

Grupo 1 - Informe final:

Detector de incendios forestales nocturnos

Maximiliano Morales, Tamara González, Marcelo García

EL3105-2 – Seminario de Ingeniería Eléctrica e Innovación Tecnológica

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

26, junio, 2023

I. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales representan una amenaza no menor para el bienestar de diversos seres vivos. La masificación de dispositivos electrónicos IoT ha permitido reducir los costos de producción para tecnologías que pueden detectar la presencia temprana de incendios por medio de sensores incluso en la noche, y, mediante el uso de las redes NarrowBand, se permite su conexión en zonas más remotas en comparación a tecnologías similares como LoRA [1]. El uso de dispositivos NarrowBand IoT en conjunto a sensores y una infraestructura adecuada constituyen una gran potencialidad para mejorar la detección de incendios a bajo costo y de manera eficaz.

II. CONTEXTUALIZACIÓN Y PROBLEMÁTICA DEL PROYECTO

En los últimos 36 años, la zona central de Chile ha experimentado más de cinco mil incendios forestales, los cuales han afectado más de setenta mil hectáreas [2]. Estos incendios han tenido un impacto negativo en la flora, fauna y asentamientos humanos cercanos. Actualmente, la Corporación Nacional Forestal (CONAF), encargada del combate y la prevención de incendios forestales, utiliza métodos de detección más modernos como cámaras infrarrojas o drones de patrulla. Sin embargo, tanto estas tecnologías modernas como las más tradicionales (las torres de detección humana), no tienen la capacidad de detectar automáticamente los incendios durante la noche. En particular, en la región Metropolitana, las zonas más vulnerables son las de interfaz urbano-forestal,

parques y reservas naturales, y áreas rurales y agrícolas [3]. La combinación de densidad urbana, vegetación densa y prácticas agrícolas aumenta el riesgo de incendios y su propagación.

Considerando todo lo anterior, se propone cumplir con el siguiente desafío:

“Ofrecer una solución IoT que mejore la detección nocturna de incendios forestales en zonas de alto riesgo de los bosques de la región Metropolitana.”

III. DOLOR IDENTIFICADO

Naturalmente existe un dolor muy grande asociado a los incendios forestales y a sus causas antrópicas. No sólo arden hectáreas completas de bosque nativo, de terrenos agrícolas y de plantaciones forestales, que afectan negativamente la fuente de trabajo de cientos de personas; sino que también se ven afectadas cientos de hectáreas de zonas urbanizadas [4] impactando directamente en la vida de las comunidades. Como ejemplo, en el gran incendio del 2017, hubo cerca de 6000 damnificados, 467.000 hectáreas afectadas, y una pérdida estimada en 26,5 millones de dólares.

IV. PROPUESTA DE VALOR

Teniendo en cuenta que el 99,7% de los incendios son provocados por acción humana [4], es de suma importancia detectarlos lo más pronto posible. En cuanto a las posibles

soluciones tecnológicas que se pueden brindar a la situación de los incendios, la implementación de tecnología de detección presenta grandes potencialidades.

En los últimos años se han establecido diversas propuestas tecnológicas para la detección de incendios. Teniendo en cuenta la masificación de la tecnología IoT, en particular de la tecnología NarrowBand impulsada actualmente por algunas empresas como Entel, es posible desarrollar dispositivos con conexión en zonas remotas con poca señal telefónica para el monitoreo de datos en tiempo real. Esto se traduce en una gran ventaja para la detección en comparación a los métodos de uso masivo en la actualidad, tales como las torres de vigilancia tripuladas por humanos, o las patrullas aéreas y terrestres.

I. DIAGRAMA CONCEPTUAL DE SOLUCIÓN PROPUESTA

Solución	Atributos	Utilidad
Dispositivo con sensores de humedad, gases, temperatura ambiente e infrarroja instalados.	<ul style="list-style-type: none"> -Utiliza tecnología NB-IoT -Compacto -Seguro para el medio ambiente -Económicamente eficiente -Energéticamente eficiente -Soporta un sistema de comunicación seguro y eficaz, y de largo alcance. 	<ul style="list-style-type: none"> -Capaz de detectar el inicio de un foco de incendio en la oscuridad -Evitar el control directo de personal -Automatización

Tabla 1: Atributos y utilidad de la solución.

II. REGISTROS VISUALES DE IMPLEMENTACIÓN

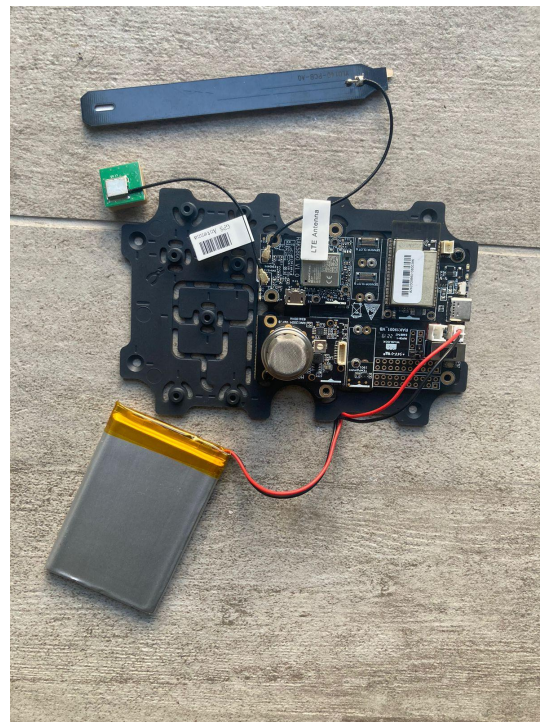


Figura 1: Dispositivo con sensores de humedad, temperatura y de gases instalados.

III. ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN

Dado que el principal medio por cual se detectan incendios forestales en Chile es a través de torres de vigía las cuales no pueden visualizar el humo de un creciente foco durante la noche, se plantea implementar un sistema de sensores dispuestos en aquellos sectores con mayor probabilidad de que ocurra un incendio. Consultando a personal de CONAF, se sabe que estos sectores son esencialmente los límites entre lugares urbanos y bosques. Para la implementación de este sistema, se presenta en esta sección un estudio técnico del dispositivo y los respectivos sensores a utilizar, y por otra parte, un análisis económico asociado a la solución propuesta.

1) ANÁLISIS TÉCNICO

Según lo investigado en la literatura relacionada a sistemas de detección de incendios forestales, se constata que los principales sensores que se deben utilizar en este contexto corresponden a aquellos que miden: temperatura ambiental (C°), humedad relativa (%), temperatura de objetos por infrarrojo, y humo o partículas (ppm) [5].

En base a [5], [6] y [7] se resumen la tabla 2 los valores que presentan las mediciones de los sensores bajo condiciones normales en el bosque de la Región Metropolitana, como también los índices atípicos que una vez sobrepasados indican la alta probabilidad de un incendio en los alrededores. Además, se considera la diferencia de humedad para un instante inicial y un tiempo después.

Parámetro	Valor normal	Valor anormal
Temperatura (°C)	10 - 40	>40
Humedad R. (%)	>30	<30
DFHumedad R.(%)	<10	>10
Humo (ppm)	350-600	>600
Temp. Infrarroja	10 - 40	>40

Tabla 2: Parámetros en condiciones normales y en un posible incendio.

Ahora bien, se recopila de los datasheets de cada sensor, los tiempos de respuesta y temperatura de operación. Un punto relevante a mencionar es que en los experimentos realizados en [5] y [6] con modelos de sensores más antiguos se pudieron constatar otro factor de relevancia, la distancia de medición. Se resume entonces, tales rangos en la Tabla 3.

Sensor	Distancia Medición (cm)	Tiempo de respuesta (s)	Temperatura de operación (°C)
Temperatura	<2000	5	[-40, 125]
Humedad	<2000	8	[-40, 125]
Humo	10	<10	[-20, 50]
Infrarrojo	<150	2	[-20, 60]

Tabla 3: Rangos teóricos de sensores menos actuales.

Según la información obtenida, por lo general los sensores decisivos al momento de detectar un incendio en términos de mayor a menor importancia son aquellos de temperatura infrarroja, humo, humedad y temperatura ambiental; esto teniendo en cuenta los factores decisivos de detección de incendio (humo-temperatura infrarroja) y los factores confirmativos (temperatura ambiental-humedad). Por otra parte, dado que el sensor que se utiliza para medir la concentración de humo (MQ2) también mide compuestos tales como el metano, alcohol y otros, no es una fuente fiable por sí sola, pues basta considerar el hecho de que la feca de un animal en las cercanías elevaría las mediciones por sobre el umbral de 1000 ppm sin siquiera tratarse de un incendio.

EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA

Con el fin de comprobar y retroalimentar lo recopilado anteriormente, se realizan a continuación una serie de experimentos:

❖ Experimento 1: vela pequeña

Utilizando una caja organizadora de 40 litros se coloca en el extremo una vela pequeña y al otro extremo el dispositivo. Se monitorea las mediciones (donde la frecuencia de actualización es de 10 segundos) cuyos resultados se observan en la Tabla 4. Cabe destacar que en el minuto 4:13 se apaga la vela.

Tiempo (min/seg)	Temp. (°C)	Hum. (%)	Gas (ppm)
0:00	25,95	36,56	103,77
2:20	25,99	39,31	180,19
4:40	26,23	42,35	198,65
5:20	26,28	42,78	103,77

Tabla 4: Resultados del experimento 1.

❖ *Experimento 2: papel con keroseno*

A continuación, utilizando una mezcla de papel con el keroseno de la vela, se adjunta en la tabla 5 los resultados. Cabe mencionar que en el minuto 2:50 se apaga la mezcla.

Tiempo (min/seg)	Temp. (°C)	Hum. (%)	Gas (ppm)
0:00	24,88	40,17	238,52
2:20	25,58	54,41	790
3:00	25,79	55,63	1058
5:00	26,65	56,79	3561

Tabla 5: Resultados del experimento 2.

❖ *Experimento 3: calor debajo del dispositivo*

Colocando el dispositivo a una altura de 2,30 metros tal que quede de forma perpendicular a una olla con un poco de alcohol, se monitorea los sensores solo que esta vez se incluye el sensor infrarrojo dentro del análisis. Cabe mencionar que el alcohol se apaga a los 40 segundos.

Tiempo (min/se g)	Temp. (°C)	Hum. (%)	Gas (ppm)	Temp. Infra. (°C)
0:00	23,61	36,22	210,22	18,31
0:27	23,45	37,8	193,83	28,57
0:55	23,47	37,12	301,58	17,42
1:22	23,68	37,87	371,82	18,02

Tabla 6: Resultados del experimento 3.

En base a los resultados de la experimentación, es posible rescatar las siguientes conclusiones:

- *Experimento 1:* No necesariamente es necesario que la humedad sea baja para que esté ocurriendo un incendio, no al menos en los primeros minutos del siniestro. Basta pensar en la quema de hojas verdes dentro de un bosque; el agua en ellas se evaporará y elevará el índice de humedad en las cercanías.
- *Experimento 2:* El sensor de gas puede ser muy efectivo en detectar el principio de un incendio. En efecto, el sensor de temperatura no puede detectar el cambio elevado de temperatura a menos que esté muy cerca del foco.
- *Experimento 3:* El sensor infrarrojo, detecta muy rápidamente el cambio de temperatura de un objeto a una distancia de 2,3 metros.

Entre las principales conclusiones, se establece que si bien el criterio de humedad relativa baja y temperatura alta puede ser un indicador de fuego, también es necesario considerar el caso en que el ambiente sea húmedo, pues en los primeros instantes de un foco de fuego, además de aumentar la temperatura, también lo hace la humedad.

A continuación, se presenta en las Tablas 7 y 8 la jerarquía en base a una escala del 1 al 3, donde 3

representa el estado más crítico, donde se presenta el conjunto de sensores que hayan sobrepasado el umbral de medición, activando una alarma según el tipo de ambiente donde se instalen el dispositivo. Cabe mencionar que ninguna otra combinación activará la alarma de incendios, por lo ya señalado.

Tabla 7: Configuración de alarma en un ambiente templado y seco.

Combinación de sensores que han superado el umbral	Grado de importancia
Infrarrojo o gases	(Advertencia) Grado 1: Si es que se está iniciando un foco de incendio estos sensores serán los primeros en dar indicios. Se da un aviso preventivo, dado que no necesariamente puede tratarse de fuego.
-Infrarrojo y gases -Infrarrojo y humedad baja (<30%) - Gases y humedad baja	(Grave) Grado 2: La combinación de ambos sensores indican que hay un foco de alta temperatura emanando gases. Las condiciones son propicias para un foco de fuego. La alarma se activa.
Infrarrojo, gases y humedad baja (<30%)	(Peligro) Grado 3: Es probable que exista fuego en los alrededores por la baja humedad. La alarma se activa.
Infrarrojo, gases, humedad baja (<30%) y temperatura	(Crítica) Grado 4: Es casi seguro que hay un foco avanzado de fuego en los alrededores ya que hay un aumento en la temperatura ambiental. La alarma se activa.

Combinación de sensores que han superado el umbral	Grado de importancia
Infrarrojo o gases	(Advertencia) Grado 1: Si es que se está iniciando un foco de incendio estos sensores serán los primeros en dar indicios. Se da un aviso preventivo, dado que no necesariamente puede tratarse de fuego.
-Infrarrojo y gases -Infrarrojo y aumento de humedad -Gases y aumento de humedad	(Grave) Grado 2: La combinación de ambos sensores indican que hay un foco de alta temperatura emanando gases. Las condiciones son propicias para un foco de fuego. La alarma se activa.
Infrarrojo, gases y aumento de humedad	(Peligro) Grado 3: Es probable que exista fuego en los alrededores por la subida súbita de humedad. La alarma se activa.
Infrarrojo, gases, aumento de humedad y temperatura	(Crítica) Grado 4: Es casi seguro que hay un foco avanzado de fuego en los alrededores ya que hay un aumento en la temperatura ambiental. La alarma se activa.

Tabla 8: Configuración de alarma en un ambiente húmedo.

Cabe mencionar que en el caso de la tabla 8, en el criterio de humedad, se usará un método para detectar el aumento en la pendiente de las

mediciones de humedad, al contrario de la tabla 7 donde basta considerar la humedad relativa menor a 30 para considerar tal valor un peligro. Tal método consiste en registrar un valor inicial de humedad para luego calcular la diferencia con los siguientes 15 valores a una frecuencia aproximada de 10 segundos, luego de eso, se actualiza el valor de comparación. El valor de cambio será peligroso cuando supere una diferencia de 10%.

Por último, es importante mencionar la corrección que se debió realizar al sensor de temperatura ambiental, ya que por el calor irradiado por la misma placa fue necesario hacer un ajuste. Para ello, en una pieza cerrada se encendió un regulador de temperatura para llegar a 25°C, luego de ello, se colocó el dispositivo al lado del regulador por 8 horas. A continuación se inició el dispositivo y se fue registrando la diferencia de temperatura detectada por el sensor versus la temperatura ambiental. Un gráfico de esta diferencia se presenta en la Figura 4.

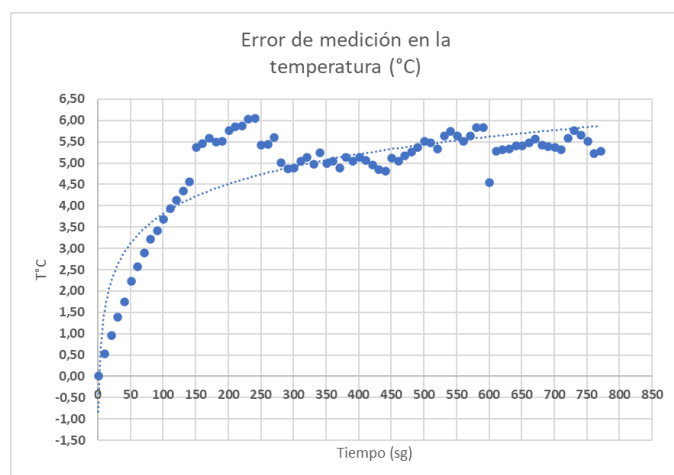


Figura 4: Gráfico de error en la medición de temperatura.

A pesar de que el experimento duró una hora, solo se calcularon los resultados para los primeros 13 minutos dado que posterior a esto, se alcanza convergencia en un valor en torno a 6°C para los

primeros 25 minutos, y un valor final de 7°C aproximadamente para los primeros 40 minutos.

Realizando una regresión logarítmica, se llega a la siguiente ecuación que rige el error de temperatura en el sensor:

$$E(t) = 1,0078 \cdot \ln(t) - 0,8294$$

A continuación, se adjunta en la Figura 5 la tabla de error según el tiempo de actualización de detección del dispositivo.

Tiempo (min:sg)	Error (°C)	Error (%)
0:00	7,83	112%
2:30	2,77	40%
5:00	2,08	30%
7:30	1,67	24%
10:00	1,38	20%
12:30	1,16	17%
15:00	0,98	14%
17:30	0,82	12%
20:00	0,68	10%
22:30	0,57	8%
25:00	0,46	7%
27:30	0,3	4%
30:00	0,22	3%
32:30	0,14	2%

Figura 5: Tabla de error en la medición de temperatura.

En el contexto de incendios, en el minuto 2:30 el dispositivo ya puede considerarse operativo, sin embargo, si se quiere asegurar precisión, es recomendable tener un error máximo de 1 grado celsius aproximadamente, por lo que es necesario esperar 15 minutos para trabajar con tal precisión. Ahora bien, esta tabla fue diseñada bajo la hipótesis de que el dispositivo estuvo prendido por largo tiempo y a partir de un instante el error comienza a ser corregido, por lo que si el dispositivo se

encuentra apagado por largo tiempo, se espera que el error sea menor al mostrado en la tabla en cada paso.

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

En base a un Informe de costos del SENAPRED, correspondiente a los incendios forestales del verano pasado, se estima que el costo de por hectárea quemada corresponde a 8041 USD sin considerar degradación del capital natural [].

Por otro lado, el costo total de la implementación de los dispositivos para una hectárea se puede obtener en base a la siguiente ecuación:

$$\text{Costo}_{\text{total}} = \% \text{ Terreno Monitoreado} \cdot \frac{10.000}{(\text{altura} \cdot \tan(25^\circ))^2 \cdot \pi} \cdot \text{costo}_{\text{sensor}}$$

Específicamente, al tomar en cuenta ciertos factores particulares, como instalar el dispositivo a una altura de 5 metros del suelo, cubrir un 10% de una hectárea y prescindir del sensor de humedad, se logró un coste de 7554 USD. No obstante, se sugiere consultar a expertos para realizar un análisis espacial que permita identificar áreas geográficas clave que requieran una cobertura más intensiva y proporcionar recomendaciones más precisas sobre la ubicación y cantidad de dispositivos necesarios. Algunos factores decisivos para elegir estos puntos incluyen la ocupación del suelo, el historial y la estimación de áreas con riesgo de incendio, zonas que han sido afectadas por incendios a lo largo del tiempo, la elevación del terreno y la densidad forestal, entre otros [8].

IV. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se realizará un experimento ajustado al contexto de un incendio forestal. Para ello, se prepara un cúmulo de ramas secas, verdes y cartón. El dispositivo se ubica a 2,3 metros sobre el cúmulo de manera perpendicular. Se adjunta en la figura 6 la imagen del fuego 5 minutos después de comenzar.



Figura 6: Pequeño foco de fuego.

Monitoreando las mediciones del dispositivo durante 1 minuto y 40 segundos, se obtienen los siguientes gráficos de los sensores de temperatura por infrarrojo (figura 7), gases (figura 8), humedad ambiental (figura 9), tasa de cambio en la humedad (figura 10).

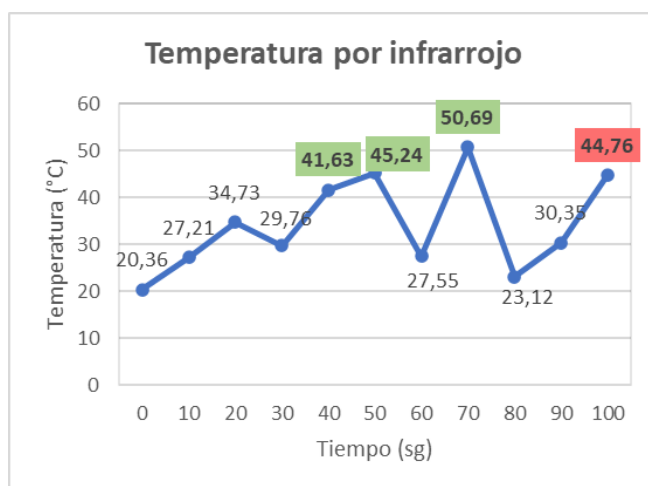


Figura 7: Medición temperatura por infrarrojo en el experimento.

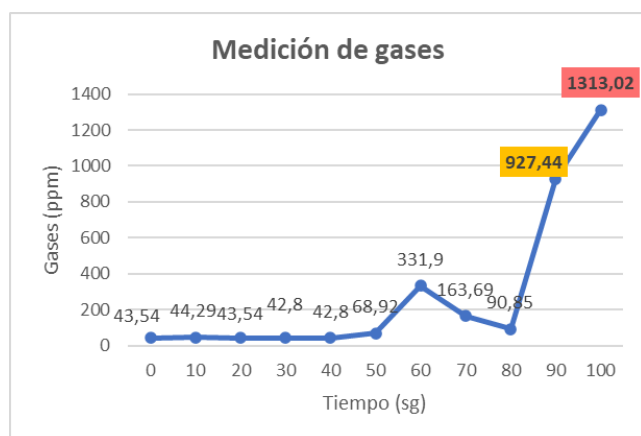


Figura 8: Medición de gases en el experimento.

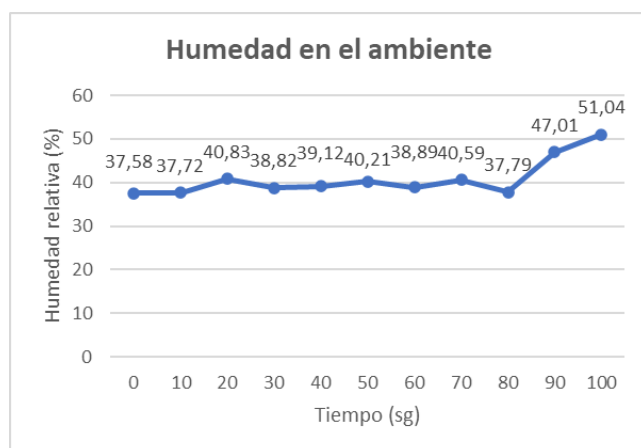


Figura 9: Medición de humedad en el experimento.

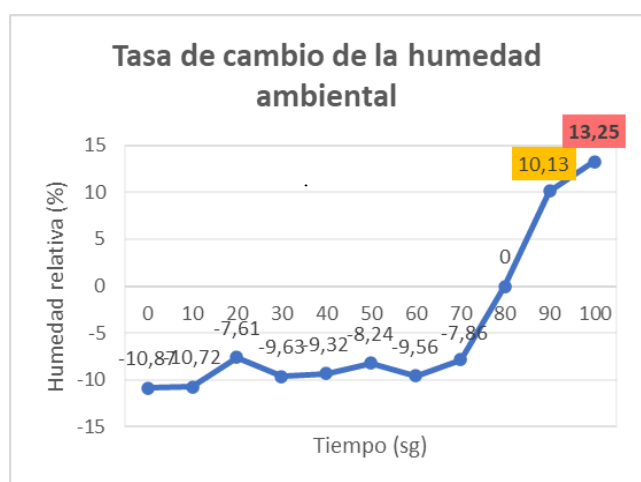


Figura 10: Medición tasa de cambio en la humedad.

Las mediciones resaltadas en verde, amarillo y rojo representan respectivamente las alarmas de advertencia, grave y peligro. Como es de esperarse, la primera alarma en detectar un parámetro anormal en la temperatura por infrarrojo, donde a los 40 segundos de que el dispositivo comienza la medición, se activa la alarma de advertencia. Luego, en el segundo 90 el sensor de gas comienza a detectar valores sobre el umbral además del aumento súbito de tasa de cambio en la humedad en un 10%; Es notable esta última observación ya que concuerda con lo planteado en la sección de análisis técnico en el hecho de que la quema de hojas verdes aumentaría la humedad ambiental, por lo que la idea planteada en algunos papers sobre el hecho de que mediciones de humedad alta en el ambiente desfavorece el inicio de un foco de fuego no es concluyente. Por último, en el segundo 100 del experimento, se activa la alarma de peligro, indicando con acierto la alta probabilidad de fuego en las cercanías.

Cabe mencionar que se excluye del análisis anterior la medición de temperatura ambiental ya que no existieron cambios importantes en los valores medidos.

1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA RED DE SENSORES

Para conocer la ubicación óptima de los sensores es necesario realizar un análisis de las características geográficas del lugar. En la actualidad existen estudios que detallan este problema de optimización [2], teniendo como foco minimizar la cantidad de sensores necesarios para la detección de humo y la posible pérdida de estos en un escenario de incendio. Así, es necesario realizar un análisis en mayor profundidad para presentar una conclusión.

2. UBICACIÓN LOCAL DEL SISTEMA

Con el fin de minimizar el riesgo de robos y manipulación indeseada de los dispositivos, es necesario ubicar tanto la placa principal como los sensores a una altura considerable, idealmente mayor a los 2 metros.

Para instalar el dispositivo se aprovecharán las estructuras naturales que proveen los árboles en zonas boscosas, anclando los contenedores de los sensores y del dispositivo de conexión a los troncos o ramas.

3. PROTECCIÓN

Debido a que el dispositivo se encontrará expuesto a condiciones climáticas ocasionalmente adversas, se debe contar con protección a diversos factores ambientales para asegurar el funcionamiento ininterrumpido por períodos extensos de tiempo, con el objetivo de alargar lo más posible la vida útil teniendo en mira un equilibrio calidad-costeo.

Así, debemos considerar un medio de protección frente a los siguientes factores climáticos:

- Lluvia y radiación solar

Existen numerosas opciones de bajo costo para proteger sensores de la lluvia y la radiación solar. Estas estructuras de protección deben permitir el flujo de aire con el fin de obtener mediciones verídicas de temperatura, humedad y partículas.



Figura 11: Protector de sensores con flujo aéreo, de la marca PIMORONI.

De igual manera, al ser estas protecciones plásticas, deben preferiblemente evitar la incidencia directa de radiación solar, para no acelerar su deterioro y no afectar las mediciones.

- Desechos orgánicos

Ya que los sensores estarán ubicados en zonas de mediana altura, estarán expuestos a la caída de hojas y desechos orgánicos de aves y otros animales. Para esto es necesario un recubrimiento anticorrosivo de los componentes expuestos, tales como las cajas protectoras y los elementos de conexión.

4. ENERGÍA

Se debe realizar un estudio más extensivo para el uso mínimo de energía, maximizando la toma de datos así como aumentando la confiabilidad de la detección temprana en un caso de incendio. En el actual prototipo nos encontramos con un uso alto de energía por parte del sensor de gas, consecuencia del funcionamiento del modelo específico del sensor utilizado.

5. REGISTRO Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS

Los datos recopilados por los sensores se almacenarán de forma online en la plataforma ThingsBoard. La sincronización con esta plataforma se configura programando la placa base modular, para que por medio de una antena se conecte a la red NB-IoT y envíe los datos.

El envío de datos cercano a tiempo real, del orden de los segundos-minutos entre cada lectura, debe realizarse con una conexión permanente a la red, ya que la constante y seguida conexión y desconexión del dispositivo suele ocasionar dificultades para el acceso a la red, acción que disminuye la eficiencia del uso de la batería.

THINGSBOARD CLOUD

La plataforma en donde se almacenarán y visualizarán los datos. Provee herramientas de configuración de alarmas, que se utilizarán de acuerdo a los criterios mostrados en la Tabla 4.

- [8] T. Brito, A. I. Pereira, J. Lima, J. Castro y A. Valente, "Optimal Sensors Positioning to Detect Forest Fire Ignitions", ICORES, 2020, p.412.
- [9] https://www.researchgate.net/publication/276339741_Evaluating_the_optimal_sensor_placement_for_smoke_detection

V. CONCLUSIONES PRELIMINARES & TRABAJO FUTURO

Finalmente, podemos concluir que la recolección y el envío de datos se ha realizado de forma exitosa en esta primera instancia de prototipado. Reconocemos varias potencialidades para mejorar el sistema con el uso de técnicas más avanzadas y estudios más profundos, que podrían mejorar la eficiencia energética del sistema, el alcance en conectividad, y la precisión de los datos tomados.

Sin embargo, teniendo en cuenta la presentación conceptual de la implementación del proyecto, obtenemos un sistema útil y viable para la detección de incendios forestales, limitado por los actuales implementos a nuestra disposición y los conocimientos -frecuentemente interdisciplinarios- necesarios para volver a este un sistema realmente óptimo tanto en lo técnico como en lo económico.

REFERENCIAS

- [1] K. Borle, M. Gopalan, K. Krishna, "Comparative Study of LPWAN Technologies for IoT: LoRa, Sigfox, and NB-IoT," *Wireless Personal Communications*, vol. 112, no. 1, pp. 213-240, 2020.
- [2] C. Silva, A. Carmona, C. Barra, "Impact of Wildfires on Ecosystem Services in Chile: Perspectives for Integrated Fire Management", vol 11, no.1, p.83,2020.
- [3] T. Luo, Y. Ma, Y. Dong, Z. Liu, et al., "Detection of Forest Fires at Night Using Low-Light Level Imaging and Infrared Technology: A Review," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 12, p. 1963, 2018.
- [4] Micheletti, Stefano; Pancani, Dante; Pisani, Elena Análisis comparativo de la lógica técnico-política de reconstrucción: terremoto e incendios forestales en el Maule, Chile Revista INVI, vol. 35, núm. 98, pp. 4, 2020
- [5] M. C. J. Roberto, "Benchmark de selección de sensores para una Wsn de recolección de datos para un sistema de alerta temprana de incendios forestales," 2017.
- [6] J. Gonzáles, "Mini-Red para la alerta temprana ante la ocurrencia de incendios forestales," Trabajo de titulación, Universidad Austral de Chile, 2014.
- [7] "Carbon Dioxide Concentration - Comfort Levels," *The Engineering Toolbox*.
https://www.engineeringtoolbox.com/co2-comfort-level-d_1024.html