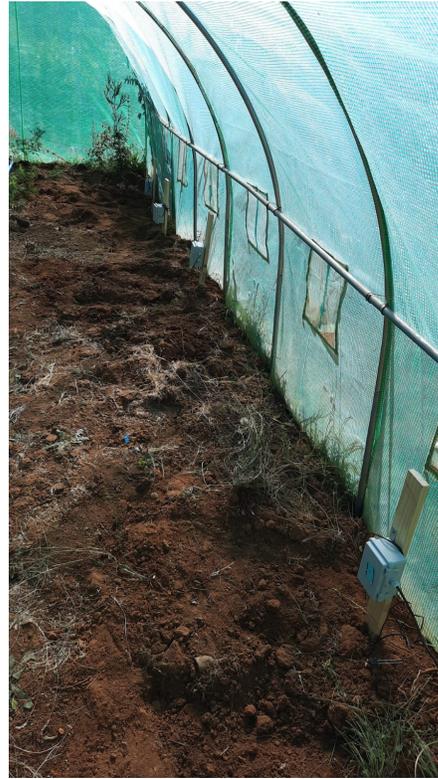
Figura 3.17: Diagrama de conexiones Escuela Privada Vista Hermosa.

Es posible observar que se instalan dos líneas de riego, con una electroválvula por línea. En cada línea de riego se instalan goteros, los cuales se separan por 20 [cm] aproximados entre ellos.

Los nodos sensores están distribuidos cercanos a las paredes de los invernaderos, ya que el panel solar que se encarga de recargar la batería va por fuera del invernadero, con el motivo de recibir el sol de manera directa. Un cable que conecta el nodo sensor con los paneles pasa por debajo del invernadero, para no ocasionar ninguna manipulación del material del invernadero, ver Figura 3.18.



(a) Nodos sensores instalados dentro del invernadero lado izquierdo, cercano a la pared.



(b) Nodos sensores en el lado derecho de medición, dentro del invernadero.

Figura 3.18: Sistema de nodos sensores instalados según el diagrama de conexiones presentado.

Es posible observar que los nodos están apegados a las paredes del invernadero, esto se hace así para no manipular los cultivos y también para pasar el cable que energiza la batería por debajo del invernadero, para luego salir a la superficie a través de un tubo de pvc naranja de 25 [mm], el cual en su parte superior tiene el panel solar, ver Figura 3.19.



(a) Paneles solares instalados en la punta superior del tubo de pvc, cercano a la pared lado izquierdo.



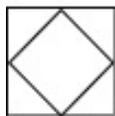
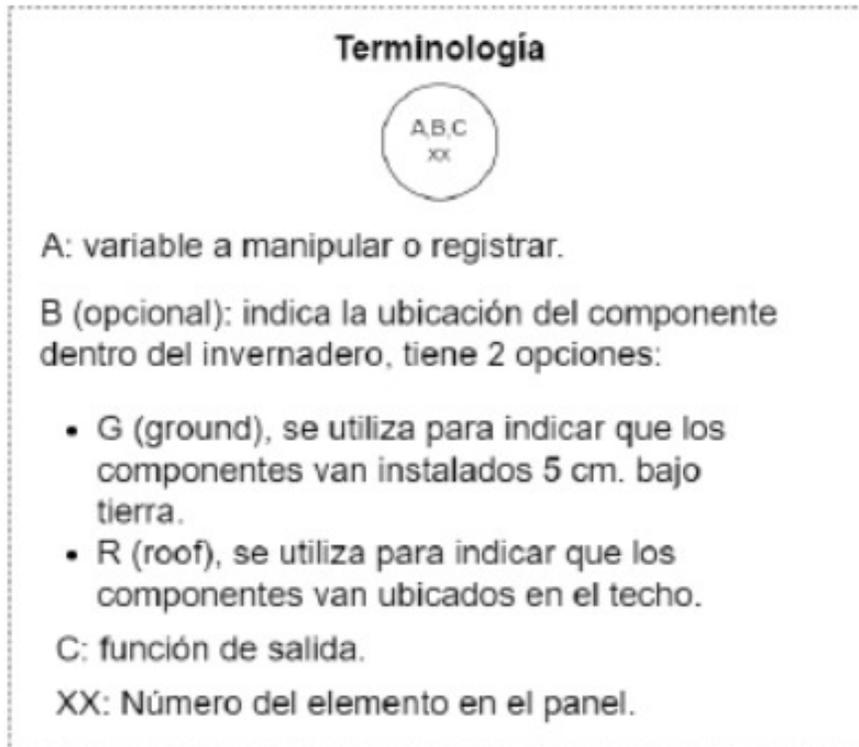
(b) Paneles solares en el otro sector del invernadero, lado derecho.

Figura 3.19: Sistema de paneles solares instalados según el diagrama de conexiones presentado.

Este sistema tiene el propósito de obtener energía del sol de manera directa y no a través del material nylon que cubre al invernadero. Si bien, estos son esquemas generales, en la siguiente sección se presentan los diagramas P&ID, los cuales muestran el detalle de las interconexiones de agua, junto con la disposición específica de los nodos sensores instalados.

3.7.1. Diseño diagramas P&ID

Los diagramas P&ID (Piping and Instrumentation Diagrams o Diagramas de Tuberías e Instrumentación) son representaciones gráficas utilizadas en ingeniería para mostrar de manera detallada los sistemas de tuberías, equipos y la instrumentación involucrada en procesos industriales. Estos diagramas son esenciales para el diseño, operación y mantenimiento de instalaciones industriales y plantas de producción. En esta sección se presentan los diagramas P&ID para ambos invernaderos, los cuales se encargan de mostrar la ubicación de los componentes que se utilizan en la instrumentación del sistema tecnológico. La terminología para los diagramas está dada por la Figura 3.20.



Microcontrolador

Figura 3.20: Terminología diagramas P&ID.

Para la escuela Pública Bajo Yupehue, se tiene el siguiente diagrama P&ID que está dado por la Figura 3.21, en donde se puede apreciar los sensores y actuadores a utilizar en el diseño de los nodos sensores.

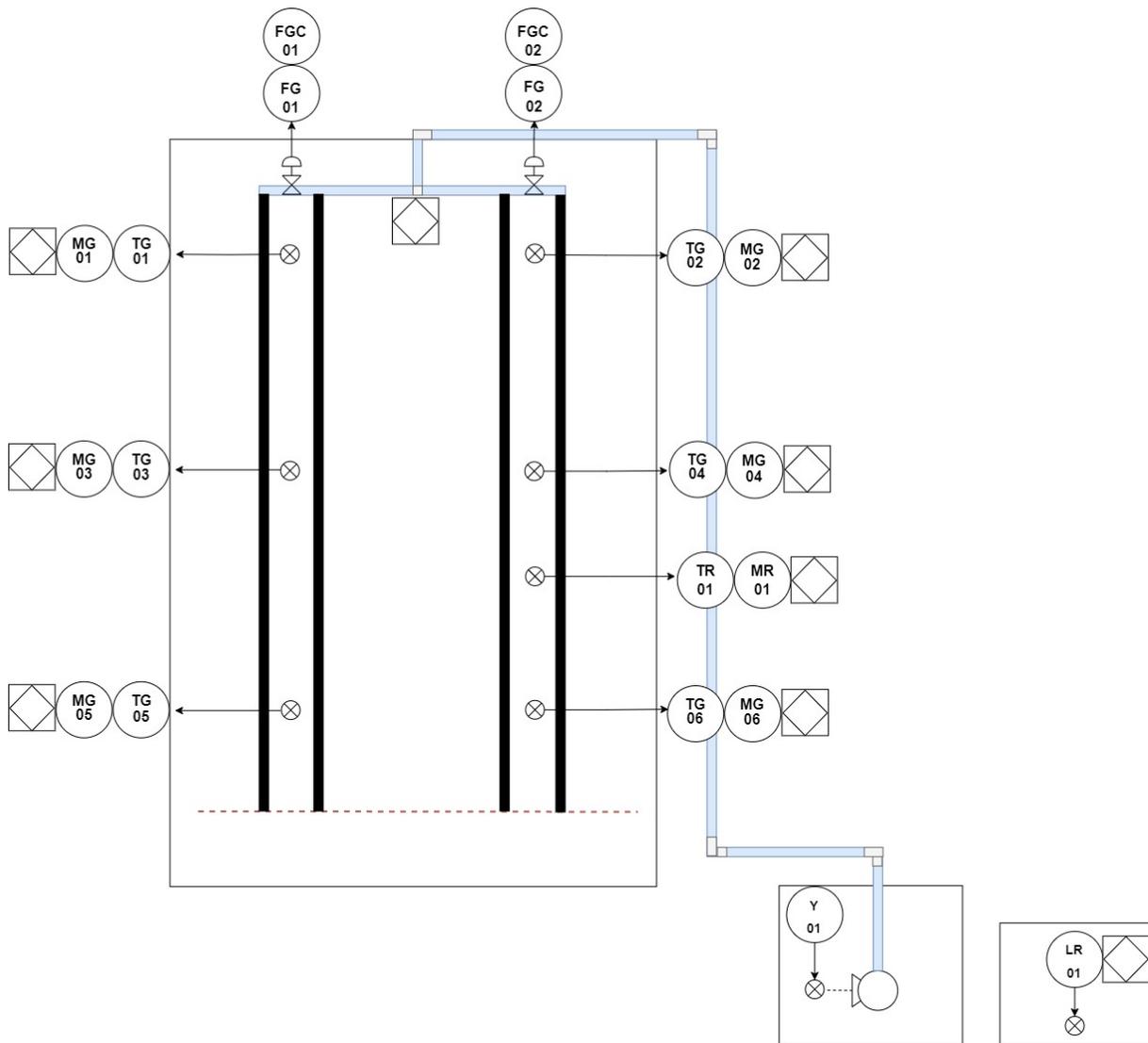


Figura 3.21: Diagrama de conexiones P&ID de la Escuela Pública Bajo Yupehue.

A continuación en la Tabla 3.1 se muestra de forma resumida todos los sensores y actuadores utilizados en el invernadero de la Escuela Pública Bajo Yupehue, además de una breve explicación del mismo, la ubicación que poseerá y el tipo de conexión que se utilizará, además el *TagName* otorgado a cada uno de ellos.

Tabla 3.1: Tabla de sensores y actuadores en invernadero de Escuela Pública Bajo Yupehue.

TagName	Tipo de sensor	Ubicación
LR 01	Sensor de nivel AJ-SR04M (Digital)	Tapa del estanque
MG 01	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 01	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 02	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 02	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 03	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 03	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 04	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 04	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 05	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 05	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
FGC 01	Control de flujo electroválvula (Digital)	En el suelo
FG 01	Sensor de flujo <i>DN25</i> (Digital)	En el suelo
FGC 02	Control de flujo electroválvula (Digital)	En el suelo
FG 02	Sensor de flujo <i>DN25</i> (Digital)	En el suelo
TR 01	Sensor de temperatura ambiente AM2315 (Digital)	En el techo
MR 01	Sensor de humedad relativa de ambiente AM2315 (Digital)	En el techo
Y 01	Bomba de agua (Digital)	En el suelo

Para la Escuela Privada Vista Hermosa, se tiene el siguiente diagrama P&ID que está dado por la Figura 3.22, en donde se puede apreciar los sensores y actuadores en el diseño de los nodos sensores.

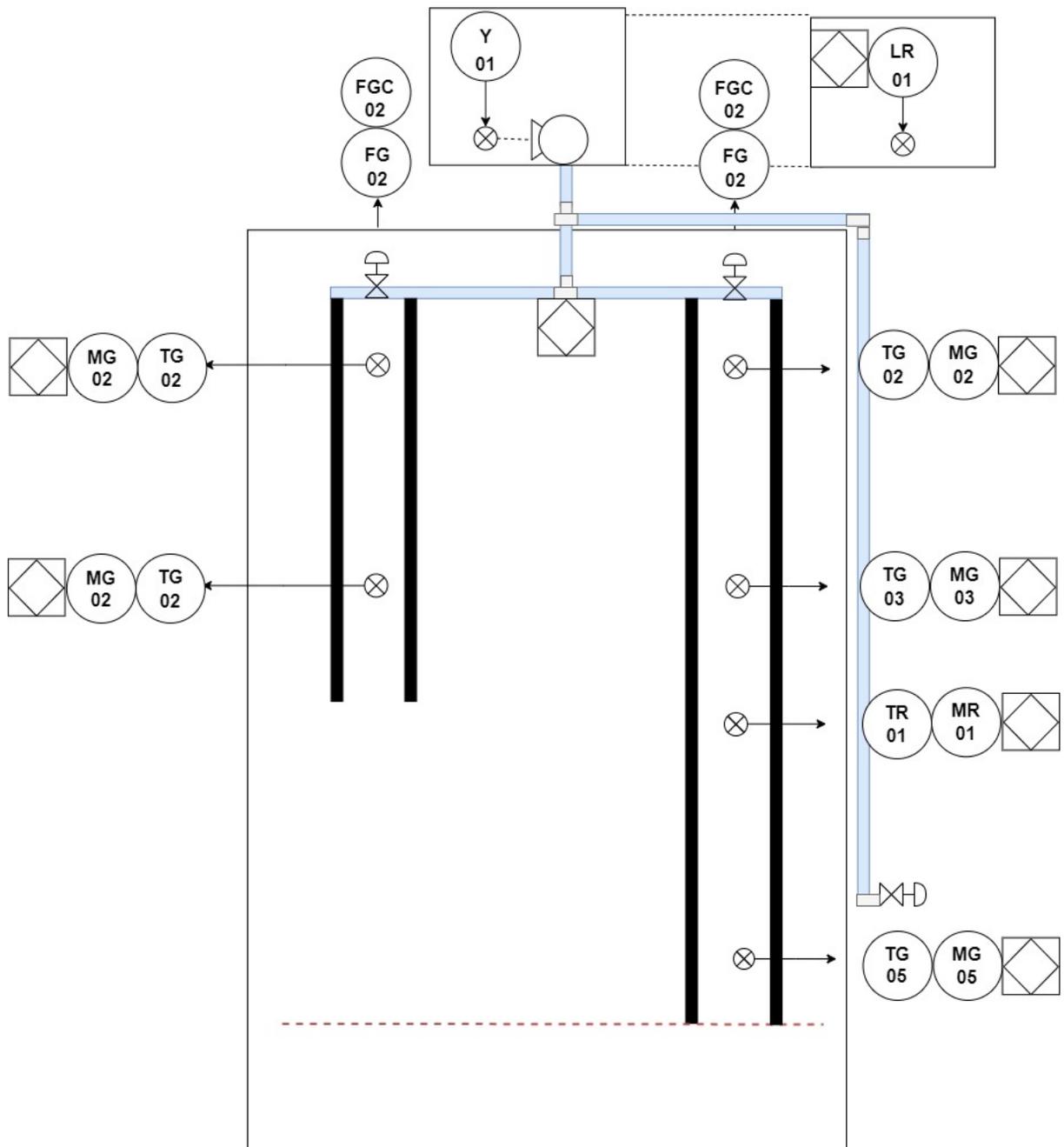


Figura 3.22: Diagrama de conexiones P&ID de la Escuela Privada Vista Hermosa.

De la misma forma, en la Tabla 3.2 se muestra de forma resumida todos los sensores y actuadores utilizados en el invernadero de la Escuela Privada Vista Hermosa, además de una breve explicación del mismo, la ubicación que poseerá y el tipo de conexión que se utilizará, además el *TagName* otorgado a cada uno de ellos.

Tabla 3.2: Tabla de sensores y actuadores en invernadero de Escuela Privada Vista Hermosa.

TagName	Tipo de sensor	Ubicación
LR 01	Sensor de nivel AJ-SR04M (Digital)	Tapa del estanque
MG 01	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 01	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 02	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 02	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 03	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 03	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 04	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 04	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
MG 05	Sensor de humedad relativa de suelo <i>HD</i> – 38 (Analógico)	En el suelo
TG 05	Sensor de temperatura de suelo DS18B20 (Digital)	En el suelo
FGC 01	Control de flujo electroválvula (Digital)	En el suelo
FG 01	Sensor de flujo <i>DN25</i> (Digital)	En el suelo
FGC 02	Control de flujo electroválvula (Digital)	En el suelo
FG 02	Sensor de flujo <i>DN25</i> (Digital)	En el suelo
TR 01	Sensor de temperatura ambiente AM2315 (Digital)	En el techo
MR 01	Sensor de humedad relativa de ambiente AM2315 (Digital)	En el techo
Y 01	Bomba de agua (Digital)	En el suelo

A continuación, se presentan los sensores, actuadores y el microcontrolador que se utiliza en el sistema tecnológico de los invernaderos, junto con sus funciones, según nomenclatura de los diagramas P&ID.

3.7.2. Sensores, actuadores y microcontrolador

En los diagramas *P&ID* se presenta más detalle de cada elemento (sensor, actuador) dentro del invernadero. La instrumentación utilizada en los invernaderos, en cada nodo sensor y cada nodo actuador, se muestra a continuación.

- Sensor de temperatura ambiente (TagName TR - P&ID) y humedad ambiente (TagName MR - P&ID):

Para realizar las mediciones de temperatura y humedad ambiente se utiliza el sensor *AM2315*. Este sensor está ubicado en la parte central de cada invernadero, con el propósito de tener una medición de condiciones ambiente general. El sensor *AM2315* utiliza un protocolo de comunicación de interfaz serie de un solo cable, conocido como protocolo de comunicación I2C, para enviar las lecturas digitales de temperatura y humedad a un microcontrolador o un ordenador, tal como se puede apreciar en la Figura 3.23 izquierda. El principio de funcionamiento del sensor *AM2315* se basa en la variación de la capacitancia de los sensores de temperatura y humedad en respuesta a los cambios en la temperatura y la humedad relativa del ambiente. Estas variaciones de capacitancia se

convierten en señales eléctricas, que luego son procesadas por el chip interno del sensor para proporcionar las lecturas de temperatura y humedad en formato digital.

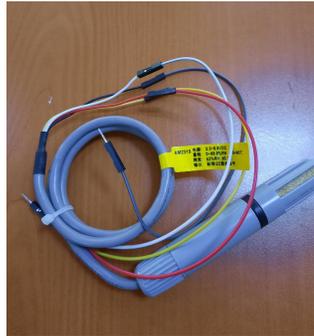
- Microcontrolador (Simbolizado en P&ID por un rombo dentro de un cuadrado):

El microcontrolador utilizado en la implementación es la *ESP8266 V2*. El microcontrolador ESP8266 es un chip altamente integrado que combina un procesador central (CPU), una unidad de procesamiento de señal digital (DSP), memoria flash, RAM, y una interfaz wifi en un solo chip. El principio de funcionamiento del microcontrolador ESP8266 se basa en su arquitectura de sistema en chip (SoC) y en su capacidad para ejecutar programas de usuario.

El ESP8266 cuenta con una interfaz wifi integrada, que permite la conexión a redes inalámbricas de forma inalámbrica, la cual se puede apreciar en la Figura 3.23 derecha.

El principio de funcionamiento del microcontrolador ESP8266 se basa en su arquitectura SoC y en su capacidad para ejecutar programas de usuario escritos en C, C++, micropython, o LUA. El ESP8266 también cuenta con una interfaz wifi integrada para la conexión inalámbrica a redes.

Se utiliza este microcontrolador por su conexión inalámbrica a wifi, la cual permite el envío de información desde los sensores hacia un computador, el cual es un servidor central de datos. Este computador es el que acciona a los actuadores dentro del invernadero. Este tipo de microcontrolador convierte el sistema en uno inalámbrico, los sensores medirán y la ESP8266 se encargará de enviar estos datos al computador. En cada nodo sensor y nodo actuador hay un microcontrolador ESP8266.



(a) Imagen del sensor utilizado para medir temperatura y humedad ambiental.



(b) Microcontrolador utilizado para el envío de datos a través de wifi.

Figura 3.23: Sensor AM2315 y microcontrolador ESP8266 utilizados.

- Sensor de temperatura de suelo (TagName TG -P&ID):

El sensor *DS18B20* es un sensor de temperatura digital de alta precisión que utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire para enviar datos de temperatura a un microcontrolador.

El principio de funcionamiento del sensor *DS18B20* se basa en la medición de la resistencia eléctrica de un elemento sensor de temperatura que está construido en un encapsulado de acero inoxidable, el cual se puede apreciar en la Figura 3.24 izquierda. El elemento sensor consiste en un termistor de platino que cambia su resistencia en función de la temperatura.

Se utiliza el sensor *DS18B20* por su gran precisión. Este sensor tiene como objetivo medir temperatura de suelo en un punto específico del invernadero. Este tipo de sensor está ubicado en distintos puntos de los cultivos, con el propósito de obtener información representativa de la temperatura del suelo. El protocolo de comunicación 1-Wire utiliza un solo cable de datos para enviar señales digitales de y hacia el sensor *DS18B20*. El microcontrolador envía una señal de inicio al sensor a través del cable de datos y el sensor responde con la lectura de temperatura actual.

- Sensor de humedad de Suelo (TagName MG - P&ID):

Para realizar la medición de la humedad del suelo se utiliza el sensor *HD-38*. Esto lo realiza mediante una sonda con dos terminales separados adecuadamente resistentes a la oxidación.

El principio de funcionamiento del sensor *HD-38* es resistivo. La sonda que posee está hecha de un material conductor y se coloca en el suelo, tal como se puede apreciar en la Figura 3.24 derecha. La cantidad de agua en el suelo afecta la conductividad eléctrica de la sonda, lo que a su vez afecta la resistencia eléctrica de la sonda. La resistencia eléctrica medida se convierte en una señal de voltaje que se puede leer y procesar. La señal entregada es analógica y es procesada por el microcontrolador.



(a) Imagen del sensor utilizado para medir temperatura de suelo.



(b) Imagen del sensor utilizado para medir humedad de suelo.

Figura 3.24: Sensor temperatura de suelo DS18B20 y sensor de humedad de suelo HD-38

- Sensor de flujo (TagName FG - P&ID):

Se utiliza el sensor de flujo *DN25* para determinar si existe o no flujo de agua cuando se está regando en el invernadero. El sensor de flujo utiliza un principio de medición de velocidad para medir la cantidad de fluido que fluye a través del conducto. El sensor de flujo DN25 está compuesto por un cuerpo de acero inoxidable con un orificio de entrada y un orificio de salida. En el interior del cuerpo del sensor, hay un elemento de medición, como un rotor, que se mueve en proporción a la velocidad del flujo de líquido, tal como se puede apreciar en le Figura 3.25 izquierda.

También se utiliza para evitar pérdidas de agua, ya que corrobora que se estén regando los cultivos del invernadero y cuando no se esté regando, que no exista flujo de agua por las tuberías. Este sensor tiene una conexión nominal a tuberías de 1".

- Electroválvula solenoide Latch Hunter (TagName FGC - P&ID):

Para realizar el riego de los cultivos, se utiliza una electroválvula solenoide latch hunter. El principio de funcionamiento de la electroválvula solenoide Latch Hunter se basa en la aplicación de un campo magnético para activar el solenoide y controlar el flujo de agua a través de la válvula. La electroválvula solenoide Latch Hunter también tiene una función de "latch", que permite que la válvula se mantenga en la posición abierta o cerrada sin requerir una corriente eléctrica constante. Cuando se aplica una corriente eléctrica a la bobina solenoide, la válvula se abre o cierra, pero luego se mantiene en esa posición gracias a una palanca de "latch" que bloquea el núcleo móvil en su posición actual, como se puede apreciar en la Figura 3.25 derecha. Esta característica permite que la válvula permanezca abierta o cerrada incluso si se interrumpe el suministro eléctrico.



(a) Imagen del sensor de flujo de agua DN25.



(b) Imagen de electroválvula solenoide latch hunter.

Figura 3.25: Sensor DN25 y Electroválvula Solenoide Latch Hunter.

- Sensor de nivel AJ-SR04 (TagName LR - P&ID):

El sensor *AJ-SR04* es el que se utiliza para realizar la medición de la cantidad de agua que hay dentro del estanque del invernadero. El objetivo es que la cantidad de agua dentro del estanque siempre sea suficiente para realizar riegos en los cultivos. El sensor *AJ-SR04* es del tipo ultrasónico y se utiliza para medir la distancia entre el sensor y la superficie de un líquido. El principio de funcionamiento del sensor de nivel AJ-SR04 se basa en la medición del tiempo que tarda una onda ultrasónica en viajar desde el sensor hasta la superficie del líquido y regresar al sensor.

El sensor de nivel AJ-SR04 emite una señal ultrasónica de alta frecuencia a través de un transductor y luego detecta la señal reflejada por la superficie del líquido. La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el aire es constante, por lo que la distancia se puede calcular midiendo el tiempo que tarda la señal en viajar de ida y vuelta entre el sensor y la superficie del líquido, con lo que se obtiene la cantidad de agua en el estanque. Este sensor se puede apreciar en la Figura 3.26 izquierda.

- Bomba de agua (TagName Y - P&ID):

Se utiliza una bomba centrífuga para llenar el estanque con agua. El principio de funcionamiento de la bomba centrífuga se basa en la rotación de un impulsor con paletas en una carcasa curva llamada voluta. A medida que el impulsor gira, la fuerza centrífuga mueve el líquido hacia las paletas, lo dirige hacia la voluta y lo impulsa hacia la salida de la bomba. Esta bomba se puede apreciar en la Figura 3.26 derecha.



(a) Imagen del sensor de nivel AJ-SR04. (b) Imagen de bomba centrífuga de agua.

Figura 3.26: Sensor de nivel y bomba de agua.

Finalmente, en la siguiente sección se detalla el proceso de envío de datos desde los nodos sensores hacia el servidor central, ubicado en cada escuela. En esta sección, se explica la forma y el método empleado para llevar a cabo esta transferencia de información.

3.8. Sistema de envío de información y visualización

La interfaz web incluye un conjunto de paneles interactivos que hace posible visualizar las mediciones alojadas dentro de una base de datos, la cual está vinculada a los nodos *Internet of Things* sensores y actuadores. Cada diez minutos, los nodos de sensores adquieren las mediciones y la envía a través de WiFi utilizando el protocolo MQTT a un servidor en la escuela. Cada vez que llega un mensaje al servidor, se carga en una base de datos PostgreSQL. La interfaz web realiza consultas periódicas a la base de datos para mantener actualizados los datos numéricos y gráficos del invernadero. El mismo proceso se lleva a cabo para transmitir los cambios a los controladores de las electroválvulas. En la Figura 3.27 se muestra uno de los paneles desplegados por el servidor web instalado en el servidor. El panel presenta la temperatura y humedad ambiente, así como el flujo de agua de riego. El servidor web puede funcionar de forma autónoma, proporcionando cobertura WiFi a la escuela y permitiendo la interacción con los invernaderos, incluso cuando se interrumpe la conexión a la nube. Esto es especialmente relevante debido a la escasa conectividad a Internet en las escuelas, producto del aislamiento de la comunidad.

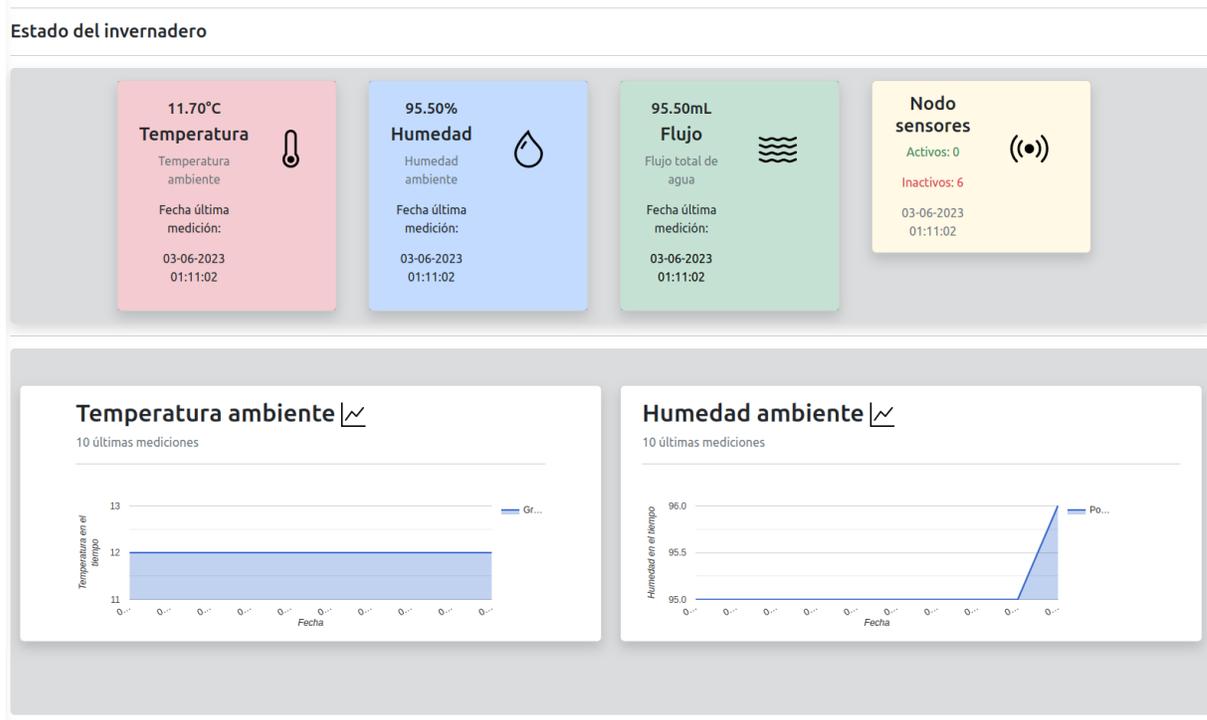


Figura 3.27: Panel desplegado por el servidor web instalado en el servidor PC. (Desarrollado principalmente por estudiante Oscar Villagra, de la Universidad de la Frontera, Temuco, Chile.)

3.9. Discusión

Este capítulo presenta el sistema tecnológico utilizado para el diseño e implementación de los invernaderos inteligentes. Se detalla la realización de los talleres participativos, que buscan la participación activa de los estudiantes de las escuelas rurales indígenas. Estos talleres participativos abren las puertas de cosas que los y las estudiantes no están acostumbrados a ver, como lo es la tecnología *Internet of Things* y energía renovable. Este enfoque permite a los y las estudiantes tomar rumbo de sus propios proyectos y desafíos a futuro, considerando desde ya lo visto en los talleres participativos. Es importante ver que las encuestas realizadas en los talleres participativos, demuestran el aprendizaje de los y las estudiantes de las escuelas rurales, dado que sus respuestas indican el entendimiento de los contenidos que se ven en cada taller. La comunidad escolar juega un rol importante, ya que estas herramientas entregadas son para apoyarse en la tecnología IoT/energía renovable.

Una vez planificados los talleres, se presenta la instrumentación que se utiliza, explicando cómo esta contribuye al sistema tecnológico. Esta instrumentación permite realizar mediciones y acciones dentro del invernadero para monitorear y modificar las condiciones del microclima. Se describe la distribución de los nodos sensores en los invernaderos, junto con el sistema general de construcción a través de los diagramas P&ID.

Es importante resaltar que con la instrumentación utilizada, específicamente el sensor de humedad relativa del suelo *HD-38* y el microcontrolador *ESP8266*, se pueden obtener datos sobre la humedad de la tierra dentro del invernadero. Gracias a esto, al sistema de transmisión de información de datos y las electroválvulas instaladas, es posible llevar a cabo acciones

de riego dentro del invernadero. Por lo tanto, se requiere un control sobre el riego, un control sobre las acciones de riego dentro del invernadero.

Es importante mencionar que los invernaderos están equipados con múltiples sensores, lo que permite el control de diversas variables del microclima, como la temperatura y humedad del ambiente. No obstante, para efectuar cambios en estas condiciones, se requeriría la implementación de un sistema actuador, tal como ventanas operadas por motores o ventiladores activados mediante módulos relés, entre otras opciones posibles. En este trabajo de título, solo se enfoca en el control de la humedad del suelo. Por esta razón, en el siguiente capítulo se propone un controlador PID difuso cuyo objetivo es controlar el riego de los cultivos de acuerdo con los requerimientos de humedad de suelo, según los agricultores y el personal de las escuelas rurales.

Capítulo 4

Diseño e Implementación de un Controlador Basado en Reglas

Una vez finalizado el capítulo 3, en el cual se describe detalladamente el sistema tecnológico empleado, se aborda la instrumentación, las conexiones y las etapas que conforman este sistema, se procede al siguiente capítulo: el diseño e implementación de un control PID difuso para regular la humedad del suelo en invernaderos. Gracias a esta infraestructura que se implementa, es posible automatizar el funcionamiento del sistema mediante un control específico. En particular, se presenta el control PID difuso, encargado de mantener la humedad del suelo, lo cual es esencial para favorecer el desarrollo de los cultivos dentro de los invernaderos.

4.1. Planteamiento del problema

Como se menciona anteriormente, los invernaderos poseen un sistema tecnológico capaz de realizar mediciones de variables del microclima, tales como: temperatura y humedad ambiente, temperatura y humedad de suelo. También poseen actuadores que permiten realizar acciones tales como: electroválvulas, las cuales permiten abrir y cerrar el paso de agua para el riego en el invernadero, regulando así la humedad y la temperatura de la tierra. El sistema que se va a controlar son dos invernaderos de la comunidad lafkenche José Painecura Hueñalihuen de la comuna de Carahue. En estos invernaderos se cultivan distintos tipos de vegetales y verduras, las cuales tienen distintos tipos de requerimientos al momento de regar. El agua para el riego se almacena en un estanque elevado cercano al invernadero, el cual se rellena con una vertiente. El riego de los cultivos es del tipo por goteo y lo realiza una electroválvula que se energiza con paneles solares y baterías propios del invernadero.

Entonces, el desafío es controlar el microclima del invernadero utilizando la medición de los sensores, para que según las reglas del controlador se activen los actuadores de acuerdo a los requerimientos de manera automática. Se utiliza la instrumentación definida en el capítulo 3, la cual posee características adecuadas para el uso de tecnología IoT/renovable. Además, se aplican los conceptos trabajados en los talleres participativos en esta implementación.

4.2. Sistema experto difuso propuesto

En esta sección se presenta el desarrollo de un sistema experto difuso, el cual tiene como objetivo controlar la apertura y cierre de las electroválvulas para regar en el invernadero.

4.2.1. Diagrama de control

El diagrama de control considera como entrada y salida del sistema la referencia de humedad de suelo y la medición de humedad de suelo del invernadero respectivamente. La diferencia entre la referencia de humedad de suelo y la medición de la humedad de suelo es la entrada al controlador. La salida del controlador es una acción de control de riego al invernadero, es decir, si se debe regar o no. Esta acción de control ingresa al bloque PWM, el cual dependiendo de la referencia impuesta de humedad de suelo, considera la cantidad de tiempo que debe regar, es decir, si se encuentra lejos de la referencia, es decir, un cambio en acción de control de mayor valor, debe regar una mayor cantidad de tiempo. Por otro lado, si el valor de humedad de suelo está cercano a la referencia, es decir, se tiene un cambio en la acción de control pequeño, se debe regar poco, por lo cual el PWM regula la cantidad de riego dependiendo de los valores de la salida del controlador. Este diagrama de control basado en reglas difuso se puede apreciar en la Figura 4.1.

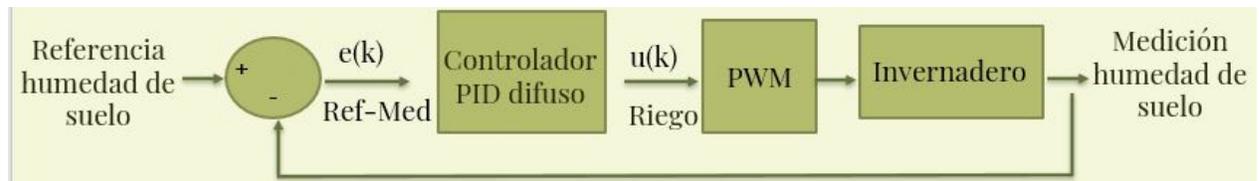


Figura 4.1: Diagrama de control general para riego invernadero.

4.2.2. Controlador PID difuso

El controlador PID difuso de la Figura 4.2, utiliza un conjunto de reglas que describen el comportamiento del sistema en diferentes situaciones. De esta manera, el controlador es capaz de adaptarse a cambios en las condiciones del sistema y proporcionar una respuesta en tiempo real.

El objetivo del controlador PID difuso es minimizar el error entre la entrada deseada y la salida real del sistema. Es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo control de procesos industriales, robótica, sistemas de transporte y control de temperatura, entre otros. ([19], [20], [21]).

El control difuso se presenta en la Figura 4.2. Las entradas son el error y el cambio en el error, considerando GE, GDE y GU como parámetros sintonizados. La salida es el cambio en la acción de control.

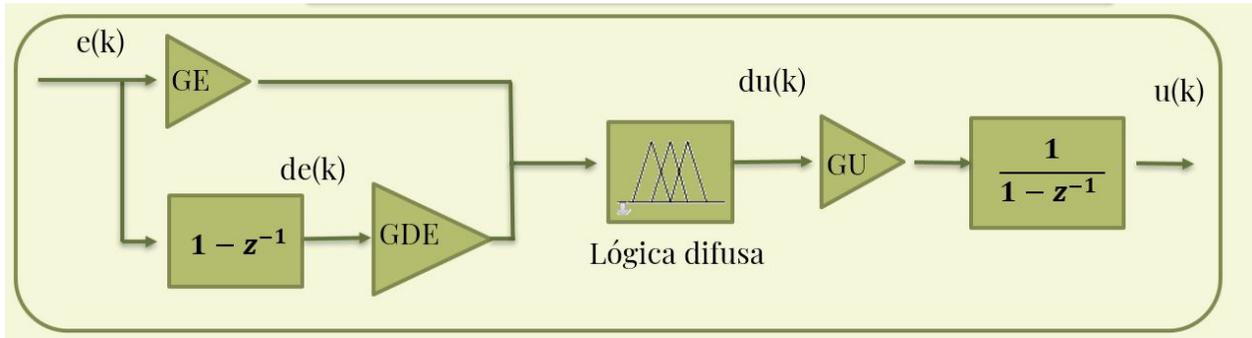


Figura 4.2: Diagrama de un PID difuso.

Para diseñar un control difuso se deben realizar cuatro etapas, las cuales se describen a continuación.

- **Interfaz de fusificación:** En esta etapa se transforman las variables de entrada del modelo en variables difusas. Para esta interfaz se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia. En este caso, las variables a transformar son el error $e(k)$ y el cambio del error $de(k)$. El error está definido por la diferencia entre la referencia de humedad de suelo y la medición de humedad de suelo del invernadero, representado por la ecuación $e(k) = ref(k) - med(k)$. El cambio del error está dado por la ecuación $de(k) = e(k) - e(k-1)$. Las variables de entrada del error y el cambio del error transformadas a conjuntos difusos se pueden apreciar en la Figura 4.3, en donde se consideran tres conjuntos difusos, *Positivo*, *Zero* y *Negativo*, para el error.

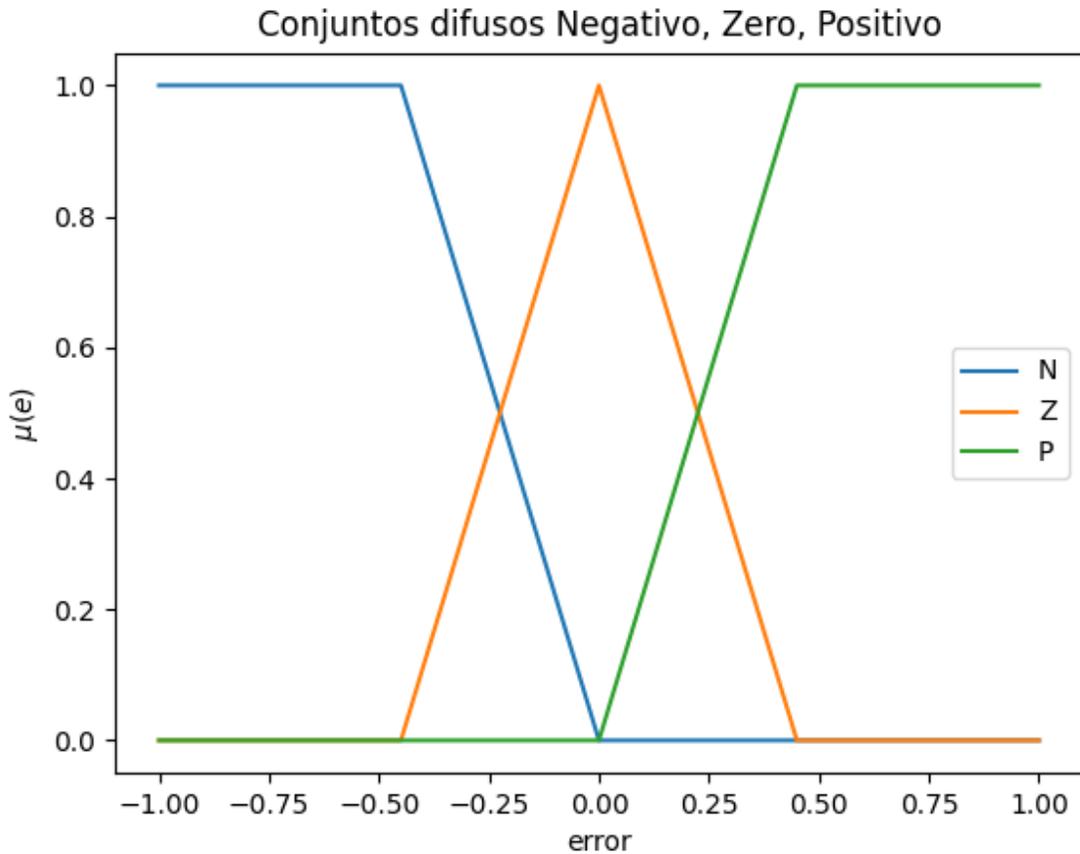


Figura 4.3: Conjuntos difusos para el error y cambio en el error con sus funciones de pertenencia asociados.

- Base de conocimientos: Contiene las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos. Esta base de conocimientos considera todas las posibles combinaciones para todos los conjuntos difusos. Dado que se consideran tres conjuntos difusos para el error y el cambio del error, las decisiones se guían por una base de reglas.

Las nueve reglas son las siguientes:

1. Si $e(k)$ es N y $de(k)$ es N, entonces $du(k)$ es N
2. Si $e(k)$ es N y $de(k)$ es Z, entonces $du(k)$ es N
3. Si $e(k)$ es N y $de(k)$ es P, entonces $du(k)$ es Z
4. Si $e(k)$ es Z y $de(k)$ es N, entonces $du(k)$ es N
5. Si $e(k)$ es Z y $de(k)$ es Z, entonces $du(k)$ es Z
6. Si $e(k)$ es Z y $de(k)$ es P, entonces $du(k)$ es P
7. Si $e(k)$ es P y $de(k)$ es N, entonces $du(k)$ es Z
8. Si $e(k)$ es P y $de(k)$ es Z, entonces $du(k)$ es P
9. Si $e(k)$ es P y $de(k)$ es P, entonces $du(k)$ es P

Las reglas indican qué tipo de respuesta debe tener el controlador dependiendo del conjunto difuso que pertenezca.

Cabe destacar que la variable de salida en la base de reglas es el cambio en la variable manipulada $du(k)$ que es la salida del controlador PID difuso.

- **Motor de inferencia:** Realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada $e(k)$ y $de(k)$, mediante las reglas del controlador y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida. En esta etapa es donde se calcula el cambio en la acción de control $du(k)$, la cual significa cómo es que debe variar la acción de control dado lo que esté ocurriendo en el invernadero. Es acá donde el controlador designa si se debe regar o no, siguiendo la referencia impuesta. Cabe destacar que este cambio en la acción de control es aún difuso, por lo que es necesario defusificar. El motor de inferencia considera la base de reglas y determina el grado de pertenencia a los conjuntos difusos para luego unir los conjuntos difusos.
- **Interfaz de defusificación:** Este elemento provee salidas discretas y determinísticas a partir de los conjuntos difusos de salida obtenidos como resultado de la inferencia. Acá finalmente es donde se obtiene un cambio en la acción de control no difusa, sino que un valor de acuerdo a los requerimientos de cultivos. Luego de que se realiza el método de inferencia para las nueve reglas, se unen los resultados de todos los conjuntos difusos para cada regla y dependiendo del método de defusificación escogido es que se puede obtener una salida del controlador.

4.3. Implementación del controlador en laboratorio

Se realiza una prueba en laboratorio del controlador, la cual consiste en realizar mediciones de temperatura y humedad de suelo en un cultivo cactus, ver Figura 4.4.



Figura 4.4: Prueba en laboratorio con cultivo cactus.

Esta prueba tiene por objetivo probar el funcionamiento del sistema de envío de información y accionamiento del controlador. La prueba consiste en medir cada 10 minutos las condiciones de humedad y temperatura de suelo, durante el periodo de tiempo desde las 00:08 am hasta las 15:24 pm, en donde a las 12:55 pm se le pone agua al cactus como perturbación al sistema. Esta perturbación es vital en esta prueba, ya que no se considera el uso de electroválvulas, dado que solo se quiere probar si el controlador indica si debe realizar o no el riego. Se considera una referencia de humedad de suelo del 50[%], las ganancias del controlador PID Difuso del $GE=0.02$, $GDE=0.01$ y $GU=1$ siguiendo el diagrama de la Figura 4.5.

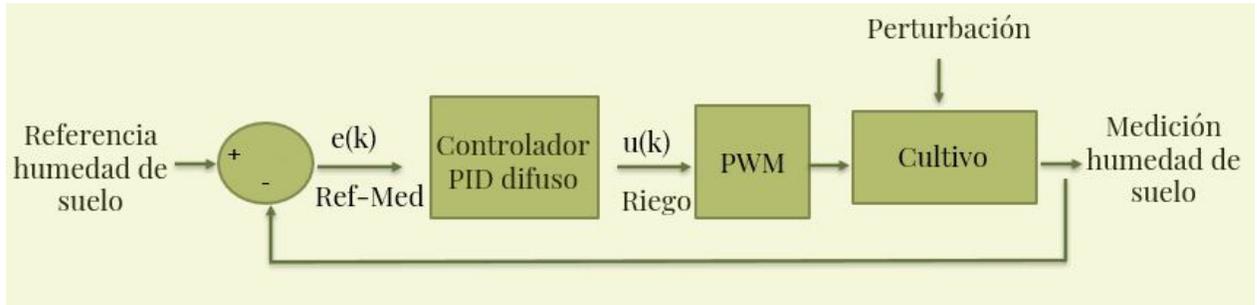


Figura 4.5: Diagrama de control para prueba en laboratorio con cultivo cactus.

Los resultados de la prueba en laboratorio se pueden ver en los siguientes gráficos de la Figura 4.6. Se miden las condiciones de humedad de suelo durante el periodo mencionado anteriormente, en donde se puede ver que se mantiene la humedad de suelo en torno a los 44[%] de humedad, pero a las 12:55 pm, en donde se realiza la perturbación, es decir, se le pone un poco de agua al cultivo, se puede ver que la humedad de suelo sube al valor de 54[%], superando así el valor de referencia impuesta de 50[%] de humedad. Luego de esta perturbación, se puede ver que la humedad empieza a disminuir, ya que se empieza a secar la tierra.

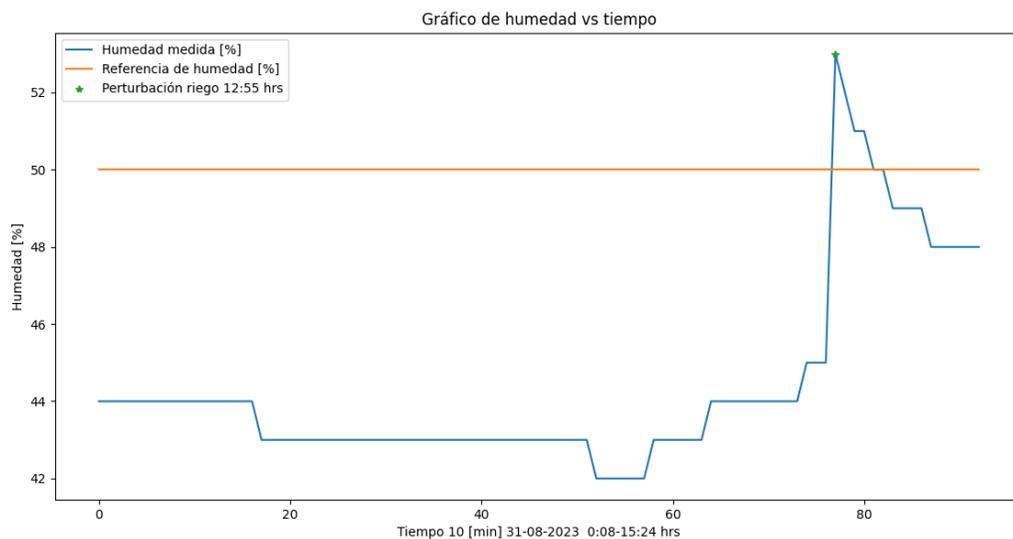


Figura 4.6: Gráfico de humedad medida vs. tiempo cada 10 minutos.

Para verificar el funcionamiento del controlador, se puede observar en la Figura 4.7, que el controlador indica que se debe regar en todo momento que la medición de humedad de suelo está por debajo de la referencia impuesta 50[%] de humedad. Una vez que se realiza la perturbación a las 12:55 pm, el controlador ordena que no se debe regar, pues se superó el valor de referencia de humedad, ver en la Figura 4.7, el asterisco naranja. Luego, una vez que la tierra disminuye su humedad de suelo, el controlador señala que se debe regar.

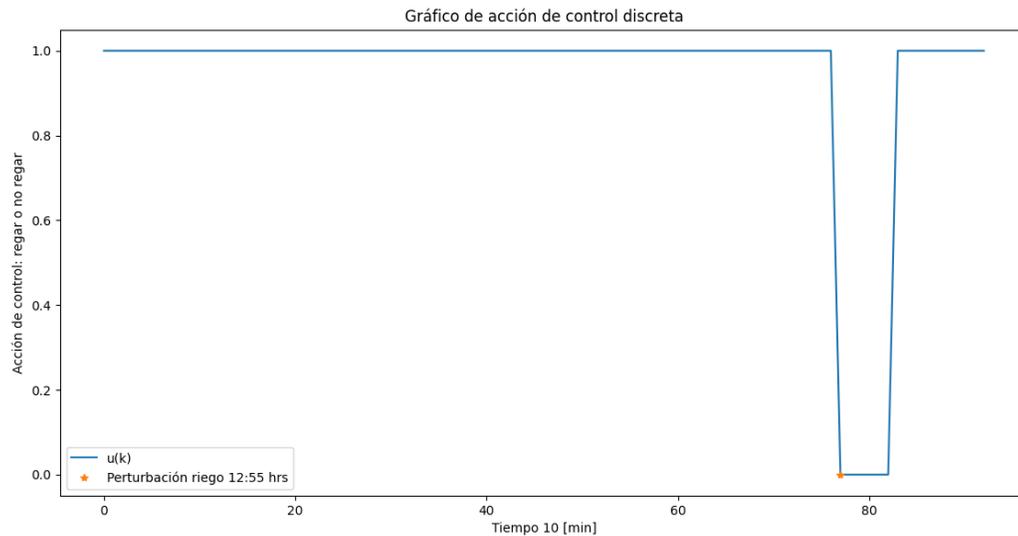


Figura 4.7: Gráfico de acción de control vs. tiempo cada 10 minutos.

Es posible verificar este funcionamiento mediante el gráfico del error, ya que al momento de colocar el agua como perturbación, la medición del error que es $e = ref - hum$, entrega un valor negativo, indicado por el asterisco del gráfico de la Figura 4.8. Dado que el error es negativo, implica que la medición de humedad es mayor que la referencia impuesta. Esta información ingresa al controlador PID difuso, se basa en las 9 reglas mostradas anteriormente y entrega una acción de control, la cual será no regar.

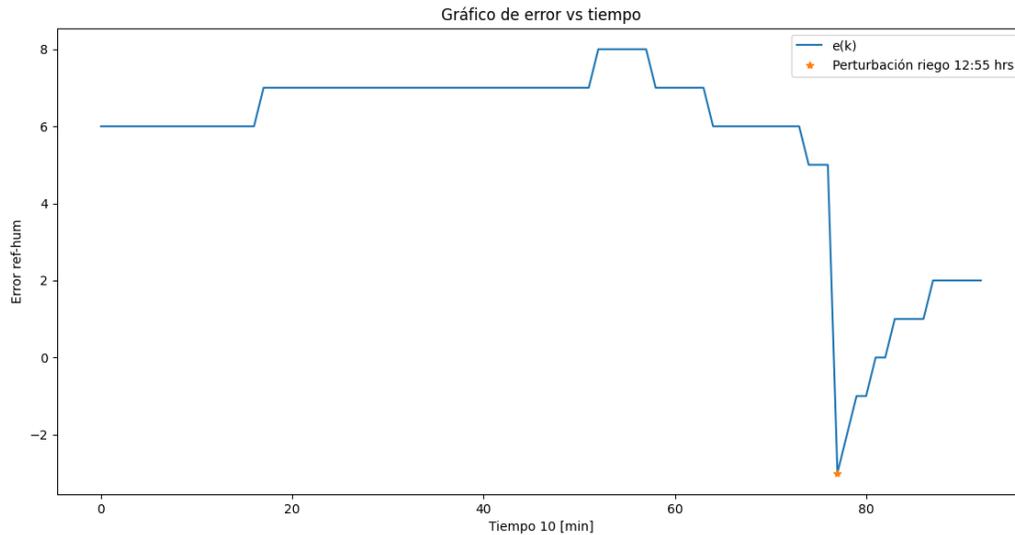


Figura 4.8: Gráfico de error vs. tiempo cada 10 minutos.

Seguindo esta línea, el controlador exige que se debe regar, hasta que se logre llegar a la referencia. Esto se ve reflejado en el valor del cambio en la acción de control, la cual se puede ver en le Figura 4.9, ya que al momento de realizar la perturbación al cultivo, el controlador entrega una salida de valores negativos para el cambio en la acción de control, es decir, que no se debe regar (simbolizado también por el asterisco). Este comportamiento se adopta por las posibles acciones que se realizan dentro del invernadero, las cuales, para este caso, es regar o no regar. Pero es posible considerar el caso en donde el sistema logre secar la tierra con mayor rapidez y no de manera natural, pero eso es para un trabajo a futuro.

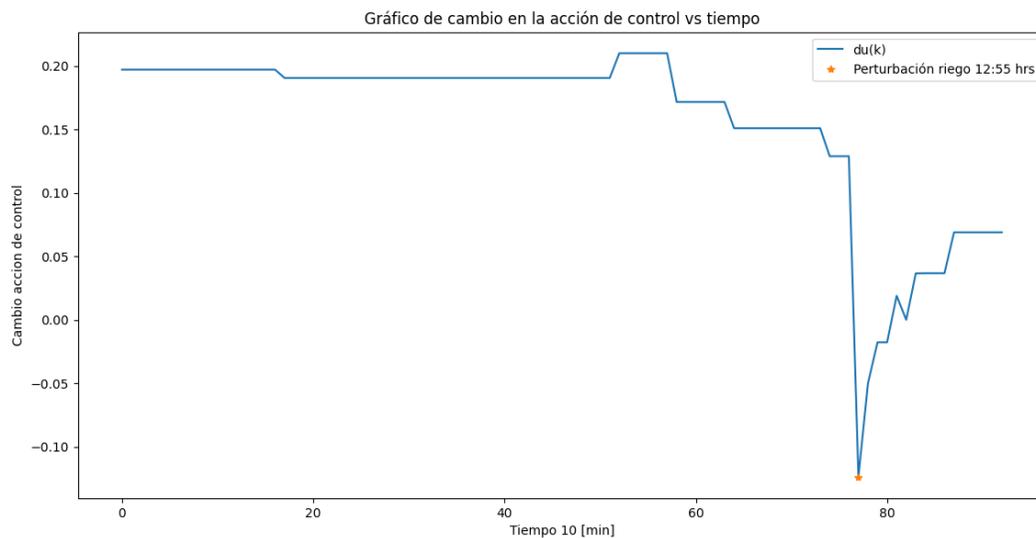


Figura 4.9: Gráfico de cambio en la acción de control vs. tiempo cada 10 minutos.

Con esta prueba en laboratorio, es posible comprobar que el controlador realiza las acciones requeridas para mantener la humedad de suelo de un cultivo dentro de cierta referencia, gracias al control PID Difuso implementado.

4.4. Implementación descripción cualitativa

A continuación se presentan los resultados de la implementación del controlador PID difuso propuesto, en el sistema tecnológico diseñado mencionado en el capítulo 3, en un invernadero de la comunidad en la casa del comunero Erme García y su familia. Esta implementación considera el uso de dos nodos sensores de suelo, encargados de medir la humedad y la temperatura del suelo y enviar esta información al servidor central, el cual es una raspberry pi 4. La prueba en terreno consiste en instalar los nodos sensores, luego dejar que se envíe la información. El tiempo de envío de información es cada 10 minutos, es decir, cada 10 minutos el sensor mide las condiciones de la tierra dentro del invernadero y envía la información, una vez enviada la información el nodo sensor entra en modo *deep sleep*, para consumir la menor cantidad de corriente y tener un menor gasto de batería. Una vez transcurridos los 10 minutos, el nodo sensor desactiva el modo *deep sleep* y vuelve a medir y enviar la información al servidor central. Cada vez que verifica la condición de humedad del invernadero, el control PID difuso verifica si es necesario regar o no. Esto lo hace mediante el seguimiento a la referencia, la cual se optó por un valor de 50[%] para la tierra en todo horario. Esto se puede regular dependiendo de los requerimientos del cultivo.

El equipo de proyecto instala los nodos sensores suelo, con el objetivo de realizar pruebas de medición en terreno, como se puede observar en la Figura 4.10.



(a) Imagen de nodo sensor de suelo de frente.



(b) Equipo de proyecto instalando nodo sensor de suelo.

Figura 4.10: Instalación nodos sensores en invernadero de Don Erme García y su familia.

Una vez que se logra implementar el sistema de nodos sensores en el invernadero, se comienza a realizar mediciones de humedad y temperatura de suelo, cruciales en el desarrollo de este trabajo de título. La disposición de la implementación de nodos sensores se puede ver en la Figura 4.11.



(a) Nodos sensores instalados en invernadero de Don Erme.



(b) Panel solar encargado de recargar batería de nodo sensor.

Figura 4.11: Nodos sensores instalados.

Los nodos sensores envían la información al servidor central, pudiendo visualizarse en la página web desarrollada por Oscar Villagra, la cual se encuentra en desarrollo y corrección, observar Figura 4.12.



Figura 4.12: Visualización de datos obtenidos por prueba en terreno.

En esta página web se pueden ver los datos obtenidos por los nodos sensores, tanto de humedad y temperatura de suelo. Con esta información se corrobora el envío inalámbrico de información a través de WiFi. Dada la calibración del sensor de humedad, se obtienen mediciones en torno al intervalo $[0, 100][\%]$ de humedad, con lo cual se corrobora el correcto funcionamiento del sistema.

Una vez comprobado el correcto envío de información, se debe corroborar el funcionamiento del controlador, lo cual implica abrir o cerrar las electroválvulas según las necesidades del riego, dada la medición de humedad. Para esta prueba se considera una referencia de humedad de suelo del $50[\%]$ y es posible observar en la Figura 4.12, que la medición de humedad es del $11[\%]$, por lo que se debería regar, dado que la medición está por debajo de la referencia. El controlador entonces debe accionar la abertura de las electroválvulas, lo cual se puede observar en la Figura 4.13, dado que a las 14:56 se activa la electroválvula para regar (ver True en color verde).

	Electrovalvula 1	29-08-2023 15:38:08	controlador	true
	Electrovalvula 1	29-08-2023 15:38:08	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 15:38:08	controlador	true
	Electrovalvula 1	29-08-2023 15:28:19	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 15:06:49	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	true
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	true
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	true
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	false
	Electrovalvula 1	29-08-2023 14:56:54	controlador	true

Figura 4.13: Visualización de funcionamiento de controlador.

Una vez que se otorga la acción de regar o no regar, el controlador es capaz de verificar la falta de agua del cultivo, para que así se deba regar o no cierta cantidad de tiempo. Este tiempo es regulado por el bloque PWM, el cual recibe la acción de control, dependiendo del cambio en la acción de control que entrega el controlador PID difuso, para otorgar diferentes tiempos de riego. Esto se realiza, ya que si la medición de los sensores es de 40[%] de humedad de la tierra y la referencia está en 50[%], quiere decir que es necesario regar, pero no los 10 minutos completos.

4.5. Discusión

Automatizar un invernadero implica utilizar tecnología y sistemas inteligentes para controlar y supervisar diversas variables ambientales y de cultivo de manera automatizada. Este trabajo busca automatizar específicamente el riego dentro del invernadero. Este capítulo considera y explica cómo se puede llevar a cabo la automatización del riego en el invernadero. Gracias al capítulo 3, del sistema tecnológico, es posible tener mediciones de los sensores instalados, en donde se puede monitorear las condiciones del micro-clima del invernadero. Recordar que estos sensores se instalan en el invernadero para medir variables como la temperatura, la humedad del aire y del suelo, para luego enviar datos a un sistema central de monitoreo.

El sistema de monitoreo está basado en el lenguaje de programación Python, en donde el sistema de control recibe los datos de los sensores y toma decisiones en función de los parámetros establecidos, es decir, a base de referencias de humedad de suelo que es necesario para los cultivos. El control PID difuso se programa en base a esta referencia, considerando el error como la referencia impuesta restada de la medición de humedad entregada por los

nodos sensores tierra (NST). Una vez se tiene la referencia, el control decide qué hacer según la programación, lo cual implica, hacer que el sistema invernadero llegue a la referencia de humedad de suelo impuesta. Esto se hace a través del riego automatizado, el cual utiliza electroválvulas y goteros en las plansas instaladas, para que estas se activen, en función de los niveles de humedad detectados en el suelo.

En las escuelas rurales indígenas, se instalan router de wifi, para la transmisión de información. Considerando que estos routers poseen Internet gracias a la escuela, es posible realizar una gestión remota del invernadero. Es posible observar las condiciones del invernadero de manera remota, es decir, de distancias alejadas del servidor central instalado en las escuelas. Esto permite supervisar y ajustar los parámetros del invernadero desde cualquier lugar con acceso a Internet. Así, es posible saber si el sistema implementado está funcionando de manera correcta o no.

Gracias a las pruebas de laboratorio y en terreno, es posible ver que el sistema funciona controlando la variable de humedad de suelo de los cultivos. La idea es que este sistema tecnológico, considerando el control, se pueda establecer en un invernadero para que los agricultores tengan más herramientas IoT/energía renovable para el cuidado de sus cultivos.

La automatización de un invernadero genera consecuencias en los agricultores, dado que es posible monitorear las condiciones del invernadero estando en otro lugar, pudiendo así estar seguros de que los cultivos están creciendo de buena forma y en buenas condiciones. Y en caso de algún tipo de falla, también estar atentos para ir al invernadero para solucionar los problemas encontrados. Esto permite a las personas realizar otras actividades, también puede aumentar la productividad, reducir costos y minimizar errores humanos, lo que es beneficioso tanto para pequeños agricultores como para grandes operaciones agrícolas. Además, ayuda a crear un ambiente más estable y propicio para el crecimiento de las plantas, lo que puede mejorar la calidad y cantidad de la producción.

Capítulo 5

Conclusión

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un invernadero inteligente, basado en IoT/energía renovable, en las escuelas de la comunidad indígena Lafkenche, José Painecura Hueñalihuen, comuna de Carahue, Región de la Araucanía, Chile. La labor en invernaderos constituye una ocupación recurrente con la industria agrícola y hortícola. Esta memoria de título se focaliza en concebir e instaurar un sistema tecnológico provisto de instrumentación, que posibilite la automatización de las labores inherentes al invernadero. La elección recae en la aplicación de un controlador PID difuso, específicamente para automatizar el proceso de riego. La propuesta de este invernadero inteligente, junto con la participación activa de la comunidad en el proceso de diseño y la incorporación de tecnologías renovables, representa una importante contribución en el ámbito de la agricultura sostenible y la educación ambiental. Al combinar la tecnología IoT con prácticas agrícolas respetuosas con el entorno, se abre un camino hacia la promoción de una producción agrícola más eficiente y consciente del medio ambiente, beneficiando tanto a la comunidad local como al entorno en general.

El desarrollo de talleres participativos con los y las estudiantes de las escuelas, permiten la inclusión de la comunidad en el proceso de creación y configuración del invernadero. Esta etapa garantiza que el proyecto sea más cercano a las necesidades y realidades locales, fomentando un enfoque colaborativo y adaptado a la comunidad. Trabajar en talleres participativos con jóvenes de escuelas es una actividad enriquecedora que busca fomentar el aprendizaje activo, el intercambio de ideas y la participación de los estudiantes en diferentes temas. Estos talleres pueden abordar una amplia gama de temas, desde habilidades académicas y desarrollo personal hasta temas sociales, culturales o medioambientales.

También, se aborda el diseño e implementación de la instrumentación necesaria para obtener datos precisos sobre el micro-clima dentro del invernadero. La recopilación de información relacionada con variables ambientales como la temperatura, humedad y otros factores. Por último, el diseño e implementación de un controlador PID difuso es propuesta como una solución avanzada y versátil que posibilita la automatización del riego. Este controlador es capaz de mantener la humedad del suelo dentro de los parámetros adecuados, optimizando el uso del agua y asegurando condiciones adecuadas para el desarrollo saludable de las plantas. La instrumentación para automatizar el invernadero considera sensores, actuadores y elementos que, en conjunto, otorgan la capacidad para que se controle el riego que se realiza en los cultivos, controlando la humedad del suelo. Entre las diversas alternativas de control existentes, se opta por el PID difuso debido a su facilidad de implementación en lenguajes de programación como Python.

La automatización de invernaderos a través de la implementación de sistemas tecnológicos avanzados, como el control PID difuso para el riego, ha mostrado resultados prometedores en términos de optimización de recursos y mejora en la calidad de los cultivos. La capacidad de monitorear y ajustar la variable de humedad de suelo en tiempo real, ha permitido crear un ambiente controlado y adecuado para el crecimiento de las plantas. El trabajo en terreno para automatizar invernaderos ha demostrado ser una experiencia altamente enriquecedora y prometedora. Durante el desarrollo de este proyecto, se ha podido apreciar cómo la aplicación de tecnología y sistemas inteligentes en la agricultura ofrece un sinnúmero de oportunidades para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad de las operaciones agrícolas. Además, la facilidad de implementación del PID difuso en lenguajes de programación como Python ha facilitado la adopción de esta tecnología, lo que representa una ventaja significativa para agricultores y técnicos que deseen automatizar sus invernaderos.

Si bien este trabajo en terreno ha mostrado resultados positivos, es importante destacar que la automatización de invernaderos es un campo en constante evolución. Existen oportunidades para seguir investigando y desarrollando nuevas tecnologías, así como para adaptar las soluciones a las necesidades específicas de diferentes tipos de cultivos y condiciones ambientales. En última instancia, la automatización de invernaderos ofrece un camino hacia una agricultura más eficiente y sostenible, donde se puede maximizar el rendimiento de los cultivos, reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental. Es fundamental continuar avanzando en esta dirección para seguir mejorando la producción agrícola y contribuir a la seguridad alimentaria y el cuidado del medio ambiente. El trabajo en terreno ha sentado las bases para un futuro prometedor en la automatización agrícola y abre nuevas posibilidades para el desarrollo y crecimiento de esta industria en beneficio de toda la sociedad.

5.1. Trabajo futuro

Varios aspectos de este trabajo pueden desarrollarse para mejorar el diseño o rendimiento del sistema, los cuales se presentan a continuación:

1. Instalar ventiladores y dispositivos de control para regular la ventilación y la entrada de luz natural o artificial en el invernadero, manteniendo así las condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas.
2. Control de temperatura, se podría implementar un sistema de calefacción y enfriamiento automatizados para mantener la temperatura dentro de los rangos ideales para cada tipo de cultivo. Esto puede ser en base a calefactores o ventiladores.
3. Integrar todos los sistemas mencionados anteriormente en un sistema de control climático, el cual ajustará automáticamente las condiciones del invernadero para garantizar el mejor ambiente para las plantas. A diferencia de este trabajo de memoria de título, que solo controla humedad de suelo, es posible que el control considere más variables del micro-clima, para el cuidado de los cultivos.
4. Configurar el sistema para enviar alertas y notificaciones en caso de que se presenten condiciones inusuales o problemas que requieran intervención humana a los agricultores o personal de las escuelas rurales.

5. Utilizar los datos recopilados por el sistema para analizar y optimizar el rendimiento del invernadero, tomando decisiones basadas en datos para mejorar la producción y eficiencia con agrónomos u otras especialidades del área. También considerar a los agricultores especializados de la zona, para que así el trabajo en equipo se desarrolle de la mejor manera.

Bibliografía

- [1] (Inter-American Development Bank, “2020 inclusivo: tecnología accesible para los pueblos indígenas,” 2020, <https://blogs.iadb.org/igualdad/es/2020-inclusivo-tecnologia-accessible-para-los-pueblos-indigenas/>).
- [2] Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, “Comunidad mapuche marimán cuenta con energía limpia mediante la instalación de paneles solares,” 2015, <https://mma.gob.cl/comunidad-indigena-mariman-cuenta-con-energia-limpia-mediant-e-la-instalacion-de-paneles-solares/>.
- [3] Ministerio de Energía, “Ruka solar: uso de energía renovable en la comunidad mapuche de la rm,” 2017, <https://energia.gob.cl/noticias/metropolitana-de-santiago/ruka-solar-uso-de-energia-renovable-en-la-comunidad-mapuche-de-la-r>.
- [4] CONADI, Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Gobierno de Chile, “Comunidad mapuche williche de fresia instala paneles solares con aporte del programa chile indígena de conadi,” 2020, <https://www.conadi.gob.cl/noticias/comunidad-mapuche-williche-d-e-fresia-instala-paneles-solares-con-aporte-del-programa-chile-indigena>.
- [5] Libelium, “La tecnología smart water proporciona agua segura y limpia a las comunidades indígenas de Canadá,” 2019, <https://www.libelium.com/es/casos-exito/tecnologia-s-mart-water-agua-segura-limpia-indigenas-canada/>.
- [6] Hernández-Díaz, J., Paredes-Carbonell, J. J., y Marín Torrens, R., “Cómo diseñar talleres para promover la salud en grupos comunitarios,” *Atencion Primaria*, vol. 46, pp. 40–47, 2014, doi:10.1016/j.aprim.2013.07.006.
- [7] Bermúdez Tocora, A. L. y Ochoa Urrego, R. L., “Propuesta metodológica para la inclusión tecnológica de la comunidad indígena wayuu,” *Uni-pluriversidad*, vol. 13, p. 71–81, 2014, doi:10.17533/udea.unipluri.18620.
- [8] CONADI, Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Gobierno de Chile, “Convenio entre conadi y artesanías de Chile permitió realizar programa educativo en escuelas rurales de la Araucanía,” 2017, <https://www.conadi.gob.cl/noticias/convenio-entre-conadi-y-artes-anias-de-chile-permitio-realizar-programa-educativo-en-escuelas-rurales>.
- [9] Ministerio de Agricultura, G. d. C., “Resultados del taller participativo región de los ríos salvaguardas sociales y ambientales,” *Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV) de Chile.*, 2015, <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29273f>.
- [10] Sigall, M. C., “Prácticas pedagógicas interculturales: Reflexiones, experiencias y posibilidades desde el aula. resumen ejecutivo.” Centro de Perfeccionamiento, Experimentación e Investigaciones Pedagógicas (CPEIP) del Ministerio de Educación., 2018, <https://bibliotecadigital.mineduc.cl/handle/20.500.12365/12622>.

- [11] Elashiri, M. A. y Shawky, A. T., “Fuzzy smart greenhouses using IoT,” en 2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (IC-CIC), IEEE, 2018, [doi:10.1109/iccic.2018.8782307](https://doi.org/10.1109/iccic.2018.8782307).
- [12] Dan, L., Jianmei, S., Yang, Y., y Jianqiu, X., “Precise agricultural greenhouses based on the IoT and fuzzy control,” en Proceedings - 2016 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, ICITBS 2016, pp. 580–583, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, [doi:10.1109/ICITBS.2016.19](https://doi.org/10.1109/ICITBS.2016.19).
- [13] Jun, X. y Zhou, L., “Design of fuzzy PID control algorithm facing to greenhouse,” en 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), IEEE, 2017, [doi:10.1109/ihmsc.2017.36](https://doi.org/10.1109/ihmsc.2017.36).
- [14] Al-Aubidy, K. M., Ali, M. M., Derbas, A. M., y Al-Mutairi, A. W., “Real-time monitoring and intelligent control for greenhouses based on wireless sensor network,” en 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14), IEEE, 2014, [doi:10.1109/ssd.2014.6808765](https://doi.org/10.1109/ssd.2014.6808765).
- [15] Benyezza, H., Bouhedda, M., Faci, N., Aissani, M., y Rebouh, S., “Greenhouse monitoring and fuzzy control system based on WSN and IoT,” en 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID), IEEE, 2019, [doi:10.1109/icaaid.2019.8934984](https://doi.org/10.1109/icaaid.2019.8934984).
- [16] Lafont, F. y Balmat, J.-F., “Optimized fuzzy control of a greenhouse,” Fuzzy Sets and Systems, vol. 128, pp. 47–59, 2002, [doi:10.1016/s0165-0114\(01\)00182-8](https://doi.org/10.1016/s0165-0114(01)00182-8).
- [17] Ameen, N. M. y Al-Ameri, J. A. M., “IoT-based shutter movement simulation for smart greenhouse using fuzzy-logic control,” en 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), IEEE, 2019, [doi:10.1109/dese.2019.00119](https://doi.org/10.1109/dese.2019.00119).
- [18] Ayuningsih, E., Suryono, S., y Gunawan, V., “Fuzzy rule-based systems for controlling plant growth parameters in greenhouses using fog networks,” en 2019 Fourth International Conference on Informatics and Computing (ICIC), IEEE, 2019, [doi:10.1109/icic47613.2019.8985857](https://doi.org/10.1109/icic47613.2019.8985857).
- [19] Li, H., Pan, C., y Teng, F., “Adaptive fuzzy control based on genetic algorithm for vertical electric furnace,” en 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, IEEE, 2009, [doi:10.1109/ical.2009.5262788](https://doi.org/10.1109/ical.2009.5262788).
- [20] Sheng, G. y Gao, G., “Research on the attitude control of civil quad-rotor UAV based on fuzzy PID control,” en 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), IEEE, 2019, [doi:10.1109/ccdc.2019.8832855](https://doi.org/10.1109/ccdc.2019.8832855).
- [21] Raafi'u, B., Darwito, P. A., 'Adziimaa, A. F., Hadi, H. S., Patrialova, S. N., y Raditya, M., “Comparative study of fuzzy-PID and fuzzy-PI control systems on DC motor speed for four-wheeled mobile robotic,” en 2019 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA), IEEE, 2019, [doi:10.1109/icamimia47173.2019.9223420](https://doi.org/10.1109/icamimia47173.2019.9223420).