



“Desarrollo de sistemas para la medida de
parametros geoquimicos para la vigilancia
volcánica”

Tesis doctoral presentada para la obtención
del título de Doctora por la Universidad de
La Laguna, dentro del programa de doctorado
de Ingeniería Industrial, Informática y
Medioambiental.

Autor: Shadia Awadallah Estévez

Director: Leopoldo Acosta Sánchez

Codirector: Ángel David Moure García

Octubre 2020

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Agradecimientos

La investigación que he llevado a cabo en este trabajo de Tesis ha sido enormemente enriquecedora y gratificante, en gran medida por la interacción que he mantenido con mis supervisores, compañeros y amigos. El largo camino recorrido me ha permitido crecer tanto profesionalmente como personalmente, pero sobre todo me ha permitido ver hacia dónde querría orientar mi futuro.

En primer lugar, quería agradecer a todos los compañeros que forman parte del grupo de vigilancia volcánica del Instituto Geográfico Nacional, que me han ayudado de alguna manera u otra durante este trabajo de tesis. En especial, a mi compañero y codirector David y a mi compañero Pedro, a quienes estaré eternamente agradecida por el gran esfuerzo que han realizado incluso más allá de su vida profesional, por dedicarme su tiempo, compartir conmigo sus conocimientos, contagiarme su pasión por la instrumentación y la volcanología y por su constante apoyo, impulso y confianza en mi persona. Sin ellos nada de esto habría sido posible. Agradecer también a Eduardo, que con su apoyo y ánimo me ha hecho el camino más fácil, y a María José Blanco, directora el Centro Geofísico de Canarias, que me motivó a iniciar este trepidante camino culminado con este trabajo de Tesis y que me ha proporcionado todo cuanto necesitaba para llegar hasta aquí.

En segundo lugar, mi más sincero agradecimiento a mi director Leopoldo, por depositar siempre plena confianza en mí, por su siempre buena predisposición y por acompañarme no solo a lo largo de este tedioso camino, sino también a lo largo de toda mi trayectoria académica.

Agradecer al Instituto Geográfico Nacional, en el que disfruté de una beca integrándome en el departamento de instrumentación volcánica del Centro Geofísico de Canarias, por acogerme y posibilitar el desarrollo de este trabajo en este ámbito apasionante y por confirmarme que la instrumentación comercial no siempre es adecuada para la vigilancia volcánica y hay que adaptarla o incluso desarrollarla.

iii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Quisiera dar las gracias también a mi familia, por brindarme su cariño y amor, comprensión, confianza en mí y continuo e incondicional apoyo incluso en los momentos más difíciles. Ellos constituyen un pilar fundamental. A ellos les dedico este trabajo. Finalmente agradecer a mi pareja por ser fuente de inspiración para superarme cada día más y no desistir en la lucha por mis objetivos. A él y a mis amigos más cercanos, gracias por manifestar interés por la evolución de este trabajo y por su apoyo en mis estudios e intereses peculiares. Ellos siempre han tenido la certeza de que lo conseguiría, incluso en los momentos en los que yo misma he dudado.

A todos, gracias de corazón.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Resumen

Las erupciones volcánicas normalmente están precedidas por señales anómalas, precursores [1]–[5] indicadores de un cambio de actividad en el sistema volcánico. La monitorización de estas señales geofísicas y geoquímicas puede ayudar a identificar cualquier desviación de la actividad base de un volcán, pudiéndose emplear estos datos en conjunción con el conocimiento de la actividad pasada para predecir la evolución y el comportamiento futuro del sistema (aunque con incertidumbres implícitas). Queda patente, por tanto, la importancia del uso de métodos de vigilancia volcánica apropiados para anticipar mejor las erupciones, minimizando así el riesgo para la población.

Siendo las manifestaciones de la actividad volcánica tan diversas, la vigilancia adecuada de un volcán combina tres técnicas: sismología, geodesia y geoquímica. Entre ellas la geoquímica se presenta como el campo que ofrece mayor posibilidad de desarrollo tecnológico, en lo que a instrumentación de campo se refiere, debido a la escasez existente para la vigilancia de determinados parámetros y los inconvenientes que ésta presenta.

El presente trabajo de investigación aborda el estudio y desarrollo de dos sistemas diferentes de medida automatizada y en continuo para la monitorización de dos de los parámetros geoquímicos elementales en la vigilancia volcanológica: la temperatura y la concentración en suelo de CO₂:

Por un lado, respecto a la medida de la temperatura, se presenta una red inalámbrica de bajo consumo y bajo costo basada en LoRa para monitorear la temperatura del suelo a una determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas.

Por otro lado, respecto a la medida de concentración de CO₂ en suelo, se presenta un sistema un sistema de bajo costo y bajo consumo de energía para medir la concentración de CO₂ en el suelo a una determinada profundidad basado en Arduino.

Las aportaciones realizadas suponen un avance significativo respecto a los dispositivos existentes, tanto por la reducción de costes que implican, como por la autonomía que se consigue, lo cual permite un despliegue rápido sin necesidad de realizar una gran inversión económica. Presentan una gran versatilidad, gracias al uso de las últimas tecnologías tanto en hardware como en software, permitiendo configurar y visualizar los datos que se están

v

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por:	Fecha:
Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

registrando en tiempo real realizando un seguimiento de la actividad en cualquier parte e instante. Constituyen por lo tanto soluciones y/o alternativas competitivas tanto en costo y características como a nivel de resultados respecto a aquella instrumentación existente distribuida comercialmente, de la calidad necesaria para efectuar una adecuada vigilancia volcanológica.

vi

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Abstract

Volcanic eruptions are normally preceded by anomalous signals, precursors [1]–[5] which indicate changes in the volcanic system activity. Monitoring these geophysical and geochemical signals can help identify any deviation from the base activity of a volcano; this data can be used in conjunction with knowledge of the past activity to predict the evolution and future behavior of the system (albeit with implicit uncertainties). Therefore, the importance of using adequate volcanic surveillance methods to better anticipate eruptions is clear, thus minimizing the risk to the population.

Being manifestations of volcanic activity so diverse, proper monitoring of a volcano combines three techniques: seismology, geodesy, and geochemistry. Among them, geochemistry is presented as the field that offers the greatest possibility of technological development, as far as instrumentation field is concerned, due to the existing scarcity for the monitoring of certain parameters and the inconveniences that the existing equipment presents.

This research work deals with the study and development of two different automated and real time measurement systems for the monitoring of two elemental geochemical parameters in volcanic surveillance: temperature and CO₂ soil concentration:

On the one hand, regarding the temperature measurement, a low-consumption and low-cost wireless network based on LoRa is presented. This system allows the monitoring of soil temperature at a certain depth in areas with thermal anomalies. On the other hand, regarding the measurement of CO₂ soil concentration, the following system is presented: a low cost and low energy consumption system to measure the CO₂ soil concentration at a certain depth based on Arduino.

Contributions made in this work represent a significant advance compared to existing devices, both due to the cost reduction they imply, and the autonomy that is achieved, which allows a fast deployment without the need for a large financial investment. They are highly versatile, thanks to the use of the latest technologies in both hardware and software,

vii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

allowing you to configure and view the data that is being recorded in real time, tracking activity anywhere and instantly. Therefore, they constitute competitive solutions and / or alternatives both in cost and characteristics as well as in terms of results with respect to existing instrumentation distributed commercially, of the necessary quality to carry out an adequate volcanic surveillance.

viii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Índice

1. Introducción	1
1.1. Marco contextual	1
1.2. Estado arte de la instrumentación geoquímica.....	3
1.3. Antecedentes y punto de partida.	10
1.4. Objetivos	14
1.5. Estructura	15
2. Sistema de medida de temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.	17
2.1. IoT para la monitorización volcánica.	17
2.2. Red para la medida de temperatura a determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas. Comunicaciones.....	19
2.2.1. Selección de tecnología IoT para las comunicaciones	19
2.2.2. LoRa para el sistema de medida de temperatura diseñado.	22
2.3. Red para la medida de temperatura a determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas. Hardware.....	28
2.3.1. Gateway	29
2.3.2. Nodos de medida de temperatura.	31
2.3.3. Repetidor.....	38
2.4. Red para la medida de temperatura a determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas. Software.....	40
2.5. Consumo	55

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

2.6. Coste económico.....	56
2.7. Resultados.....	57
3. Sistema de bajo consumo y bajo coste para la monitorización de la concentración de CO ₂ en el suelo en áreas volcánicas.....	73
3.1. Sistema para la monitorización de la concentración de CO ₂ en el suelo en áreas volcánicas. Hardware.	73
3.2. Sistema para la monitorización de la concentración de CO ₂ en el suelo en áreas volcánicas. Software.....	88
3.2.1. Software incorporado en el sistema.....	88
3.2.2. Software del servidor del centro de análisis de datos.....	105
3.3. Consumo	110
3.4. Coste económico.....	110
3.5. Resultados.....	111
4. Conclusiones	119
4.1. Aportaciones.	119
4.2. Futuras líneas de trabajo.	123
5. Bibliografía	127
Anexo A: Esquemáticos.....	135

x

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Índice de figuras.

Figura 1.1. Esquema total del equipo de medida de flujo de CO ₂	6
Figura 1.2. Equipo de medición de flujo de CO ₂ portátil.	7
Figura 1.3. Estación para la medida de flujo de CO ₂ en continuo. A la izquierda se muestra la cámara de acumulación y a la derecha la estación instalada en campo.	8
Figura 2.1. Módulo LoRa Ra-02 de Ai-Thinker.....	25
Figura 2.2. Enlaces de comunicación testeados en la caldera del Parque Nacional de Las Cañadas del Teide.....	27
Figura 2.3. Esquema de operación de la red.....	29
Figura 2.4. Gateway. Configuración (a) y (b) y esquema hardware (c).	30
Figura 2.5. Estructura hardware de los nodos de medida de temperatura.	31
Figura 2.6. Instalación de un nodo de medida de temperatura en el suelo.	32
Figura 2.7. Módulo MAX31685 de Adafruit.....	35
Figura 2.8. (a) Configuración final de las puntas de aluminio junto con los sensores PT100 y (b) Configuración final de los termómetros.	36
Figura 2.9. Esquema hardware de los termómetros.....	38
Figura 2.10. Repetidor. Configuración (a) y esquema hardware general (b).	39
Figura 2.11. Protocolo de medida.....	41
Figura 2.12. Diagrama de flujo del software del gateway.....	43
Figura 2.13. Diagrama de estados del repetidor.	45
Figura 2.14. Diagrama de flujo del funcionamiento del repetidor.....	47
Figura 2.15. Diagrama de flujo del funcionamiento de los termómetros.	49
Figura 2.16. Diagrama de funcionamiento del modo bajo consumo del repetidor.....	50

xi

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 27/10/2020 19:11:19

Leopoldo Acosta Sánchez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 11:31:39

Ángel David Moure García
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 12:30:38

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 2.17. Página web. (a) Valores de temperatura medidos por los termómetros en el área A; (b) Valores de temperatura medidos por los termómetros en el área B; (c) Nivel de batería de cada termómetro; (d) Nivel RSSI de cada termómetro medido en el repetidor; (e) Porcentaje de error de cada termómetro en los últimos 24h; (f) Porcentaje de error de cada termómetro para el período de tiempo seleccionado..... 55

Figura 2.18. Configuración de red inalámbrica instalada en Las Cañadas del Teide, Tenerife. Los dispositivos fueron desplegados de la siguiente forma: el gateway en el Parador, el repetidor en el borde sur del cráter del Teide, y los ocho termómetros en la cima del volcán Teide (áreas A y B)..... 58

Figura 2.19. Mapas de temperatura de las áreas A y B proporcionadas por las campañas MultiTeide (no publicadas aún). Se resalta la ubicación de cada termómetro dentro de ambas áreas. 59

Figura 2.20. Registros de temperatura. Los rectángulos grises discontinuos señalan interrupciones temporales en las comunicaciones debido a condiciones climáticas adversas. Los rectángulos rojos discontinuos resaltan el mal funcionamiento en los termómetros T2 y T8. 63

Figura 2.21. Detalle del registro de temperatura cuando hay interrupciones en la operación de la red (resaltado en rectángulos grises) debido a condiciones climáticas adversas..... 64

Figura 2.22. Registros del nivel de batería. El rectángulo rojo resalta la descarga de la batería del termómetro T2 debido al sobrecalentamiento..... 65

Figura 2.23. Curva de ajuste para la duración de la batería versus el consumo de corriente. Los puntos azules resaltan los valores obtenidos de las curvas de descarga de la batería proporcionadas por el fabricante. El punto rojo resalta el valor correspondiente a este trabajo 67

Figura 2.24. Niveles de RSSI de cada termómetro en las áreas A y B medidos en el lado del repetidor. Los rectángulos rojos señalan períodos en los que la recepción de paquetes en el repetidor empeora debido a las condiciones climáticas adversas. 68

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 2.25. Estimación de errores. (a) Porcentajes de error total en paquetes transmitidos aplicando la ecuación 2.2; (b) Desviación estándar del error de transmisión promedio de 24 horas..... 69

Figura 3.1. Sistema de medida de concentración de CO₂..... 74

Figura 3.2. Diagrama de elementos del sistema de medida de concentración de CO₂.... 75

Figura 3.3. Esquema hardware general del sistema de medida de concentración de CO₂, donde OUT es la salida del sensor de CO₂, CH1, CH2 y CH3 son los tres canales del conversor A/D y AC, SC, EC y CC son las señales de control para la alimentación del actuador, sensor de CO₂, alimentación de electroválvulas y alimentación del módulo de comunicaciones respectivamente. 76

Figura 3.4. Datalogger visto desde distintas perspectivas 79

Figura 3.5. Shield inferior a la izquierda y shield superior a la derecha. 80

Figura 3.6. Actuador lineal + pistón. 82

Figura 3.7. Mecanismo de encoder + correa + engranajes a la derecha. 83

Figura 3.8. Electroválvulas que componen el circuito neumático..... 84

Figura 3.9. Módulo SIM800L empleado para las comunicaciones del sistema. 88

Figura 3.10. Diagrama de flujo de funcionamiento del sistema de medida de la concentración de CO₂ en suelo volcánico..... 91

Figura 3.11. Menú principal del sistema. 91

Figura 3.12. Ejemplo de fichero de almacenamiento de datos de una muestra. 99

Figura 3.13. Diagrama de flujo de funcionamiento del servidor del centro de análisis. 106

Figura 3.14. Servidor TCP a la espera de una conexión de cliente. 107

Figura 3.15. Pruebas del sistema en sueño de áreas no volcánicas 112

Figura 3.16. Pruebas del sistema en laboratorio.M3 y M4 son dos muestreos diferentes realizados artificialmente en el laboratorio en días diferentes..... 113

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 3.17. Pruebas del sistema en suelo de áreas no volcánicas.M1 M2 y M3 son tres muestreos diferentes realizados en el mismo punto de muestreo en el suelo de un área no volcánica, con una frecuencia de muestreo de cinco minutos. 113

Figura 3.18. Zona escogida para efectuar la validación del sistema en área volcánica. 114

Figura 3.19. Resultados de las pruebas en suelo volcánico. M1 corresponde a un muestreo realizado en un punto de concentración de CO₂ muy bajo. M2, M3 y M4 corresponden a muestreos realizadas en un mismo punto con 5 minutos de diferencia entre ellos. Este punto tiene concentración baja-media de CO₂. 115

Figura A.1. Esquemático de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas. 135

Figura A.2. PCB de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas. 136

Figura A.3. Esquemático de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas. 137

Figura A.4. PCB de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas. 138

Figura A.5. Esquemático de los end devices/repetidor para la red inalámbrica de medida de parámetros meteorológicos (versión adaptada de la red de medida de temperatura). 139

Figura A.6. PCB de los end devices/repetidor para la red inalámbrica de medida de parámetros meteorológicos (versión adaptada de la red de medida de temperatura). 140

Figura A.7. Esquemático del datalogger del sistema de medida de la concentración de CO₂. 141

Figura A.8. PCB de la shield superior del datalogger del sistema de medida de la concentración de CO₂ 142

Figura A.9. PCB de la shield inferior del datalogger del sistema de medida de la concentración de CO₂ 143

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura A.10. Esquemático de la placa de control de electroválvulas y circuito acondicionador de la señal de salida del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂..... 144

Figura A.11. PCB de la placa de control de electroválvulas y circuito acondicionador de la señal de salida del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂ 144

Figura A.12. Esquemático de la placa de control de alimentación del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂ 145

Figura A.13. PCB de la placa de control de alimentación del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂ 145

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Índice de tablas.

Tabla 2.1. Principales tecnologías de comunicación para el internet de las cosas.	20
Tabla 2.2. Consumo de microcontroladores testeados en modo operación y modo sleep.	33
Tabla 2.3. Características del microcontrolador PIC16LF1788	34
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de las baterías testeadas.....	37
Tabla 2.5. Software/scripts de funcionamiento de la red	42
Tabla 2.6. Consumo total	55
Tabla 2.7. Precio	56
Tabla 2.8. Resumen de los datos registrados por la red.....	62
Tabla 3.1. Comparación entre las placas Arduino más populares. Los precios fueron obtenidos de un distribuidor electrónico internacional mientras que las características se han obtenido de la página web oficial de Arduino.	78
Tabla 3.2. Especificaciones del sensor de medida de concentración de CO ₂	85
Tabla 3.3. Especificaciones de los sensores de presión y humedad.	86
Tabla 3.4. Librerías incluidas en el software del sistema para el manejo de diferentes elementos del mismo.	89
Tabla 3.5. Consumo del sistema de medida de la concentración de CO ₂	110
Tabla 3.6. Precio total del sistema de medida de la concentración de CO ₂	111

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Acrónimos.

GPS	Global Positioning System
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
PDA	Personal Digital Assistant
SIG	Sistema de Información Geográfica
GSM	Global System for Mobile communication
GPRS	General Packet Radio Service
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INGV	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia de Palermo
IoT	Internet of Things
WSN	Wireless sensor networks
NFC	Near Field Communication
NB-IoT	Narrow Band IoT
LoRa	Long Range
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
LTE	Long Term Evolution
UNB	Ultranarrow Band
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CSS	Chirp Spread Spectrum
Bandas ISM	Bandas industriales, científicas y médicas
API	Application Programming Interface
CDMA	Code Division Multiple Access
TP	Transmission Power
CF	Carrier Frequency
BW	Bandwith
CR	Coding Rate
FEC	Forward Error Correction

xvii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

SF	Spreading Factor
SNR	Signal to Noise
SPI	Serial Peripheral Interface
FIFO	First-In, First-Out
RSSI	Received Signal Strength Indicator
USB	Universal Serial Bus
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
FTP	File Transfer Protocol
GPIO	General Purpose Input/Output
ADC	Analog-to-Digital Converter
NaN	Not a Number
HTML	HyperText Markup Language
SSH	Secure Shell
SMD	Surface Mounted Device
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
I²C	Inter-Integrated Circuit
RTC	Real Time Clock
NTP	Network Time Protocol
TTL	Transistor-transistor logic
PDP	Protocolo de datos por paquetes
IP	Internet Protocol

xviii

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

CAPITULO I

Introducción

En este capítulo se expone, en primer lugar, el contexto en el que se enmarca este trabajo de investigación. Posteriormente, se concreta el estado del arte dentro de la línea que sigue la investigación realizada, describiéndose también los problemas existentes. A continuación, se exponen los antecedentes que dan lugar a la elaboración de este trabajo y la motivación que se persigue con este trabajo de Tesis doctoral. Los últimos puntos describen los objetivos específicos del trabajo además de la estructura general del documento.

1.1. Marco contextual

Las erupciones volcánicas son fenómenos naturales que pueden afectar significativamente a las poblaciones situadas en su entorno inmediato e incluso a mayores distancias. Este fenómeno consiste la salida de magma a la superficie debido principalmente al incremento de presión en la cámara magmática (reservorio superficial de magma) o en el conducto volcánico. Este aumento de presión se debe principalmente a la entrada de nuevo magma o a un incremento en los volátiles como consecuencia del enfriamiento y cristalización. El magma sobre presurizado, que se abre camino a través de la roca encajante, provocará cambios físicos y químicos en el entorno que se traducen, principalmente, en un aumento de la sismicidad producido por la fracturación de las rocas, deformación de la superficie terrestre y cambios en el potencial de campos (gravedad, magnetismo, etc.) [6]–[9] y cambios fuertes de temperatura en el medio y en la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

composición química del gas y temperatura de fumarolas y / o aguas subterráneas. La monitorización de estos efectos puede ayudar a identificar cualquier desviación de la actividad base de un volcán [10], [11], que, junto con el conocimiento de la actividad pasada, permitiría anticipar la evolución y el comportamiento futuro del sistema.

Las manifestaciones de la actividad volcánica son tan diversas, que se requiere un enfoque pluridisciplinar para llevar a cabo una vigilancia adecuada [12]. Así, las principales técnicas de vigilancia son: la sismología [13], la geodesia [14] y la geoquímica [15]:

La sismología se dedica al estudio de terremotos y otros eventos generadores de ondas sísmicas. Se trata de una de las técnicas más antiguas que permite conocer el estado de un volcán. Mediante el análisis de las distintas señales sísmicas asociadas a la actividad volcánica se puede obtener información de posibles intrusiones magmáticas, alteraciones de una cámara magmática preexistente, ascenso de magma ante una inminente erupción y un largo etcétera. Prácticamente todas las erupciones volcánicas vienen precedidas de señales sísmicas días, meses o años antes de producirse. Además, tanto éstas como otro tipo de señales pueden persistir durante y después de las erupciones. Tratándose de la técnica de vigilancia más antigua, es la que presenta el mayor desarrollo, el menor costo aparente de la instrumentación sísmica [16]–[18] además de robustez y eficacia de la misma y la mayor facilidad para realizar un análisis elemental de los datos obtenidos. Los instrumentos que se emplean incluyen sismómetros, arrays sísmicos y acelerómetros.

Por su parte, la geodesia se dedica al estudio de la deformación del terreno en las inmediaciones del área de actividad como consecuencia del empuje del magma. Es necesario tener en cuenta que grandes deformaciones de la cámara magmática se traducen en deformaciones del terreno de magnitudes menores al milímetro. Por consiguiente, la aplicación de un método de control de la deformación para vigilancia de la actividad volcánica debe presentar una elevada precisión, exigiendo la utilización de instrumentos de muy alta resolución y una muy cuidada instalación sobre el terreno. Los equipos usados para medir deformaciones son principalmente GPS, inclinómetros e InSAR.

Por último, la geoquímica se encarga del estudio de la composición química de la Tierra y del comportamiento de los elementos en ella. Dentro del ámbito de la volcanología, la mayoría de las erupciones volcánicas vienen precedidas por cambios

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

geofísicos y/o geoquímicos. El estudio por métodos químicos de la composición de los productos volcánicos, así como los efectos de la interacción de estos productos con el medio ambiente (cambios fuertes de temperatura en el medio y en la composición química del gas y temperatura de fumarolas y / o aguas subterráneas), constituyen una herramienta valiosa para obtener información referente a las distintas etapas de la actividad volcánica. Debido a la existente escasez de instrumentación específica para la monitorización de determinados parámetros geoquímicos y los costos e inconvenientes que ésta presenta (necesidad de medición "in situ", dispositivos no portátiles, etc.), la geoquímica constituye el campo que ofrece mayor posibilidad de desarrollo tecnológico en lo que a instrumentación de campo se refiere. Partiendo de esta premisa, a la hora de tratar de ofrecer alternativas y soluciones respecto a la instrumentación distribuida comercialmente, es necesario tener en cuenta que las áreas volcánicas suelen ser remotas e inaccesibles, con entornos extremos que ofrecen dificultades para comunicaciones, suministro de energía y mantenimiento. Se hace evidente la necesidad de disponer de equipos de muy bajo coste y gran autonomía, que en la actualidad no existen.

1.2. Estado arte de la instrumentación geoquímica.

Un sistema volcánico interacciona con el medio ambiente de varias maneras. La geoquímica estudia los procesos de los tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Para el monitoreo de un volcán activo se estudian los cambios en el tiempo de los distintos parámetros. Los niveles base muestran las características del sistema volcánico y, con repetidas mediciones, se pueden identificar fluctuaciones y en ocasiones pronosticar la actividad eruptiva. Para observar los cambios geoquímicos se efectúan muestreos y análisis químicos e isotópicos periódicos de fumarolas, gases del suelo y cuerpos de agua emplazados en zonas volcánicas.

Más del 90% del gas emitido en las emanaciones volcánicas es vapor de agua, seguidos en abundancia por CO₂, SO₂ y H₂S. Los gases procedentes del magma circulan por el sistema de fracturas interactuando con los acuíferos y las rocas encajantes, saliendo a superficie en forma de fumarolas, emanaciones dispersas o fuentes termales. Dado que la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

composición química de los gases que está presente en la emisión de un volcán es un reflejo de la actividad [19], las variaciones en sus tasas de emisión, composición y temperatura pueden indicar un cambio en el sistema volcánico.

Existen diferentes observables a tener en cuenta dentro del monitoreo geoquímico:

- Calor: El calor emitido por un volcán es un parámetro fundamental en el monitoreo geoquímico. Las principales manifestaciones de la liberación de dicha energía térmica son las áreas fumarólicas y zonas con anomalías térmicas.
- Gas: Las fumarolas conforman una ventana de observación directa al estado de actividad de un volcán. También lo es la alta concentración de gas, CO₂ principalmente, presente en los terrenos volcánicos a escasos centímetros de profundidad.

Las emisiones de CO₂ se producen a través de fumarolas, penachos y columnas eruptivas y de manera difusa a través del suelo en terrenos porosos que permiten su ascenso. La emisión difusa de CO₂ (gas muy poco soluble en el magma) ha cobrado durante los últimos años una gran relevancia como parámetro fundamental en el seguimiento de la actividad volcánica [20], [21]

El radón es un gas noble radiactivo, inodoro e incoloro con una vida media de 3.8 días. Su uso como trazador de la actividad volcánica está ampliamente descrito en la bibliografía científica y empleado en este sentido por diferentes observatorios volcanológicos [22]

- Agua: Las masas de agua subterránea de pozos y galerías se encuentran sometidas a la interacción con los gases liberados por el magma, de manera que variaciones en los parámetros fisicoquímicos o en la composición de los elementos disueltos en ella pueden ser indicativas de cambios en el estado de actividad volcánica

Para llevar a cabo la monitorización de los parámetros observables detallados anteriormente, gran parte de ellos requieren de la toma de muestras para su posterior análisis en laboratorio mediante el uso de cromatógrafos o espectrómetros de masas. Es el caso de la composición química de las aguas subterráneas y la composición total e isotópica

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

de gases fumarólicos, del suelo y de los disueltos en cuerpos de agua subterránea. Otros parámetros observables sin embargo, pueden medirse en el área de interés "in situ" o de forma remota [23].

Los equipos empleados para la monitorización geoquímica pueden clasificarse en dos grandes grupos: instrumentación genérica empleada en la vigilancia volcánica e instrumentación específicamente diseñada para la volcanología.

Dentro de la instrumentación genérica se tienen las cámaras termográficas, empleadas para la vigilancia de zonas que presenten anomalías de temperatura en superficie, los multímetros con sondas para la medida de parámetros hidrogeoquímico (pH, temperatura, conductividad y sólidos totales disueltos en aguas) y espectrómetros para la medida del gas Radón (equipos para la medida en continuo o para el análisis de muestras tomadas in situ).

Dentro de la instrumentación específica para volcanología, se engloba instrumentación para medidas in situ e instrumentación para medidas remotas.

Si se centra la atención en la medida del SO₂, las principales emisiones se producen cuando el proceso eruptivo está en marcha, por lo que la mayoría de las técnicas empleadas para su medida son remotas. Se emplea:

- COSPEC: solo aplicable durante el día para detectar y cuantificar tasas de emisión de SO₂ de volcanes. Como ejemplo de equipos de este tipo se tienen los COSPECs de Resonance Ltd [24]
- El espectrómetro UV pasivo (DOAS pasivo): estaciones de monitoreo en instalaciones fijas que escanean el cielo de forma continua, en un plano que intersecta la pluma volcánica. CEREX [25] es un ejemplo de fabricante de UV DOAS.
- Cámara UV: incorporan filtros pasa-banda para seleccionar el sector o sectores del espectro UV en los cuales absorbe el SO₂. Resonance Ltd. también es uno de los fabricantes de cámaras de este tipo [26].
- FTIR (Espectrofotómetro de transformada de Fourier): detecta el SO₂ en la pluma a través de sus absorciones en la región infrarroja del espectro electromagnético. Shimadzu [27] es fabricante de espectrómetros FTIR.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Centrando la atención en los parámetros fundamentales de monitoreo geoquímico de calor y emisión de CO₂, se tiene:

En cuanto a la medida del flujo de CO₂, la instrumentación específica existente consiste en un sistema basado en el método de la cámara de acumulación. Este método permite estimar el flujo difuso de emisión a partir del ritmo (pendiente de la recta) con el que la concentración de CO₂ aumenta dentro del volumen del circuito cerrado del sistema. Para obtener el valor correcto, se deben hacer correcciones que dependen de la temperatura ambiente, presión atmosférica y del volumen de la cámara.

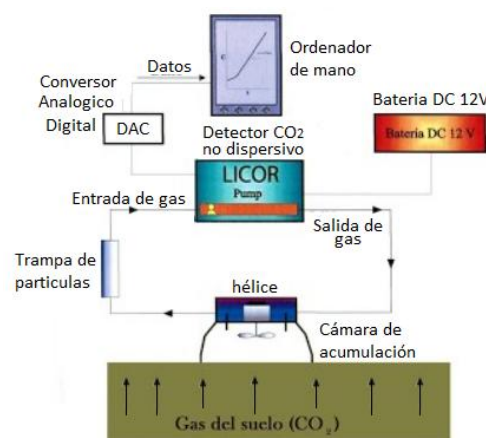


Figura 1.1. Esquema total del equipo de medida de flujo de CO₂

En la Figura 1.1 se muestra un esquema del método, consistente en: i) una cámara circular de dimensiones conocidas, abierta únicamente por la parte inferior en contacto con el suelo, ii) un detector infrarrojo de CO₂, por el cual se hace pasar, en un circuito cerrado, el aire del interior de la cámara, iii) un convertidor analógico digital que transforma la señal de salida del detector infrarrojo y iv) una PDA con GPS integrado que permite el control del instrumento, la visualización de las concentraciones en tiempo real y la extrapolación de la medida de flujo georreferenciada (este último sólo para equipos portátiles). En el caso de equipos para la medida en continuo, esta PDA se sustituye por un

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

sistema integrado que desempeña el mismo fin y además se encargada de la gestión general del equipo.

En base a este sistema existen dos tipos de instrumentación ampliamente usados en volcanología. Por un lado, se encuentra el equipo portátil (Figura 1.2), con el que un operario puede realizar medidas discretas en campo siguiendo un mallado preestablecido, para luego cartografiar la emisión de CO₂ en el área de estudio mediante algoritmos de interpolación (Kriging generalmente) incluidos en programas tipo SIG como Surfer o ArcGis. El muestreo manual obliga a llegar a las zonas de emisión, pudiendo exponer al personal a un elevado nivel de riesgo dependiendo del volcán del que se trate. Además, en muchos volcanes, por la propia constitución del edificio volcánico, es imposible obtener una muestra significativa.

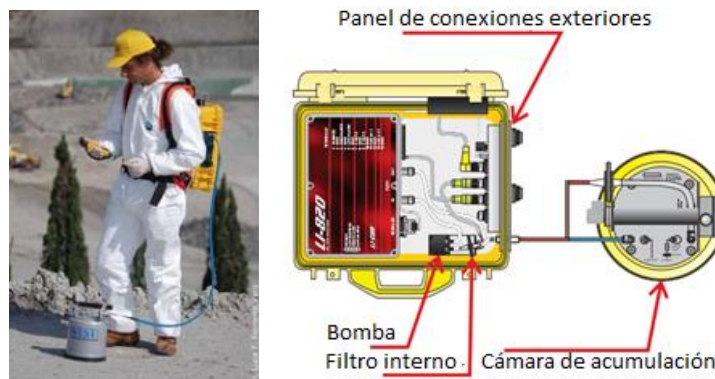


Figura 2.2. Equipo de medición de flujo de CO₂ portátil.

Por otro lado, se ha automatizado la medida en continuo del flujo de CO₂ en un punto fijo mediante un sistema mecánico que acopla la cámara de acumulación a una base semienterrada especialmente diseñada para crear un volumen cerrado (Figura 1.3). De forma opcional, este tipo de estaciones están equipadas de manera que ofrecen además la posibilidad de medida de otros parámetros tales como el flujo de sulfuro de hidrógeno (basándose en el mismo método de la cámara de acumulación), la temperatura del aire y del

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

suelo, la velocidad del viento y su dirección, la humedad relativa del ambiente, el contenido de agua en el suelo, la presión barométrica, el flujo de gas en la línea de muestreo o la cantidad de precipitación de lluvia.

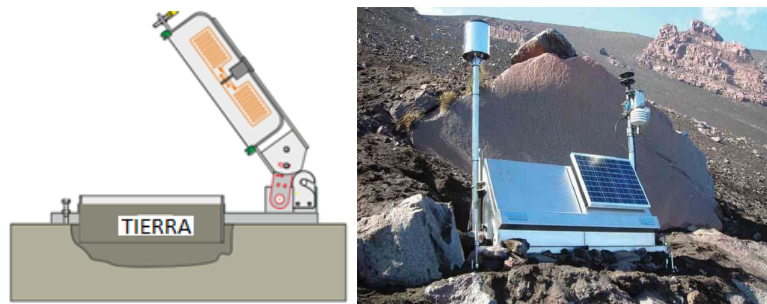


Figura 3.3. Estación para la medida de flujo de CO₂ en continuo. A la izquierda se muestra la cámara de acumulación y a la derecha la estación instalada en campo.

Las estaciones de este tipo están totalmente automatizadas, alimentadas por paneles solares y una batería. Por la noche y durante los periodos de baja radiación solar, la energía es suministrada por la batería.

En lo que respecta al proceso de adquisición de datos, la estación está equipada con un datalogger para la adquisición y almacenamiento local de los datos, y un modem radio o un modem GSM/GPRS permite la comunicación con el centro de seguimiento.

Existen diferentes marcas comerciales distribuidoras de este tipo de equipos para medir el CO₂ difuso: LICOR [28] y WEST Systems [29], [30].

A pesar de que el equipo permite la medida en continuo, presenta una serie de desventajas: i) costes muy elevados; ii) no se tiene acceso al código del software que maneja el equipo, por lo que siempre existe una dependencia de la firma comercial, iii) el equipo está compuesto por partes mecánicas que tienen un tiempo de vida generalmente reducido debido a los ambientes extremos en los que se emplaza este tipo de equipos. Ello conlleva la sustitución de piezas que se hayan degradado, con el correspondiente coste y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

desplazamiento del personal de mantenimiento para el cambio; iv) el equipo no es portátil y su desplazamiento hasta el lugar definitivo e instalación es costoso.

En lo que respecta a la medida de la concentración de CO₂, existen una gran cantidad de sensores comerciales como por ejemplo: Vaisala [31], Dräger [32] y Licor. Los rangos y precisiones de medida son muy diferentes y dependen en última instancia de la aplicación específica para la que son adquiridos. Así, es posible disponer de sensores de hasta el 100% de concentración a costa de una baja precisión y resolución, o de un menor rango de medida con el consiguiente aumento en prestaciones.

En cualquier caso, estos sistemas de medida están pensados para la medida de la concentración del CO₂ en aire o en procesos industriales de control, pero no existe un equipo comercial como tal que permita un seguimiento de la concentración en el suelo.

En cuanto a la medida de la temperatura, este parámetro puede ser registrado tanto de forma local como remota:

- Directas "in situ" (en tiempo real o discretas): Las medidas de temperatura se realizan con contacto directo del sensor con el cuerpo cuya temperatura se quiere conocer. La instrumentación empleada depende del rango de temperaturas esperables y las características del medio. Se emplean termopares o termistores. Los principales ámbitos de aplicación de la termometría directa son las coladas de lava (se usa termopares que soporten la temperatura esperable y traje de amento de protección), aguas (termopares o termistores) y fumarolas (sensores PT100 o termopares protegidos contra los gases ácidos presentes).
- Remotas: Las medidas se realizan a una distancia determinada del objeto cuya temperatura se quiere conocer. En función de esta distancia pueden clasificarse en terrestres y satélites. Para medidas terrestres se emplean cámaras térmicas, altamente portátiles y de bajo consumo, lo cual permite su empleo tanto en campañas de campo como para monitoreo continuo en punto fijo. FLIR es el líder mundial en diseño fabricación y comercialización de cámaras de este tipo. Para las medidas satélites se emplean satélites que disponen de sensores que miden la radiación electromagnética en distintas bandas en el espectro del infrarrojo. Las mayores limitaciones del uso de los satélites para termometría en volcanes son el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

tamaño de pixel de muchos sensores, las bandas que se registran y los niveles de temperatura a los que se saturan los sensores. Como ejemplo de satélites que proporcionan imágenes de éste tipo pueden ser los LANSAT [33].

Así pues, en cuanto a la instrumentación "in situ", los principales problemas radican en los ambientes extremos y corrosivos donde se despliegan estos equipos, el acarreo del material a la zona de estudio, el sistema de comunicaciones y el de alimentación, todo ello debido a que la mayoría de las zonas volcánicas se encuentran alejadas de las principales redes de comunicación y alimentación eléctrica, y la necesidad de presencia humana para realizar las medidas para algunos de ellos.

Respecto a la instrumentación remota, el riesgo que implica es mínimo puesto que las medidas se realizan a cierta distancia, entre decenas de metros y kilómetros. Por lo general estos equipos presentan elevados costes ya que son equipos con una alta sensibilidad y su resolución no es la óptima para el campo de la vigilancia volcánica.

Todo lo expuesto conduce a que, en lo que respecta a la instrumentación dentro del campo de la geoquímica, aún queda mucho camino por recorrer y numerosos avances que realizar.

1.3. Antecedentes y punto de partida.

Las Islas Canarias constituyen una de las regiones volcánicas activas más interesantes del planeta. Independientemente de su interés científico, el volcanismo canario supone un riesgo potencial para unos dos millones de personas que residen en alguna de sus ocho islas mayores o las visitan como turistas. Esta circunstancia exige mantener una vigilancia continua de la actividad volcánica, así como desarrollar medidas de prevención ante una posible crisis eruptiva. La vigilancia volcánica constituye, por lo tanto, un factor fundamental. El Instituto Geográfico Nacional (IGN) [34], centro de trabajo donde se ha desarrollado la investigación para esta Tesis doctoral, es la entidad que se encarga de la planificación y gestión de los sistemas de vigilancia y comunicación de la actividad volcánica en el territorio nacional y determinación de los riesgos asociados, así como la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

gestión de sistemas de observación geofísica y la realización de trabajos y estudios en materia de gravimetría, volcanología y geomagnetismo.

De acuerdo con la información expuesta en los apartados de 1.1 Marco contextual y 1.2 Estado del arte de la instrumentación geoquímica, en técnicas como la geodesia o la sismología, la instrumentación disponible sule totalmente las necesidades que se presentan dentro de las materias que ocupan a dichas técnicas. La instrumentación de cualquier volcán comienza con la instalación de un sismómetro debido al menor coste aparente de la instrumentación sísmica y a la mayor facilidad para realizar un análisis elemental de los datos obtenidos (la localización de terremotos se puede calcular en escasos minutos), añadiéndose otras técnicas de vigilancia a medida que las posibilidades económicas lo permiten. Los instrumentos que usa el IGN incluyen sismómetros, arrays sísmicos y acelerómetros. Por otra parte, la geodesia también es una técnica muy evolucionada. El desarrollo de redes y técnicas para el control de deformaciones asociadas a la actividad volcánica ha recibido un gran impulso en los últimos años y en la actualidad son muchas las áreas volcánicas activas que constan de redes geodésicas u otro tipo de instrumentación para este fin. El control de deformaciones para la vigilancia volcánica puede realizarse mediante un gran número de técnicas geodésicas, entre las que se encuentran el GPS, inclinómetros o InSAR [6]. El IGN dispone de redes GPS con estaciones de registro continuo y además realiza campañas de observaciones GPS para completar algunas áreas donde la monitorización continua no es posible o densificar el número de puntos donde se registran las deformaciones. Posteriormente, los datos registrados por las redes GPS son procesados para la obtención de las coordenadas con la precisión necesaria de menos de 1 cm. También dispone de redes de inclinómetros que registran datos que son tratados, analizados y almacenados para, a partir de ellos y junto a otras técnicas geodésicas, poder detectar cambios en el estado del volcán. Por último, respecto a las técnicas InSAR no se requiere de instrumentación alguna en campo puesto que utiliza imágenes, captadas por sensores a bordo de satélites artificiales, para detectar deformaciones del terreno sobre la superficie terrestre.

Desde el punto de vista geoquímico, con el fin de realizar una correcta y adecuada vigilancia volcánica de los diferentes sistemas volcánicos presentes en Canarias, la Unidad

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

de Vigilancia Volcánica del Instituto Geográfico Nacional combina toma de muestras de gases y aguas subterráneas, técnicas de medida "in situ", estaciones de medida permanentes y campañas de medida discretas para el control de varios aspectos de interés:

- Fumarolas y gases del suelo: el IGN lleva a cabo periódicamente la toma de muestras de gases del suelo y fumarolas en el área sumital del Teide para su posterior análisis composicional e isotópico en colaboración con el Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia de Palermo (INGV, Italia). Variaciones tanto en la composición total de los gases como en la relación isotópica de algunos elementos pueden reflejar un cambio de estado en el sistema volcánico y servir así de señales de alerta temprana de una futura erupción.
- Emisión de gas radón: el IGN cuenta con varios equipos de medida de gas radón instalados en galerías, pozos y en superficie en las islas de Tenerife y El Hierro.
- Concentración de CO₂ y Rn en galerías: el IGN cuenta con varias estaciones multiparamétricas de medida de gases (CO₂, Rn, temperatura ambiente, temperatura de suelo) situadas en diversas galerías de Tenerife y El Hierro.
- Monitoreo de aguas subterráneas: El IGN realiza periódicamente la toma de muestras de agua para su posterior análisis en laboratorio y la medida de parámetros físico-químicos "in situ" en diferentes galerías en las islas de Tenerife, El Hierro y La Palma como parte del control geoquímico de las aguas subterráneas.
- Termometría: el IGN dispone de varias estaciones de monitoreo de la temperatura del suelo a distintas profundidades en la zona sumital del Teide. También dispone de una cámara térmica para la monitorización de algunas zonas de anomalías térmicas en el cráter del Teide.
- Emisión difusa de CO₂: el IGN ha desplegado dos estaciones para la medida en continuo del flujo difuso de CO₂ en las islas de Tenerife y El Hierro. Asimismo, se realizan campañas discretas de medida de flujo difuso de CO₂ del suelo en varias zonas de Tenerife, El Hierro, La Palma y Lanzarote.

Siendo los datos de emisiones de CO₂ cruciales en los programas de monitoreo volcánico debido a lo expuesto a lo largo de los anteriores apartados, se da por sentado el interés que posee el IGN en contar con sistemas para el seguimiento de dicho parámetro. A

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

pesar de que se dispone de la instrumentación y equipos mencionados (equipo para la medición "in situ" y dos equipos de monitorización continua en las islas de Tenerife y el Hierro), existe una patente necesidad de desarrollo de instrumentación que permita solventar los inconvenientes que estos equipos ya existentes traen implícitos, posibilitando al organismo realizar avances dentro de este campo. Dichos inconvenientes, ya concretados a lo largo de este documento, son principalmente el elevado coste de la instrumentación de medida remota existente y la necesidad de realizar las medidas "in situ" para la instrumentación portátil.

Por otra parte, también ha quedado patente que la monitorización del calor emitido por el volcán constituye un punto fundamental dentro de la vigilancia del mismo. El IGN dispone de un perfil vertical de temperatura en el cráter del Teide, concretamente en el mirador de Fortaleza, que permite la medida de la temperatura a diferentes profundidades en el punto en el que está instalado, además de algunos termómetros que miden la temperatura en el suelo en aquellos puntos en los que hay instalados otros equipos como los de medida de CO₂ difuso, y de una cámara térmica instalada en el cráter del Teide para el registro continuo de la temperatura superficial de una zona de anomalías térmicas presente en el mismo. Sin embargo, estos equipos instalados presentan inconvenientes. En cuanto a los perfiles verticales de temperatura, tienen un consumo que trae implícito la instalación de un panel solar para evitar tener que ir presencialmente a sustituir las baterías de alimentación de manera asidua. Además, el impacto paisajístico que tiene la instalación de este tipo de instrumentación junto con el procedimiento que requiere, hacen imposible su instalación en determinados entornos que estén muy protegidos como es el caso del cráter del Teide. Por otro lado, la cámara térmica lleva implícitos además de los inconvenientes ahora mismo mencionados, el alto coste de este tipo de equipos además de limitaciones en cuanto a la extensión de la zona que nos permite vigilar. Por lo general el campo de visión que abarca la cámara es insuficiente para la monitorización de toda la zona que queremos controlar.

Dado el escenario descrito, con este trabajo de Tesis se pretende realizar aportaciones al campo de la instrumentación geoquímica. Para ello se propone la implementación de sistemas innovadores para la medida de parámetros geoquímicos que suplan las

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por:	Fecha:
Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

necesidades y carencias existentes del organismo y en general dentro de este sector, y que sean lo suficientemente competitivos respecto a los equipos comerciales, ofreciendo por lo tanto, una alternativa a los mismos. Estos sistemas deberán incorporar no sólo el equipo físico que efectúe las medidas, sino que también permitan el procesado de la información y su comunicación.

1.4. Objetivos

Como objetivo de este trabajo de Tesis se tiene la realización de instrumentación para el seguimiento de la actividad volcánica. Se abordará concretamente la medida concentración de CO₂ y la medida de la temperatura a profundidad determinada. Se tratará de sistemas integrados que incorporen no sólo el equipo físico que efectúa las medidas, sino que también permitan el procesado de la información y su comunicación. Es necesario partir de la premisa de que la instrumentación desarrollada ha de ser competitiva tanto en costo como a nivel de resultados a aquella distribuida comercialmente. Siendo los volcanes zonas con ambientes extremos y difícilmente accesibles en muchas ocasiones, es deseable el diseño y desarrollo de instrumentación que cumpla con una serie de requisitos. Por una parte, ha de tratarse de sistemas para el monitoreo continuo automatizado y permanente que proporcionen datos en tiempo real de manera no sea necesario el muestro manual "in situ". Al no disponerse de suministro eléctrico en los lugares de emplazamiento de los equipos, se deben alimentar por paneles solares y baterías por lo que son necesarios equipos de bajo consumo para conseguir la mayor autonomía posible. Otro requisito a contemplar es el diseño de equipos de bajo costo. Los equipos comerciales existentes entrañan una inversión económica muy elevada. A esto hay que añadir que, al instalarse en ambientes extremos y corrosivos debido a la presencia de gases ácidos, el tiempo de vida de los componentes se ve notablemente reducido y acaba generando costos adicionales a la hora de reemplazarlos. Los equipos de bajo costo, ofrecen la posibilidad de reemplazarlos fácilmente y de replicarlos. Otro requisito necesario es el diseño de equipos fácilmente portables, de tamaño y peso reducidos para facilitar tanto su transporte hasta el lugar definitivo, a menudo remoto y difícilmente accesible, como su instalación. Además, esto también contribuye a

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

lograr un menor impacto paisajístico, requisito deseable a la hora de obtener permiso para su instalación dado que los emplazamientos finales suelen ser zonas protegidas.

1.5. Estructura

Este trabajo de Tesis se estructura en 5 capítulos.

El capítulo 1 incluye la introducción, que enmarca el contexto dentro del cual se centra este trabajo de investigación, los antecedentes y justificación del mismo, estado del arte y objetivos propuestos para este trabajo de investigación basado en el estudio, diseño y desarrollo de instrumentación para la monitorización volcánica, y más concretamente, para la monitorización de parámetros geoquímicos.

En el capítulo 2 se describe de forma detallada el sistema de medida y monitorización de la temperatura para zonas de anomalías térmicas: hardware, software, comunicaciones y características del sistema, además de exponerse los resultados obtenidos.

El capítulo 3 comprende una descripción exhaustiva del sistema de medida y monitorización de la concentración de CO₂ en suelo de áreas volcánicas. Se detalla el hardware y software diseñado y se exponen los resultados del sistema.

En el capítulo 4 se exponen las conclusiones de este trabajo de Tesis, incluyendo las aportaciones realizadas y las futuras líneas de trabajo planteadas.

Por último, se complementa la memoria de Tesis con un capítulo más (5), dedicado a la bibliografía, y los anexos de componentes y circuitos electrónicos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

CAPITULO 2

Sistema de medida de temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.

En el primer capítulo de introducción se menciona el diseño y desarrollo de sistemas de medida de parámetros geoquímicos como línea sobre la que se desarrollará esta Tesis. Dentro de esta línea se define el diseño y desarrollo de un sistema para la medida de la temperatura a determinada profundidad para monitorizar las zonas de anomalías térmicas como uno de los dos pilares elementales de este trabajo. En este capítulo se describe de forma detallada dicho sistema planteado para lo cual se presenta una red inalámbrica de bajo consumo y bajo costo basada en la tecnología del "Internet of Things" (de ahora en adelante IoT). Así, en primer lugar, se realiza una introducción sobre la aplicación del IoT a la monitorización volcánica para, posteriormente, describir la tecnología seleccionada para implementar las comunicaciones del sistema diseñado. A continuación, se describe en profundidad el hardware y software de este sistema además de concretarse su consumo y su coste total junto con los resultados obtenidos.

2.1. IoT para la monitorización volcánica.

En la última década, ha crecido notablemente el uso de redes de sensores que utilizan tecnología inalámbrica (en adelante WSN) como sistemas de monitorización, alzándose como una nueva alternativa a los sistemas tradicionales [35], [36]. Las WSN son redes formadas por grupos de sensores y actuadores especializados y autónomos dotados con infraestructuras de comunicaciones inalámbricas, destinados a monitorizar condiciones físicas o ambientales en diversas ubicaciones y enviar de forma coordinada sus datos a una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

ubicación principal a través de la red. Como pueden formar redes de forma independiente, las WSN pueden proporcionar información ambiental con un bajo costo operativo y sin mantenimiento periódico.

Las soluciones WSN ya cubren una amplia gama de áreas de aplicación como son la médica [37]–[39], ambiental [40], [41], agricultura de precisión [42]–[44], rastreo de animales [45], [46] o vigilancia [47]–[49], ampliándose continuamente los campos de aplicación gracias a los avances en investigación y tecnología. Así mismo, dado el bajo consumo de energía y la facilidad de implementación, las WSN constituyen una buena opción cuando se trata de monitorización de volcanes [49], [50], siendo una tecnología utilizada muy a menudo dentro de un sistema IoT.

El monitoreo de volcanes implica una transferencia de datos desde estaciones de medida a un observatorio donde la información puede ser tratada y analizada en tiempo real. En caso de posible erupción, la transferencia de datos debe ser lo más rápida y robusta posible para permitir la alerta más temprana que se pueda. Además, la complejidad de los sistemas volcánicos a menudo requiere medidas distribuidas geográficamente en lugar de registros puntuales para sacar conclusiones científicas relevantes. Por esta razón, los sensores se implementan en grandes redes que cubren áreas geográficas importantes, lo que hace que la transferencia de datos sea aún más desafiante. El despliegue de estas redes requiere de soluciones innovadoras de transferencia de datos capaces de administrar de manera eficiente un número muy alto de estaciones. En este contexto global, la monitorización volcánica se identifica claramente como un área de particular interés para aplicar la tecnología de IoT. El IoT habilita cualquier elemento o dispositivo con electrónica integrada, sensores, actuadores, y / o software para conectar e intercambiar datos a través de una red [51].

El despliegue de redes de sensores inalámbricos de IoT en volcanes supone enfrentarse a una serie de desafíos bien identificados: la calidad de la señal entre gateway y los nodos para recopilar datos del sensor, el acceso a internet requerido para la transferencia de datos desde el gateway hasta el punto final donde se analizarán, el suministro de energía necesario para varios meses de autonomía y las condiciones extremas relacionadas con la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

meteorología (vientos fuertes, nevadas y temperaturas extremas) y con la actividad volcánica (presencia de gases ácidos altamente corrosivos).

Todos estos desafíos en la práctica han limitado considerablemente la adopción de tecnologías IoT para monitorizar volcanes, tratándose por lo tanto de un campo en el que poder realizar numerosas aportaciones entre las cuales se sitúa uno de los sistemas abordados en este trabajo de Tesis.

2.2. Red para la medida de temperatura a determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas. Comunicaciones.

2.2.1. Selección de tecnología IoT para las comunicaciones

En los últimos años se han desarrollado numerosos protocolos y dispositivos de comunicación nuevos. Muchos de ellos son bien conocidos como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee y celular 2G / 3G / 4G, pero también existen nuevas opciones de red emergentes como NB-IoT [52], [53], LoRa [54], [55] y Sigfox [56], [57]. Dependiendo de la aplicación, factores como el rango, los requisitos para la transmisión de datos, la seguridad y la duración de la batería determinarán la opción más adecuada para las comunicaciones. La siguiente tabla recoge los principales protocolos de comunicación empleados para el IoT [58], [59]:

	Bandas de frecuencia (MHz)¹	Rango nominal	Velocidad de datos¹
NFC	13.56	10 cm	100– 424 kbps
Bluetooth	2400	0.5-100 m	1 Mbps
ZigBee	2400	10-100 m	250 kbps
WiFi	2400/5000	50-100 m	150-250 Mbps (típica)
Cellular	900/1800/	35 km máx.	35-170 kbps (GPRS)
	1900/2100	para GSM,	120-384 kbps (EDGE)

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

		200 km máx. para HSPA	384 kbps-2 Mbps (UMTS) 600 kbps-10 Mbps (HSPA) 3-10 Mbps (LTE)
NB-IoT	Bandas de frecuencia LTE con licencia	10 km (rural), 1 km (urbana)	20/200 kbps ²
Sigfox	868	30-50 km (rural), 3-10 km (urbana)	100/600bps ²
LoRa	433/868	15-20 km (rural), 2-5 km (urbana)	0.3-50 kbps

¹ Valores de la Unión Europea, ² Velocidad de subida y de bajada de datos.

Tabla 2.1. Principales tecnologías de comunicación para el internet de las cosas.

Dado que las áreas volcánicas son remotas y carecen de acceso a suministro de energía, la opción de comunicación elegida deberá de permitir comunicaciones en áreas amplias con muy bajo consumo, es decir, redes LPWAN [58]–[60]. Una LPWAN es un tipo de red de área amplia de telecomunicaciones inalámbricas diseñada para permitir comunicaciones de largo alcance a una velocidad de bits baja entre objetos conectados. En el espacio LPWAN existen numerosos proveedores y estándares competidores, siendo los más destacados NB-IoT, Sigfox y LoRa [61].

NB-IoT es un estándar de tecnología de radio de bajo consumo de energía para redes de área amplia desarrollado por 3GPP. Emplea el esquema de modulación de desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), proporciona IoT de área amplia de baja potencia y conectividad en un espectro con licencia y ocupa un ancho de banda de frecuencia de 200 KHz. Basado en el Protocolo LTE [62], NB-IoT reduce las funcionalidades del protocolo LTE al mínimo y las mejora en base a los requisitos de las aplicaciones IoT.

Dado que esta tecnología opera en bandas con licencia, no se ha considerado para el sistema de medida de temperatura diseñado, dejando Sigfox y LoRa como las dos posibles opciones para las comunicaciones de este sistema.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Sigfox [56], [57] es una tecnología patentada de banda ultra estrecha (UNB) que funciona en la banda de frecuencia de 868 MHz, con una velocidad máxima subida de datos de 100 bps y un payload o carga máxima de 12 bytes por paquete, permitiendo enviar hasta 140 mensajes por día. Emplea la codificación de desplazamiento de fase binaria (BPSK), que es una codificación de transmisión de radio estándar, que toma fragmentos muy estrechos de espectro y cambia la fase portadora para codificar los datos. Esto permite que el receptor solo escuche en una pequeña porción de espectro, lo cual mitiga el efecto del ruido. Sigfox es un protocolo de comunicación bidireccional que presenta una conexión asimétrica entre los puntos finales y la estación base requiriendo estaciones económicas en los puntos finales, pero una estación base más sofisticada para gestionar la red.

LoRa [54] es una tecnología inalámbrica de capa física que permite la comunicación bidireccional simétrica punto a punto utilizando una técnica de espectro ensanchado desarrollada y patentada por Semtech Corporation [63]. Esta técnica de modulación en radiofrecuencia llamada Chirp Spread Spectrum (CSS) [64]–[67], propaga la señal base a través de un mayor ancho de banda permitiendo aumentar la resistencia a las interferencias electromagnéticas y al ruido así como tolerar caminos múltiples de señal y el efecto Doppler, mientras mantiene muy bajo el consumo de energía. Aunque la tecnología puede funcionar a cualquier frecuencia por debajo de 1 GHz, las frecuencias de comunicaciones que LoRa usa son principalmente las de la banda sin licencia ISM. En cuanto a restricciones, cabe destacar una longitud máxima de 256 bytes por paquete.

LoRa ofrece algunas ventajas respecto a Sigfox convenientes para la monitorización volcánica, y concretamente para el sistema de medida de temperatura planteado en esta Tesis:

- Cuando se necesita bidireccionalidad verdadera, LoRa constituye la mejor opción debido a la simetría del enlace de comunicaciones.
- LoRa permite configurar y administrar la red inalámbrica a un nivel más profundo que Sigfox. Adquiriendo los módulos LoRa el usuario puede desarrollar sus propios gateways y nodos finales pudiendo ajustar y adaptar la red y sus parámetros a sus necesidades (debiendo de encargarse del mantenimiento de la misma). Sigfox se trata de una tecnología propietaria que

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

proporciona una API para interactuar con el módulo de radio, pero no es posible configurarlo en su totalidad.

- LoRa no presenta límite de datos a enviar por día, y no es necesario pagar un plan de suscripción renovable para cada dispositivo.
- Los puntos finales y las estaciones base con dispositivos LoRa suelen ser más económicos que los Sigfox. LoRa permite que, utilizando el mismo módulo de radio, un receptor pueda transformarse en transmisor en cualquier momento dado y viceversa.

Por los motivos mencionados, el protocolo de comunicación que mejor se ajusta a los requisitos necesarios para el sistema diseñado es LoRa.

2.2.2. LoRa para el sistema de medida de temperatura diseñado.

LoRa (acrónimo de Long Range) es una tecnología de comunicación inalámbrica digital patentada [68], [69] desarrollada por Cycleo (Grenoble, Francia) y adquirida por Semtech en 2012. Entre las características que definen esta tecnología cabe destacar las siguientes:

- Utiliza una técnica de modulación de espectro ensanchado llamada Chirp Spread Spectrum [64], [66], [67].
- Opera en un amplio rango de frecuencias, incluidas algunas bandas ISM sin licencia.
- Alta tolerancia a las interferencias.
- Alta sensibilidad para recibir datos (-168dB).
- Alta tolerancia a las interferencias.
- Largo alcance de los enlaces.
- Bajo consumo.
- Baja transferencia de datos (hasta 256 bytes/paquete).
- Conexión punto a punto.
- Velocidad de datos en el rango de kilobits por segundo, adecuadas para IoT.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

La solución LoRa puede etiquetarse como CDMA (acceso múltiple por división de código) [70], utilizando diferentes Spreading Factor y Coding Rates para multiplexar señales en una sola frecuencia. Esto no solo aumenta la capacidad de la red, sino que también permite la adaptación dinámica de las velocidades de datos del dispositivo.

La difusión de una señal de banda estrecha en una banda ancha da como resultado un uso menos eficiente del espectro. Sin embargo, este problema generalmente se supera mediante el uso de múltiples secuencias ortogonales. Siempre y cuando los dispositivos finales utilicen diferentes canales y / o secuencias ortogonales, todo puede ser decodificado simultáneamente, lo que resulta en una mayor capacidad general de la red.

A continuación se describen los diferentes parámetros que definen las características de la modulación LoRa [54], [55]:

- "Transmission Power" (TP): debido a los límites en la implementación del hardware está restringido de 2 dBm a 20 dBm, y para niveles superiores a 17 dBm, solo se puede utilizar un ciclo de trabajo del 1%.
- "Carrier Frequency" (CF): es la frecuencia central que representa el canal. Se puede programar en pasos de 61 Hz desde 137 MHz a 1020 MHz. En algunos chips LoRa, este rango de frecuencia está limitado entre 860 MHz y 1020 MHz.
- "Bandwidth" (BW): indica el ancho de frecuencia que vamos a usar. Cuanto mayor es, mayor es la velocidad de datos (por lo tanto, el tiempo de transmisión es más corto); sin embargo, la sensibilidad disminuye. LoRa permite seleccionar diferentes BW de los cuales lo más frecuentes son: 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Los datos se envían a una velocidad igual al ancho de banda en chips por segundo por Hertz; un ancho de banda de 125kHz corresponde a una velocidad de 125 kcps (kilochips por segundo) [66].
- "Coding Rate" (CR): indica la forma de codificar para corrección de errores o, concretamente, la proporción de bits transmitidos que realmente transportan información. Lora emplea la técnica Forward Error Correction (FEC) para aumentar aún más la sensibilidad del receptor, codificando datos de 4 bits con redundancias en 5 bits, 6 bits, 7 bits u 8 bits. El uso de esta redundancia

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

permitirá que la señal LoRa soporte interferencias cortas. Los valores de CR permitidos son 4/5, 4/6, 4/7 y 4/8. Cuantos más bits de corrección se usen, más fácil será la corrección de datos, pero mayor será la duración de la transmisión y más baja será la tasa de datos.

- "Spreading Factor" (SF): es la relación entre la velocidad de símbolo y la velocidad de chip (un símbolo LoRa es compuesto de chips 2^{SF}). Los posibles valores de SF abarcan de 6 a 12. El valor de SF debe ser conocido de antemano por el emisor y el receptor para que sea posible detectar el preámbulo del mensaje (en otras palabras, para detectar al menos 4.25 símbolos), ya que el tamaño del preámbulo se escala con SF, no existiendo un preámbulo único para todos los SF. A mayor SF aumenta la relación señal-ruido (SNR) y, por lo tanto, la sensibilidad y el rango, pero también aumenta el tiempo del paquete en el aire. Con el mismo BW, un tiempo más largo en el aire obviamente resulta en menos datos transmitidos por unidad de tiempo. Cada aumento en SF reduce a la mitad la velocidad de transmisión y, por lo tanto, duplica la duración de la transmisión y, en última instancia, el consumo de energía.

Las comunicaciones de radio bajo diferentes SF son ortogonales entre sí a pesar de que compartan la misma frecuencia central y ancho de banda y, por lo tanto, la separación de la red mediante el empleo de SF diferentes es posible [67], [71]. De esta manera, los símbolos LoRa pueden ser simultáneamente transmitidos y recibidos en un mismo canal sin interferencias.

Es necesario tener en cuenta que la comunicación entre dos elementos solo es posible si ambos tienen los mismos parámetros de configuración. La selección de estos parámetros tiene un impacto en el rendimiento de las comunicaciones (rango de transmisión, resistencia a la interferencia y consumo de energía del dispositivo). En la mayoría de los casos, es deseable equilibrar el rendimiento de las comunicaciones y el consumo de energía, pues los nodos o dispositivos finales funcionan con baterías, y es un objetivo maximizar la vida útil de la misma. En este sentido, la potencia de transmisión (TP) tiene un impacto directo en el consumo de energía. Otro factor determinante es el tiempo en aire

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

requerido para transmitir un paquete, que depende de la tasa de bits y el tamaño del paquete. La tasa de bits está determinada por SF y BW. Sin embargo, el tamaño del símbolo en un paquete no solo depende de la carga útil o payload, sino también de SF, BW y CR.

Invertir más energía no resulta necesariamente en un mejor rendimiento de las comunicaciones. Por ejemplo, un CR más fuerte es muy costoso energéticamente hablando, ya que los paquetes contienen información redundante; sin embargo, esto solo conduce a un mejor rendimiento de comunicación en áreas con ráfagas de interferencias. Varias opciones de configuración conducen al mismo consumo de energía, pero impactan de manera diferente en el rendimiento de las comunicaciones. Claramente, es deseable seleccionar una configuración que minimice el consumo de energía al tiempo que logra un rendimiento eficiente de la red.

Entre los dispositivos LoRa disponibles en el mercado, el módulo Ra-02 de Ai-Thinker [72] fue elegido para implementar comunicaciones de la red propuesta debido a (i) las opciones de configuración, (ii) el precio, y (iii) la facilidad de compra, dada su alta disponibilidad en el mercado. Este módulo viene con un circuito integrado Semtech SX1278 [73], [74] que funciona en una frecuencia de 433 MHz. Este transceiver proporciona comunicación de espectro extendido, ultra largo alcance y alta inmunidad a interferencias minimizando el consumo.



Figura 2.1. Módulo LoRa Ra-02 de Ai-Thinker

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este módulo LoRa ofrece diferentes modos de funcionamiento, de los que será necesario hacer uso para lograr un adecuado funcionamiento de cada dispositivo en la red de acuerdo a la función que desempeñan. Estos modos son el Sleep, Standby, Tx, Rx_continuous y Rx_single [73]:

- Modo Sleep: se activará cada vez que se requiera un consumo extremadamente bajo de los dispositivos. En este modo únicamente están accesibles los registros de configuración y SPI. La memoria FIFO no se encuentra accesible.
- Modo Standby: es el modo de funcionamiento por defecto. La escritura de la memoria FIFO y el acceso a los registros de configuración estática se pueden realizar durante este modo.
- Modo Tx: Al activarse se alimentan todos los bloques necesarios para transmitir. Una vez transmitido el paquete, el módulo regresa de manera automática al modo Standby.
- Modo Rx_Continuous: Al activarse se alimentan todos los bloques necesarios para la recepción de paquetes, procesando todos los datos recibidos hasta que el usuario cambia el modo operativo. Se empleará este modo si se quiere que el dispositivo permanezca recibiendo paquetes de forma continua (no regresa al modo Standby de manera automática).
- Modo Rx_Single: Al activarse se alimentan todos los bloques necesarios para la recepción de paquetes y permanece en este estado hasta que se haya recibido un paquete válido. A continuación, regresará de forma automática a Standby. Se empleará cuando se requiere que el dispositivo permanezca a la espera de un único paquete de forma aislada.

Para testear la validez del módulo seleccionado, se llevaron a cabo dos enlaces de comunicaciones en la caldera de Las Cañadas del Teide en Tenerife (Figura 2.2): el primer enlace desde el borde sur del cráter del Teide hasta el Parador Nacional del Teide con una longitud total de 5.35 km, y el segundo desde el borde norte del cráter hasta la caldera de Diego Hernández con una longitud de 8.48 km. Se seleccionaron estos puntos para efectuar los enlaces de prueba por diferentes motivos: el cráter por presentar áreas de anomalías

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

térmicas que sería deseable monitorizar, el Parador por disponer de acceso a Internet provisto por una estación propiedad del Instituto Geográfico Nacional (IGN), y el punto de la caldera de Diego Hernández por constituir el punto que permite el enlace más grande dentro de caldera de Las Cañadas del Teide. En ambos enlaces se empleó una antena dipolo de 2 dBi para el dispositivo del cráter y una antena Yagi de 9 dBi en los otros dos lugares. Así, para un tamaño de mensaje de 12 bytes enviados cada 10 segundos durante un periodo de 15 minutos, un valor límite de sensibilidad de 123 dBm, y unos parámetros de configuración de TP = 17 dBm, CF = 433MHz, SF = 7, BW = 125 kHz y CR = 4/5, todos los mensajes fueron recibidos en ambos enlaces. Los indicadores de intensidad de señal recibidos (RSSI) fueron de 100 dB y 105 dB respectivamente; más de 15 dB por encima del nivel de ruido. Se infiere por lo tanto que, tanto el protocolo LoRa como el módulo seleccionado son apropiados para implementar los enlaces de largo alcance necesarios para la red de medida de la temperatura propuesta en esta Tesis.



Figura 2.2. Enlaces de comunicación testeados en la caldera del Parque Nacional de Las Cañadas del Teide.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

2.3. Red para la medida de temperatura a determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas. Hardware.

El sistema diseñado consiste en una red inalámbrica de termómetros basada en IoT, de bajo consumo y bajo costo, fiable, robusta y escalable para monitorizar la temperatura del suelo en áreas volcánicas en tiempo real. Esta red inalámbrica está compuesta por tres elementos principales: el gateway, que recibe la información de los diferentes dispositivos finales de la red y la retransmite a través de internet al centro de análisis de datos, un repetidor y los nodos o dispositivos finales de la red, que son los termómetros encargados de recoger la información correspondiente a su emplazamiento. Se deduce que, respecto a la estructura de la red, se tiene una topología jerárquica con forma de estrella, donde la información sigue un camino ascendente o descendente.

La función del sistema desarrollado es la adquisición de datos de temperatura de la zona en la que se encuentre desplegada la red, su posterior almacenamiento, transmisión y visualización. Así, la operación o funcionamiento de la misma se puede resumir de la siguiente forma: el gateway, ubicado en un punto con acceso a internet, administra la red y actúa como un puente transparente que transmite mensajes entre los nodos y un servidor central situado en el centro de análisis. Cada período de muestreo, se comunica con el repetidor para iniciar el proceso de medida de la temperatura. El repetidor retransmitirá la orden a cada nodo (el número de nodos dependerá de la cantidad de puntos que se deseen monitorizar) y espera las respuestas devueltas. Cada dispositivo final identificará la orden recibida y ejecutará la tarea asociada (medir temperatura, devolver el valor RSSI...), devolviendo al repetidor la información requerida. Este último recopilará todos los paquetes procedentes de cada dispositivo final y elaborará un único paquete con la totalidad de la información, que retransmitirá al gateway. Los datos recibidos por el gateway son procesados y almacenados localmente en una memoria externa además de ser sincronizados con el centro de análisis de datos (Figura 2.3).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

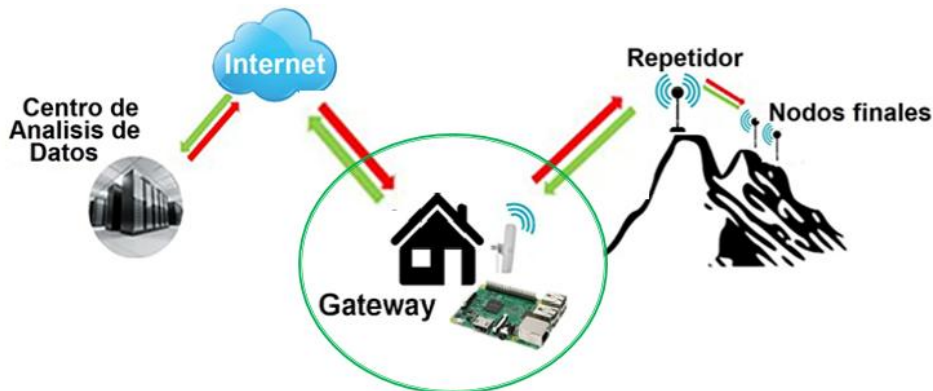


Figura 2.3. Esquema de operación de la red.

2.3.1. Gateway

Para esta red, se ha desarrollado un gateway LoRa de bajo costo basado en el microordenador Raspberry Pi [75], elegido por diferentes motivos: (i) puede ejecutar un sistema operativo basado en Linux [76], (ii) incluye múltiples protocolos de comunicación como el Serial Peripheral Interface (SPI), TCP / IP así como otros protocolos de comunicación externos al equipo como Universal Serial Bus (USB) y Ethernet, (iii) tiene una gran comunidad de desarrollo que proporciona una gran cantidad de ejemplos de código y bibliotecas, (iv) su accesibilidad y precio, (v) su tamaño (ordenador tamaño tarjeta de crédito), (vi) numerosos desarrollos basados en la tecnología Raspberry Pi para la monitorización de volcanes muestran su fiabilidad para su aplicación en este campo [77]–[80], y (vii) la existencia de diferentes unidades de gran potencial como Raspberry Shake y Raspberry Boom [81] que podrían complementar la red presentada, logrando una red completa de monitorización IoT basada en Raspberry Pi.

Entre los diferentes modelos de Raspberry Pi existentes, se eligió el modelo Raspberry Pi 3B [82] porque era el último producto disponible en el momento en el que se realizó el desarrollo. A pesar de ello, el diseño implementado para el gateway es compatible con todas las placas Raspberry existentes.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

La Raspberry Pi 3B, de bajo coste y consumo, usa procesador ARM™ embebido, con sistema operativo Raspbian (basado en Debian Linux). Debido a que soporta distintos sistemas operativos GNU/Linux, es ideal para el desarrollo de un sistema de medida en tiempo real, ya que se pueden implementar fácilmente aplicaciones sobre múltiples protocolos de comunicación como User Datagram Protocol (UDP), Transmission Control Protocol (TCP), File Transfer Protocol (FTP), así como Secure Shell (SSH) y Secured File Transfer Protocol (SFTP). La programación realizada con lenguajes de alto nivel, facilita desarrollar aplicaciones para la explotación de datos.

Además de por la placa Raspberry Pi 3B, el hardware del gateway está compuesto por un módulo LoRa Ra-02 junto con una antena direccional de 3 dBi para las comunicaciones y una memoria externa USB para el almacenamiento local de los datos (Figura 2.4).

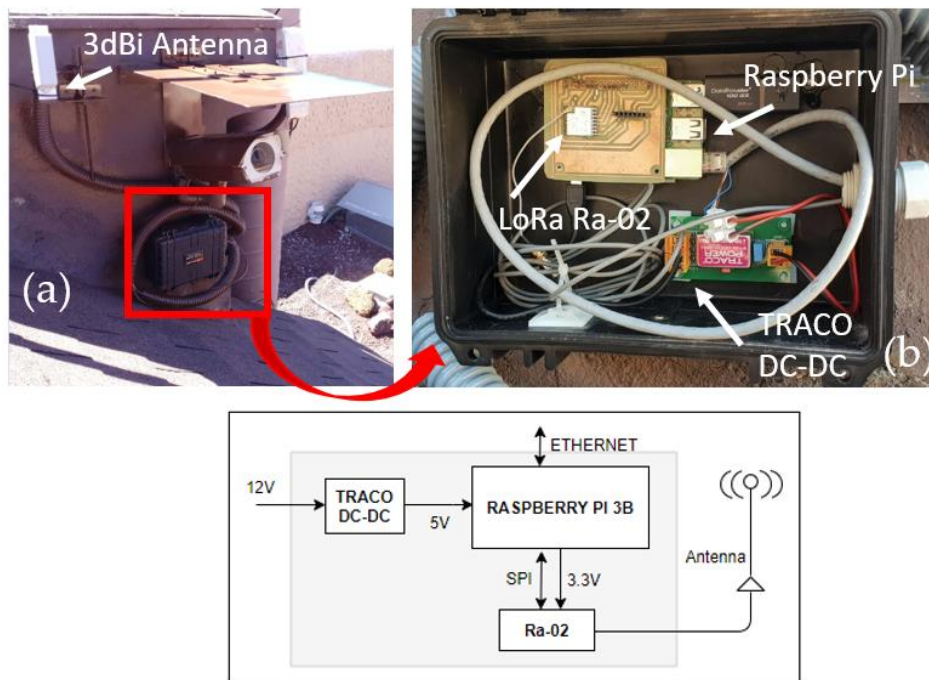


Figura 2.4. Gateway. Configuración (a) y (b) y esquema hardware (c).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Aunque el gateway se ha implementado empleando un microordenador de bajo consumo, el consumo total de este dispositivo no constituye un punto crítico ya que está pensado para ser instalado en un lugar con acceso a la red de suministro eléctrico.

2.3.2. Nodos de medida de temperatura.

Los nodos de medida de temperatura o termómetros son los dispositivos finales de la red, encargados de efectuar la medida de temperatura en el punto donde estén situados. Cada termómetro está compuesto por: (i) un detector de temperatura resistivo de platino (RTD) basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura, (ii) un conversor de resistencia RTD a valor digital, (iii) un módulo de comunicaciones Ra-02 junto con una antena de 2dBi, (iv) una unidad de control (microcontrolador) para la gestión del sistema y (v) una batería de litio como fuente de alimentación.

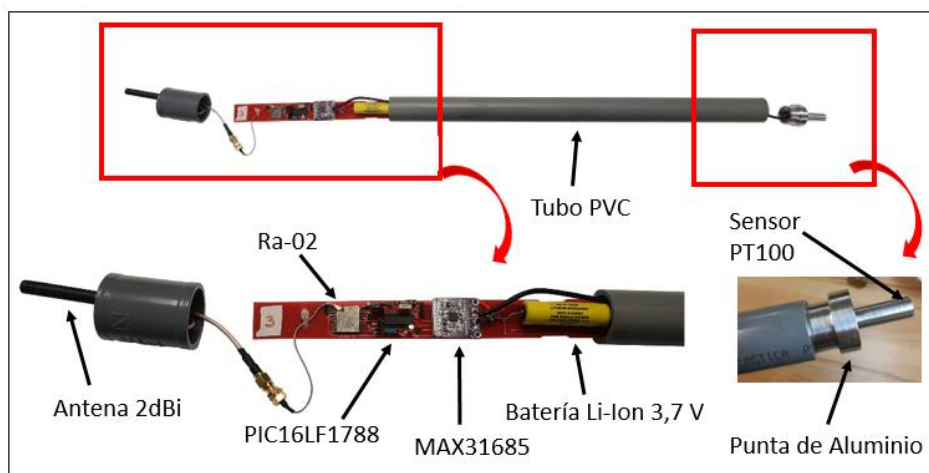


Figura 2.5. Estructura hardware de los nodos de medida de temperatura.

Para proteger estos elementos de la corrosión propia de los ambientes volcánicos debido a la presencia de gases ácidos y para facilitar su transporte e instalación, se

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

encapsuló el hardware en un tubo de PVC de 60 cm de largo y 32 mm de diámetro interior. Cada tubo tiene en uno de sus extremos la antena de 2 dBi y en el otro extremo una punta de aluminio diseñada y tallada mediante un torno con una forma específica que favorece la distribución del calor. Para la medida de la temperatura se decidió no emplear sensores comerciales, pues no resisten la corrosión de los gases ácidos. En su lugar, se emplearon sensores PT100 colocados dentro de la punta de aluminio en el extremo final (Figura 2.5), proporcionando la protección necesaria para favorecer el tiempo de vida de estos componentes. Así, para la medida de la temperatura los termómetros se enterraron en diferentes puntos de una zona con presencia de anomalías térmicas, a 40 cm de profundidad para medir la temperatura del suelo, quedando únicamente visible la antena del dispositivo, que se alza unos 20 cm sobre el suelo tal y como se muestra en la Figura 2.6.

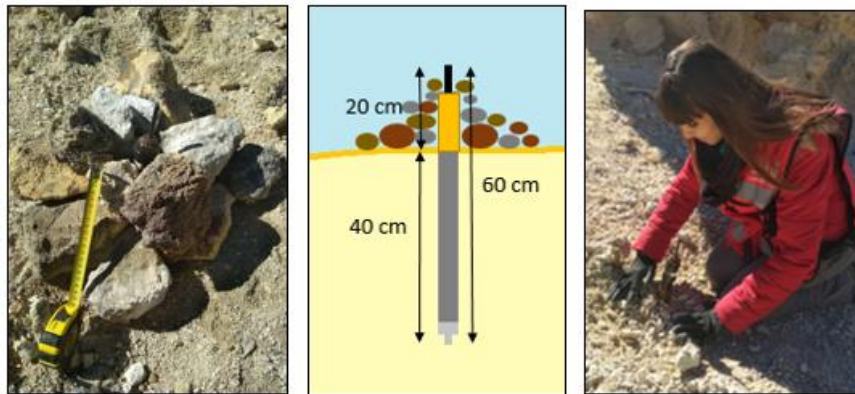


Figura 2.6. Instalación de un nodo de medida de temperatura en el suelo.

Unidad de control

El microcontrolador, encargado de la gestión del termómetro, ha de cumplir un requisito crucial: deberá tener el consumo lo más bajo posible puesto que se pretende lograr la mayor autonomía posible empleando una batería pequeña como fuente de alimentación. Atendiendo a este requisito y teniendo en cuenta el tamaño y el precio, se probaron diferentes microcontroladores con objeto de elegir el más apropiado: el ATMEGA328 [83]

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

de Microchip, el STM32F103C8T6 [84] de STMicroelectronics y el PIC18LF25K40 [85] y PIC16LF1788 [86] de Microchip. Utilizando una batería de litio de 3.7V y 2600 mAh se programó cada uno de estos microcontroladores para la adquisición de temperatura midiéndose el consumo total durante la operación de medida ("modo operación") y durante el modo sleep (esperando la próxima adquisición). La Tabla 2.2 muestra los resultados obtenidos:

Microcontrolador	Modo sleep (μ W)	Modo operación (mW)
ATMEGA328	16.28	89.54
STM32F103C8T6	12.58	190.92
PIC18LF25K40	45.88	69.93
PIC16LF1788	2.96	70.3

Tabla 2.2. Consumo de microcontroladores testados en modo operación y modo sleep.

Dados los requisitos preestablecidos y teniendo en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 2.2, el microcontrolador elegido para el diseño es el PIC16LF1788, cuyas características principales se recogen en la Tabla 2.3.

PIC16LF1788	
Memoria de Programa	28 KB (Flash)
Velocidad CPU/Oscilador interno	8 MIPS/ 32 MHz
SRAM	2048 Bytes
EEPROM	256 Bytes
Periféricos de comunicación digital	1-UART, 1-SPI, 1-I ² C,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

	1MSSP(SPI/T ² C)
Timers	2 x 8-bit 1 x16-bit
ADC	11 ch, 12-bit
Rango de temperatura	-40 to 125°C
Rango de tensión de funcionamiento	1.8 to 3.6 V
Bajo consumo	Si

Tabla 2.3. Características del microcontrolador PIC16LF1788

El microcontrolador se alimenta directamente desde la fuente de alimentación seleccionada para el termómetro, empleando un diodo para no sobrepasar la tensión máxima de funcionamiento del mismo (3.6 V).

Por otra parte, aunque el microcontrolador dispone de un oscilador interno para el cual se ha seleccionado una frecuencia de 1 MHz, se ha incluido de manera adicional un reloj de cuarzo externo de 32768 Hz. Este reloj externo se hace necesario en los momentos en los que se programa al microcontrolador en "power-down mode" (comúnmente conocido como modo sleep), con el cual la mayoría de funcionalidades del microcontrolador, incluido el oscilador interno, quedan deshabilitadas para lograr un consumo ultra reducido de energía. Siendo así, se ha empleado este reloj de cuarzo externo para poder devolver al microcontrolador de modo sleep a su modo de funcionamiento normal (o lo que es lo mismo, "despertarlo") valiéndonos de las interrupciones externas generadas por dicho reloj.

También se ha habilitado una de las entradas del microcontrolador para la recepción de interrupciones externas procedentes del módulo de comunicaciones las cuales se corresponden con la recepción de un paquete de información. Mediante dichas interrupciones también se podrá despertar al microcontrolador en caso de encontrarse en modo sleep.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Medida de la temperatura

Las medidas de temperatura efectuadas por los nodos finales se realizan por medio de una RTD de platino, concretamente un sensor PT100 [87] (alambre de platino que a 0 °C tiene una resistencia de 100 Ω y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica), en conjunción con un MAX31685 [88], que se encarga de la conversión de los valores RTD en valores de temperatura. El módulo MAX31685 es un amplificador diseñado para leer la baja resistencia RTD y automáticamente compensarlo por la resistencia de los cables de conexión. Este módulo funciona mediante los pines GPIO del microcontrolador, utilizando el protocolo SPI para la comunicación entre ambos (Figura 2.9). Su alimentación a 3.3V también viene dada a través de uno de los pines GPIO del microcontrolador PIC16LF1788. Como tanto la comunicación de microcontrolador con este módulo como la comunicación con el módulo de comunicaciones se realiza a través del protocolo SPI, se hace necesario el uso de un "chip select" que permita seleccionar en cada momento con qué módulo está comunicando el microcontrolador.

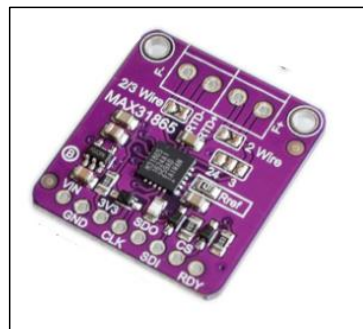


Figura 2.7. Módulo MAX31685 de Adafruit.

Tal y como ya se especificó anteriormente, los sensores PT100 se introdujeron dentro de una punta de aluminio para garantizar la protección del sensor ante la corrosión de los gases ácidos. Para esta punta de aluminio se realizaron, con la ayuda de un torno, dos diseños diferentes: uno con forma cónica y otro con forma cilíndrica. Tras ser testados en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

laboratorio, se verificó que la punta con forma cilíndrica ofrecía una mejor respuesta permitiendo el flujo de calor más rápido y uniforme desde el exterior al PT100, tomándose la misma para el diseño definitivo del termómetro (Figura 2.5). Así, se introdujo los PT100 dentro de cada punta metálica cubriéndolo con pasta térmica para favorecer la distribución del calor, y se selló la entrada de la punta con resina para garantizar el aislamiento del PT100 del ambiente ácido (Figura 2.8).



Figura 2.8. (a) Configuración final de las puntas de aluminio junto con los sensores PT100 y (b) Configuración final de los termómetros

Posteriormente, se sometieron estas puntas a un proceso de calibración para lograr que todos los termómetros registren de manera exacta las mismas temperaturas. Así, con la ayuda de un horno de calibración de alta precisión junto con un termómetro comercial de alta precisión ya calibrado y tomado como referencia, se sometieron todos los termómetros a diferentes temperaturas registrando todas y cada una de las medidas de los mismos con objeto de obtener su recta de calibración, empleada a posterior en el software de medida de la temperatura.

Fuente de alimentación

Para la alimentación de los nodos de medida de temperatura se probaron dos tipos diferentes de baterías de litio con objeto de seleccionar la mejor opción: una batería de ion-litio recargable de Samsung [89], y una batería no recargable de litio-cloruro de tionilo de Keeper [90]. Es importante destacar que un requisito importante a la hora de seleccionar tipos de batería a testear fue el tamaño de las mismas, puesto que éstas están integradas en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

la placa hardware del termómetro alojada en el interior del tubo de PVC 32 mm de diámetro. Las especificaciones técnicas de las dos baterías testeadas se muestran en la Tabla 2.4:

	Batería de ion- litio recargable	Batería de litio-cloruro de tioniolo no recargable
Tipo	18650	AA
Voltaje nominal	3.7 V	3.6 V
Voltaje de carga	4.2 ± 0.05 V	-
Voltaje de corte por descarga	2.75 V	2.0 V
Capacidad	2600 mAh	2400 mAh
Rango de temperatura de funcionamiento	-20 → +60°C	-55 → +85°C

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de las baterías testeadas.

A primera vista puede parecer que la batería recargable era la mejor opción, dada su mayor capacidad y su característica de batería recargable. Sin embargo, teniendo en cuenta: (i) el rango de temperatura de funcionamiento de las baterías, (ii) el rango de temperatura esperado en el área volcánica (hasta 85°C), y (iii) la facilidad de compra, la elección no es tan evidente. Por ello, las dos baterías se utilizaron para testear en campo cuál era la mejor opción y seleccionar la más adecuada en base a dichas pruebas de campo (ver Sección 2.7). Con objeto de observar y monitorizar su rendimiento, se empleó el conversor ADC del microcontrolador PIC16LF1788 que dispone de una referencia interna de 2.048 V para controlar su voltaje en tiempo real. La batería se conecta al mismo a través de un divisor de tensión para ajustar los rangos de tensión de la batería a los rangos del conversor ADC (Figura 2.9). Las resistencias escogidas para el mismo son de 10 MΩ para garantizar un

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

bajo consumo del divisor. De esta forma, se obtiene el parámetro de estado de salud (SOH) de cada termómetro que nos da idea de su evolución y tiempo de vida.

Comunicaciones

Para la comunicación de los nodos de medida de temperatura se incorpora al hardware un módulo de comunicaciones Ra-02 junto con una antena de 2dBi. Este módulo se alimenta directamente desde la batería del termómetro, empleando un diodo para no sobrepasar la tensión máxima de funcionamiento del mismo (3.7 V), y se comunica con el microcontrolador a través de los pines GPIO del microcontrolador, utilizando el protocolo SPI (Figura 2.9). Como ya se ha indicado anteriormente, tanto la comunicación de microcontrolador con el Ra-02 como con el MAX31685 se realiza a través del protocolo SPI. Por ello se hace uso de un "chip select" para cada módulo, que permite seleccionar en cada momento con qué módulo está comunicando el microcontrolador. La alimentación del módulo se lleva cabo directamente desde la batería

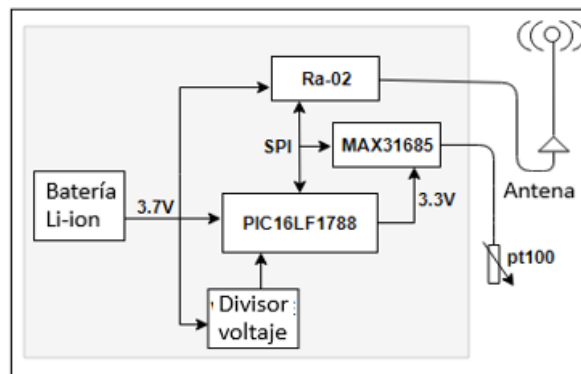


Figura 2.9. Esquema hardware de los termómetros.

2.3.3. Repetidor

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Las áreas volcánicas generalmente muestran una orografía compleja e irregular caracterizada por profundos barrancos y una gran cantidad de obstáculos como conos de ceniza. Por esta razón, se tuvo que desarrollar un repetidor con el objetivo de extender la cobertura del gateway, que actuase como punto medio entre este último y los nodos finales (Figura 2.3).

Para reducir el tiempo de desarrollo, el repetidor se diseñó tomando como base el hardware de los nodos finales sobre el que se realizaron diferentes modificaciones. Por una parte, se suprimió el módulo de conversión de RTD a valores de temperatura (MAX31685) y la RTD puesto que el repetidor no efectúa tareas de medida de la temperatura. Su hardware queda compuesto por lo tanto por un microcontrolador PIC16LF1788 como unidad de control y un módulo LoRa Ra-02 junto con una antena de 2 dBi para las comunicaciones (Figura 2.10). En cuanto a la alimentación, es necesario destacar que este dispositivo está en modo recepción la mayor parte de su ciclo de funcionamiento (Sección 2.4.2), lo cual deriva en que tenga un mayor consumo que los nodos finales (Tabla 2.6). Por lo tanto, el repetidor fue adaptado para ser alimentado por medio de una batería de 12 V junto con un panel solar.

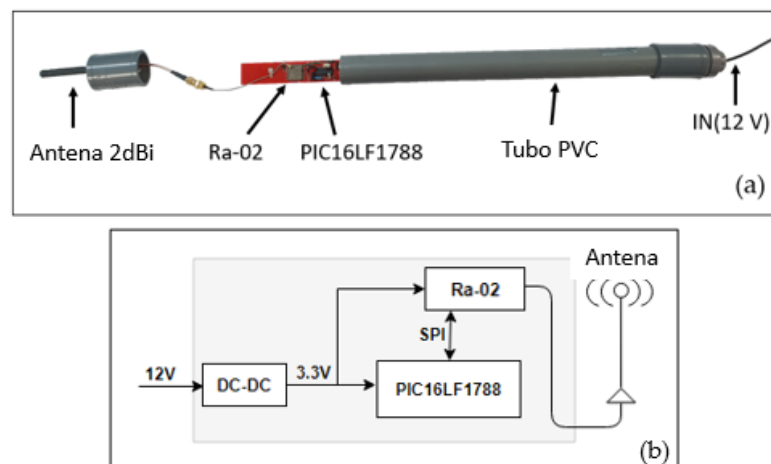


Figura 2.10. Repetidor. Configuración (a) y esquema hardware general (b).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

2.4. Red para la medida de temperatura a determinada profundidad en zonas de anomalías térmicas. Software.

Para la operación de funcionamiento de la red se desarrolló un protocolo de comunicación. En este protocolo no hay posibilidad de colisión entre mensajes, ya que ningún elemento de la red transmite de manera simultánea a otro. Por esta razón, se utiliza un único canal. Cuando comienza el proceso de comunicación, los primeros elementos en establecer comunicación, esto es el gateway y el repetidor, tienen programados los mismos parámetros de configuración (SF y BW), teniendo los termómetros configurado un SF diferente. El proceso puede resumirse de la siguiente forma: cuando es el momento de realizar una adquisición de temperatura, el gateway se comunica únicamente con el repetidor y prueba si éste está disponible. En caso afirmativo, el gateway envía el comando de adquisición de temperatura al repetidor y permanece un tiempo específico a la espera de la llegada de los datos de medida de temperatura sin procesar. Cualquier mensaje procedente del gateway será recibido y decodificado por el repetidor, puesto que éste está en modo escucha permanente y configurado con el mismo SF, pero no por los termómetros, ya que están configurados con un SF diferente.

El repetidor, a cargo de reenviar la instrucción recibida a los nodos finales, cambia su configuración de parámetros para hacerla coincidir con la configuración de los termómetros y lograr que la comunicación entre ellos sea posible. El repetidor les envía el comando de adquisición de temperatura y queda a la espera de las respuestas. Los termómetros reciben el comando, realizan las tareas asociadas que correspondan y envían la información al repetidor durante su turno de transmisión (el termómetro 1 espera un segundo y transmite, el termómetro 2 espera dos segundos y transmite, y así sucesivamente). El repetidor recibe los datos en bruto procedentes de los termómetros, vuelve a la configuración inicial de los parámetros y transmite la información al gateway, encargado de almacenarla y sincronizarla con el centro de datos (Figura 2.11).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

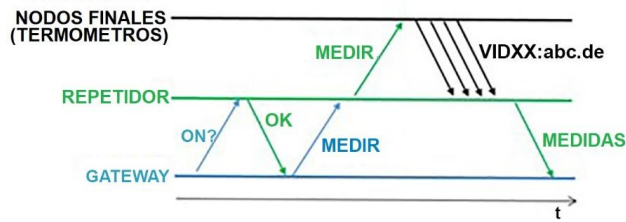


Figura 2.11. Protocolo de medida.

Para gestionar la red correctamente, se llevó a cabo un desarrollo de software. El conjunto de programas y scripts desarrollados incluyen varias tecnologías y lenguajes de programación como: Python, C y HTML, ejecutando cada uno en diferentes dispositivos de la red. Algunos scripts son ejecutados usando Linux cron, que es un administrador de procesos en segundo plano capaz de ejecutar procesos a intervalos regulares programables.

Los programas compilados y los scripts empleados se enumeran en la Tabla 2.5:

Dispositivo	Software/Script	Ejecución	Lenguaje de programación	Propósito
Gateway	master_main.py	Cada 10 min (por defecto)	Python	Petición de valor de temperatura a los nodos finales
	synch.sh	Cada 10 min	Consola Bash de Linux	Sincroniza los datos entre el gateway y el servidor del centro de análisis de datos
	Rssi.py	A voluntad del usuario	Python	Petición del RSSI de cualquier elemento de la red
	master_1sample.py	A voluntad del usuario	Python	Petición de valor de temperatura a los nodos finales
Repetidor	Repeater.cpp	Continua	C	Transmite mensajes

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

				entre el gateway y los dispositivos finales
Nodo final	End_device.cpp	Continua	C	Medida de la temperatura
Centro de análisis de datos	join.py	Cada 10 min	Python	Unifica todos los archivos diarios de temperatura
	LoRa_represent.py	Cada 10 min	Python	Toma el archivo unido y crea una representación gráfica en HTML

Tabla 2.5. Software/scripts de funcionamiento de la red.

Como puede apreciarse, la mayoría tienen un ciclo de vida corto, una vez que cumplen su cometido finalizan hasta su siguiente ejecución.

2.4.1. Software del gateway.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el gateway es el elemento que se encarga de administrar la red inalámbrica ejecutando el script master_main.py (Tabla 2.5 y Figura 2.12). En primer lugar, testea si el repetidor está disponible. En caso negativo, el proceso finaliza hasta la próxima adquisición. En caso afirmativo, el gateway envía el comando de adquisición de temperatura al repetidor, que a su vez reenvía la instrucción haciéndola llegar a los nodos finales. Este comando tendrá la estructura "MIDE:XX" siendo XX el tiempo de muestreo establecido en minutos. Será necesario enviar este tiempo a los termómetros para que en base a ello ajusten sus ciclos de funcionamiento. Una vez enviado dicho comando, el gateway quedará a la espera de la información de vuelta durante un tiempo específico que dependerá del número de termómetros que compongan la red (tiempo de margen de 20 segundos + 1seg* número total de termómetros). Si transcurre este tiempo sin recibirse nada, el proceso finalizará hasta la próxima adquisición. Si por el contrario sí se recibe paquete, se procesará la información recibida por un lado

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

identificando y diferenciando los valores de temperatura, RSSI y voltaje de batería recibidos y sus termómetros de procedencia, y por otro lado aplicando a cada valor de temperatura las curvas de calibrado de cada sensor de temperatura (incluidas en master_main.py) en función del termómetro de procedencia. Estos datos serán almacenados junto con la marca de tiempo correspondiente en una unidad flash USB. Cabe destacar que, si se identifica que falta alguna medida por parte de alguno de los termómetros, el valor almacenado será "NaN". La memoria de almacenamiento tiene una estructura de carpetas anidadas de la siguiente manera: / thermometer_data / year / month, en el que los archivos se almacenan en archivos diarios.

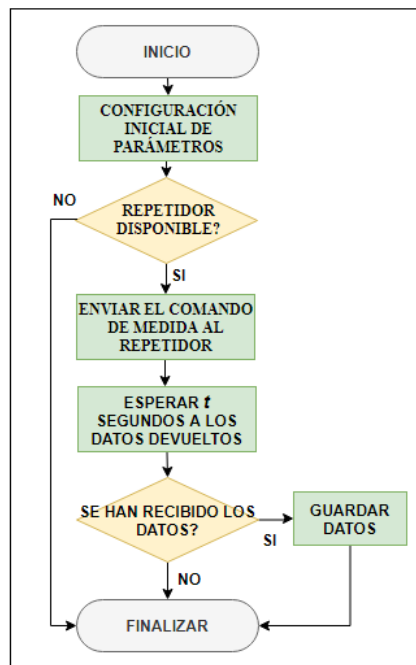


Figura 2.12. Diagrama de flujo del software del gateway.

Usando sync.sh (Tabla 2.5), que se ejecuta de manera predeterminada cada 10 minutos, se realiza una copia/sincronización de los datos almacenados en archivos y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

directorios de forma local en el gateway en un servidor remoto situado en el centro de análisis de datos. La transferencia de datos se realiza utilizando la herramienta rsync (Remote Sync) de Linux [91], que minimiza el volumen de datos transmitidos, ya que emplea un algoritmo de codificación delta que solo copia los bytes que se han modificado desde la versión anterior del archivo. De esta forma, la primera vez copia todo el contenido de un archivo o un directorio desde el origen al destino, pero la siguiente vez, copia solo los bloques y bytes modificados al destino.

El script `master_onesample.py` (Tabla 2.5) funciona de la misma manera que `master_main.py` pero, al enviar el comando de medida de temperatura a los dispositivos finales, tras enviar el correspondiente dato medido éstos permanecerán en modo recepción a la espera de la recepción de cualquier otro paquete en lugar de pasar a modo sleep para ahorrar energía. Esta ligera diferencia permite utilizar este script durante la instalación y/ o cuando se desea obtener valores de temperatura en momentos específicos. Si el consumo de los dispositivos finales y la fuente de alimentación no constituyeran un problema, este script podría usarse perfectamente como script para administrar el funcionamiento de la red en lugar de `master_main.py`.

El último script que se ejecuta en el gateway es `Rssi.py` (Tabla 2.5), solo ejecutado a voluntad del usuario. Este script permite conocer el nivel RSSI de cada dispositivo en la red inalámbrica. En primer lugar, prueba si el repetidor está disponible y, de ser así, envía la solicitud RSSI para un determinado dispositivo de la red del cual quiera conocerse este valor, pudiendo ser el repetidor o cualquier nodo final. Este mensaje tendrá el formato "RSSI:XX", donde XX es el identificador del elemento destinatario del mensaje y, por consiguiente, aquel elemento del cual se desea conocer el parámetro. Tras enviar el mensaje, el gateway esperará durante un período de tiempo fijo (tiempo de margen de 5 segundos + 1seg* número total de termómetros) la información solicitada. Si se solicita el parámetro al repetidor, el nivel RSSI es el nivel de potencia de la señal de radio recibida en el gateway emitida por el repetidor. En cambio, si se solicita a un nodo final, el nivel RSSI es el nivel de potencia de la señal de radio recibida en el repetidor emitido por el nodo final. Este script, además de utilizarse cuando se desea obtener valores de RSSI en momentos específicos, también puede utilizarse durante la instalación de la red de manera que

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

podamos determinar dónde colocar los nodos finales de manera que estos niveles se sitúen dentro de los márgenes de sensibilidad para la recepción de paquetes (-123 dBm), garantizándose así la recepción de una proporción aceptable de los mensajes procedentes de dichos dispositivos finales.

2.4.2. Software del repetidor

El programa Repeater.cpp (Tabla 2.5) administra la operación del repetidor, para lo cual se ha programado una máquina de estados reflejada en la Figura 2.13:

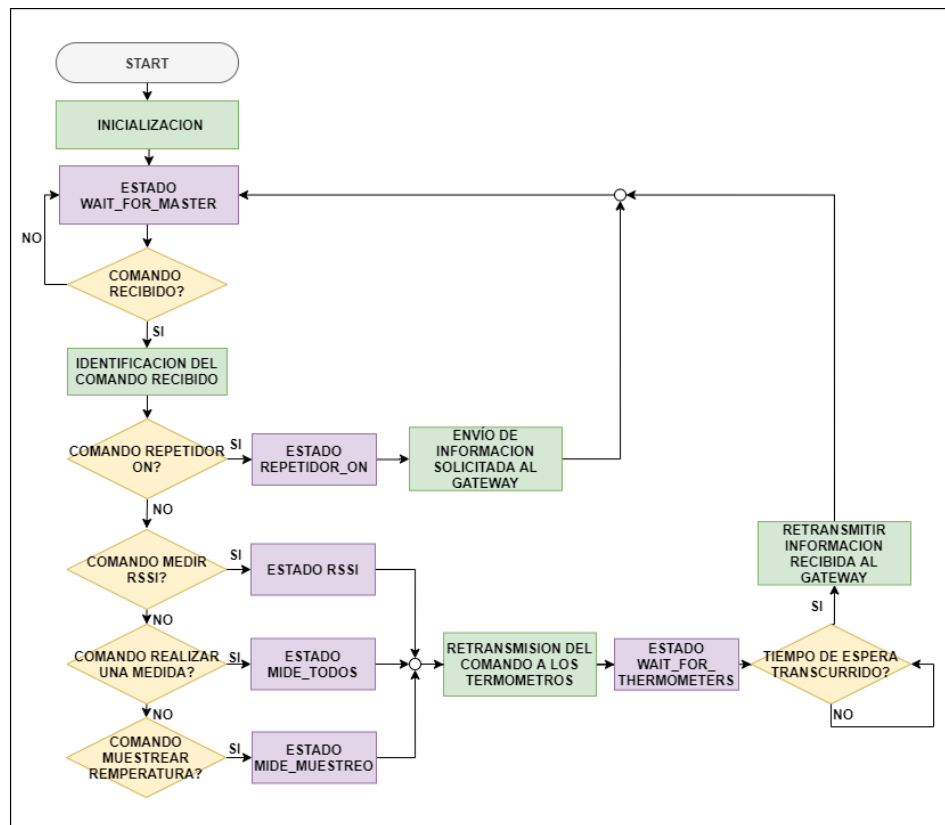


Figura 2.13. Diagrama de estados del repetidor.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Así, el dispositivo se encuentra durante la mayor parte del tiempo y de manera predeterminada en modo "WAIT_FOR_MASTER", o lo que es lo mismo, en el modo recepción (Sección 2.4.3), lo cual significa que siempre se encuentra a la escucha y espera de la recepción de mensajes procedentes del gateway (para ello su SF y BW coinciden con los programados en el gateway, pero no con los de los nodos finales). Al recibir un paquete, dependiendo del comando incluido y su destinatario, el repetidor transitará a los estados REPETIDOR_ON, RSSI, MEDIR_TODOS o MEDIR_MUESTREO y con ello ejecutará acciones diferentes:

- Si la función del comando recibido es la de testear si el repetidor está disponible, este pasará a modo REPETIDOR_ON, responderá al gateway indicando su disponibilidad y regresará al modo WAIT_FOR_MASTER.
- Si la función del comando recibido es la de conocer el parámetro RSSI del repetidor, éste pasará a modo RSSI, responderá al gateway la información correspondiente y regresará al modo WAIT_FOR_MASTER. Si por el contrario se desea saber el RSSI de los termómetros, el repetidor transitará de modo WAIT_FOR_MASTER a modo RSSI, reenviará el comando a los termómetros (para lo cual ajustará los parámetros de configuración de manera que coincidan con los establecidos para éstos), pasará a modo WAIT_FOR_THERMOMETERS, y una vez reciba la respuesta, la reenviará al gateway y retornará a modo WAIT_FOR_MASTER configurando los parámetros iniciales y quedando a la espera de un nuevo mensaje.
- Tanto si la función del comando recibido es la de que los termómetros efectúen una medida y queden en modo escucha como si es tomar una medida y pasar a modo sleep hasta el próximo muestreo, el repetidor pasará de modo WAIT_FOR_MASTER a modo MEDIR_TODOS o MEDIR_MUESTREO respectivamente. En este punto, modificará los parámetros de configuración y reenviará el mensaje a los termómetros, pasando a modo WAIT_FOR_THERMOMETERS durante un tiempo predefinido. Una vez reciba la respuesta/transcurra el tiempo de espera, el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

repetidor establecerá la configuración de parámetros inicial y enviará la información recibida al gateway y retornará a modo WAIT_FOR_MASTER, quedando a la espera de un nuevo mensaje.

Así, el funcionamiento del repetidor podría quedar resumido de la siguiente forma:

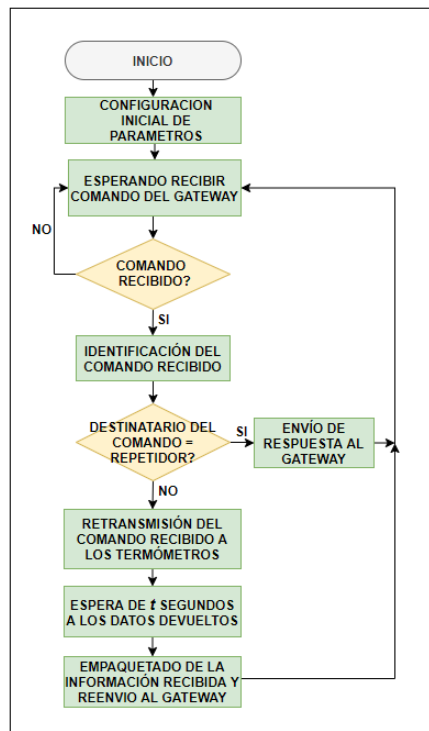


Figura 2.14. Diagrama de flujo del funcionamiento del repetidor.

Por un lado, si el destinatario del comando recibido por el repetidor es un nodo final, el repetidor transmite el mensaje recibido y queda a la espera de la respuesta al mismo durante un período de tiempo fijo que depende del número de dispositivos finales que componen la red. A continuación, empaqueta toda la información recibida de los dispositivos finales, agrega información adicional como el RSSI de cada nodo final, la envía al gateway y regresa al modo recepción. Por otro lado, si el destinatario final es el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

repetidor en sí, responde automáticamente la información solicitada y vuelve al modo recepción.

Es necesario mencionar que, para la medida de la temperatura, cada termómetro responde un total de 24 bytes. De aquí es necesario destacar dos puntos. Por un lado, es el repetidor el que determina el número máximo de termómetros que pueden componer la red. Esto se debe al tamaño de memoria de la que dispone el microcontrolador empleado, que albergará el programa software diseñado junto con todas las variables definidas en el mismo. Teniendo en cuenta lo mencionado, se presenta un límite a la hora de definir un buffer en el que se vayan almacenando todos los paquetes enviados por los termómetros de la red (de 24 bytes cada uno). El tamaño para este buffer es de 1000 caracteres, lo cual establece un límite máximo total de 40 termómetros para la red. Por otra parte, dado que el tamaño máximo de los paquetes LoRa es de 256 bytes, en función del número de termómetros que compongan la red y el número de respuestas recibidas por el repetidor, este último realizará el reenvío del paquete de información al gateway en una única tanda o en varias.

2.4.3. Software de los nodos finales

El programa `end_device.cpp` (Tabla 2.5) administra la operación de los dispositivos finales por medio de cinco estados diferentes (Figura 2.15):

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

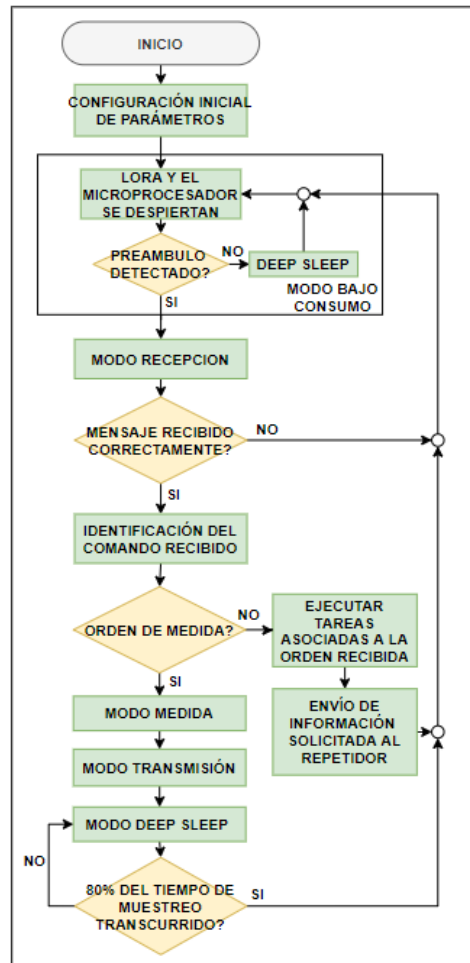


Figura 2.15. Diagrama de flujo del funcionamiento de los termómetros.

Modo deep sleep

El microcontrolador está en modo de reposo profundo, quedando deshabilitados todos sus periféricos. Además, el módulo LoRa se encuentra deshabilitado en modo sleep y el resto de elementos hardware, apagados. En este modo, el nodo final muestra el consumo de energía más bajo (Tabla 2.6). Al recibir el comando para efectuar la medida de la temperatura, los termómetros reciben dentro de ese paquete el tiempo de muestreo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

programado en el sistema. Así, una vez finalice el periodo de tiempo reservado a la transmisión de cada termómetro de la información solicitada al repetidor, los termómetros entrarán en modo deep sleep, permaneciendo en el mismo durante el 80% del tiempo de muestreo programado. Haciendo uso del reloj de cuarzo externo para llevar la cuenta del tiempo, se programará el timer del microcontrolador, con cuentas sucesivas de 1 segundo que permitirán ir llevando la cuenta de los segundos transcurridos desde el inicio del modo deep sleep. Una vez se alcance el tiempo total, el dispositivo pasará a modo bajo consumo.

Modo bajo consumo

En este modo el nodo final está esperando detectar cualquier preámbulo en el aire. Para lograr reducir el consumo mientras el termómetro se encuentra en este modo, el termómetro llevará a cabo un ciclo periódico de $T=1$ segundo reflejado en la siguiente figura:

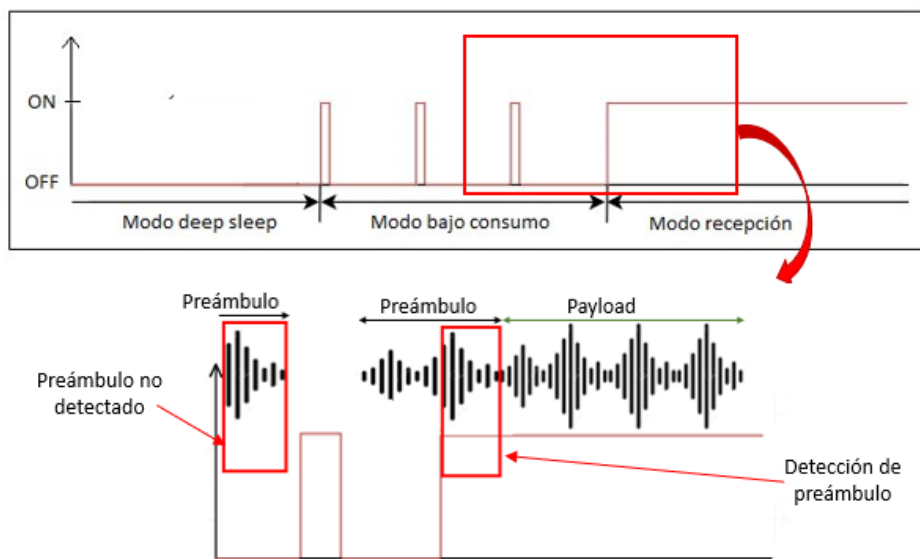


Figura 2.16. Diagrama de funcionamiento del modo bajo consumo del repetidor.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Como puede apreciarse, en el modo bajo consumo, el microprocesador y el módulo LoRa se activan durante 20 milisegundos por medio del temporizador del microprocesador para verificar si detectan algún preámbulo de mensaje en el aire. Si es así, el nodo final cambia al modo de recepción. En caso contrario, regresará a modo deep sleep durante un tiempo de 980 milisegundos. Este ciclo se repetirá hasta que se produzca la detección de algún preámbulo.

Para que se produzca la detección del preámbulo son necesarios al menos 4.25 símbolos. Teniendo en cuenta que un ciclo del modo de bajo consumo dura 1000 milisegundos, se ha de escoger un preámbulo de longitud suficiente para garantizar que se produzca la detección incluso en el caso más desfavorable (Sección 2.7.2)

Modo recepción

El nodo final entra en este modo cuando detecta un preámbulo en el aire, y permanece en el mismo hasta que reciba el mensaje completo. Si el mensaje se recibió correctamente, el nodo final identifica la orden recibida y ejecuta la tarea correspondiente. En caso de que el comando recibido sea para medir la temperatura, el nodo final cambia al modo de medida. Si el comando recibido es una solicitud del RSSI, el termómetro cambia directamente al modo de transmisión y envía la información correspondiente.

Para considerar que un mensaje se recibe correctamente es necesario que se den una serie de circunstancias: que se haya producido la interrupción RxDone que indica que se ha recibido el mensaje (bit RxDone=1), que se haya recibido un encabezado del paquete válido (bit ValidHeader=1) y que no haya habido ningún error en la recepción del paquete (bit PayloadCrcError=0). Estos bits se encuentran dentro del registro RegIrqFlags, en el que se reflejan los bits de las interrupciones del módulo [73], [74].

Modo de medida

En este modo, el nodo final realiza la medida de la temperatura realizando diez adquisiciones consecutivas en un segundo y calculando luego una media. Además, también se recabará el nivel de voltaje de la batería, efectuando diez adquisiciones y realizando una

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

media. Una vez disponga de la información solicitada, el nodo la encapsulará en un paquete y esperará en modo sleep para enviarla al repetidor en su turno correspondiente. El tiempo de espera de turno en segundos será igual al número de identificación de cada nodo final dentro de la red. Una vez llegue el turno del termómetro, éste pasará a modo transmisión.

Modo transmisión

En este modo, el nodo final envía los datos solicitados al repetidor. El envío de los datos se efectúa empleando el siguiente formato: VIDXX:abc.de,f.gh, donde ID es el identificador del nodo final, abc.de es el dato de temperatura solicitado y, f.gh es el voltaje de la batería. Tras transmitir el mensaje, cada termómetro pasará a modo deep sleep durante el tiempo necesario para evitar la recepción de los paquetes enviados por los termómetros sucesivos al repetidor (el tiempo de deep sleep será igual $t_1 - t_2$ segundos, t_1 un tiempo en segundos igual al número total de termómetros en la red y t_2 un tiempo en segundos igual al número identificador del termómetro en cuestión). Finalizada la transmisión de paquetes por parte de todos los termómetros de la red, éstos pasarán a modo deep sleep de manera simultánea y permanecerán en dicho modo durante el 80% del tiempo de muestreo para ahorrar tanta energía como sea posible.

2.4.4. Software del servidor de datos en el centro de análisis.

Dado que el gateway sincroniza los datos con el servidor del centro de análisis de datos cada 10 minutos, esto hace posible mostrar los diferentes parámetros de la red en tiempo real. Para ello se desarrolló una página web en la que los usuarios pueden verificar el funcionamiento del sistema y ver todos los datos en tiempo real.

La página web se construye mediante los scripts de Python join.py y LoRa_represent.py (Tabla 2.5), que se ejecutan cada 10 minutos usando cron de Linux. El script join.py se encarga de unir en un solo archivo todos los archivos almacenados en las carpetas anidadas en la base de datos y que contienen los datos a representar. A continuación, el script LoRa_represent.py (Tabla 2.5) lee el archivo generado por join.py y traza los datos en archivos HTML por medio de la biblioteca Bokeh [92] y P5.JS [93].

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

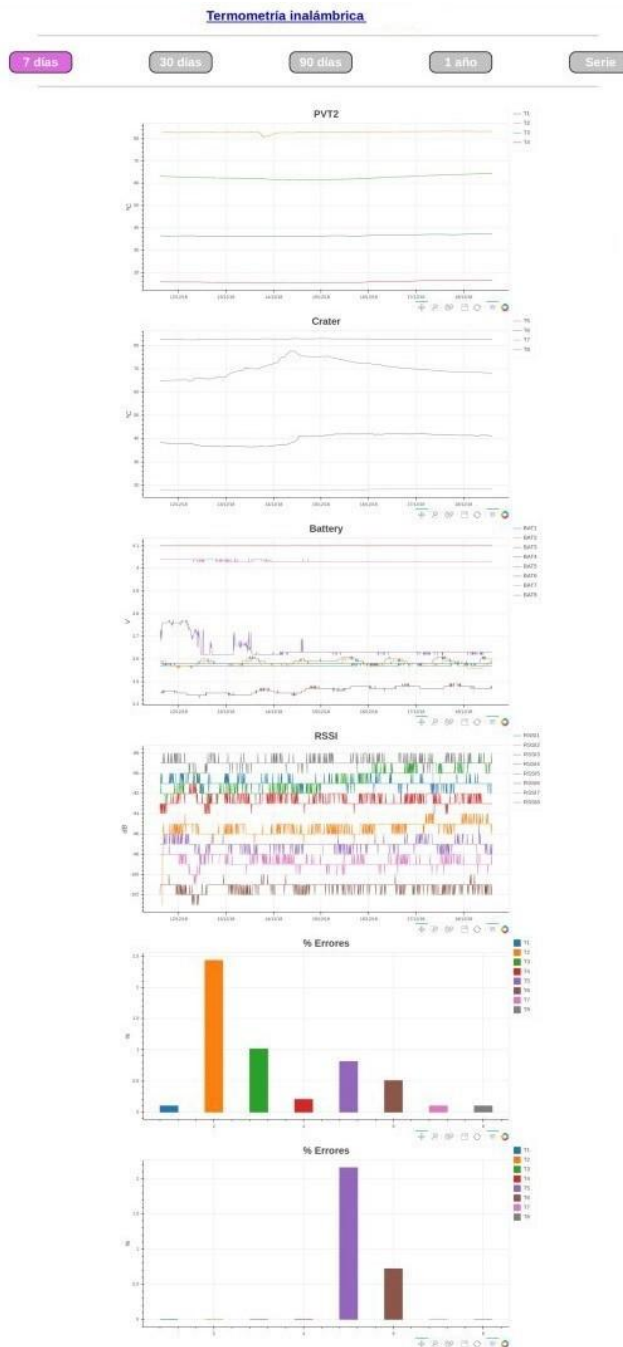
Como resultado, se obtienen cinco archivos HTML con diferentes períodos de tiempo: 7days.html, 30days.html, 90days.html, 1 año.html y series.html. Cada archivo HTML corresponde a una pestaña diferente dentro de la página web (Figura 2.17), pudiendo los usuarios seleccionar el período de tiempo para el que desean visualizar los datos. Para cada uno de estos archivos mencionados la información se organiza en cinco gráficas de la siguiente manera: valores de temperatura registrados, nivel de batería de cada termómetro, nivel RSSI de cada termómetro, porcentaje de error de medida para cada termómetro en las últimas 24 horas (solo en 7.html archivo) y porcentaje de error de medida para cada termómetro a lo largo del período de tiempo mostrado (Figura 2.17). Las gráficas de porcentaje de error de medida muestran el porcentaje de fallo de cada uno de los termómetros, es decir, el porcentaje para el cual no se ha recibido la medida efectuada por el mismo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"



54

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 2.17. *Página web. (a) Valores de temperatura medidos por los termómetros en el área A; (b) Valores de temperatura medidos por los termómetros en el área B; (c) Nivel de batería de cada termómetro; (d) Nivel RSSI de cada termómetro medido en el repetidor; (e) Porcentaje de error de cada termómetro en los últimos 24h; (f) Porcentaje de error de cada termómetro para el período de tiempo seleccionado.*

2.5. Consumo

Como se ha mencionado anteriormente, el gateway ha sido diseñado para ser instalado en un lugar con acceso a la red de suministro eléctrico y por lo tanto su consumo no es relevante. De forma similar ocurre con el repetidor, que se diseñó para ser alimentado por medio de una batería de 12 V junto con un panel solar que la recargue. Se debe destacar que, a pesar de ello, el diseño hardware y software de ambos ha sido llevado a cabo bajo la misma premisa que los termómetros: lograr un consumo lo más bajo posible.

Dado que los nodos finales se alimentan con pequeñas baterías, el consumo de energía de los mismos se convierte en un punto crítico, debiendo este ser el mínimo posible. Para estimar el consumo en los diferentes modos de funcionamiento (ver Sección 2.4.3), se empleó un nodo final alimentado por una batería de 2200 mAh estableciéndose un período de muestreo de 10 minutos (el más rápido posible). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Modo	Consumo (mA)	Porcentaje por hora	
Transmisión	70	0.0075%	
Recepción	12.2	0.2%	
Deep sleep	0.0035	80%	
Bajo consumo	Sleep	0.0035	19.0699%
	Recepción	12.2	0.3891%
Medida	4	0.3333%	

Tabla 2.6. Consumo total

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Basándonos en estos resultados y tomando un nivel de descarga máximo del 80% para la batería, se estimó teóricamente una vida útil de 2,14 años para los nodos finales utilizando una batería de 2200 mAh.

2.6. Coste económico.

En las Tablas 2.7, 2.8 y 2.9 se muestra el coste total de cada elemento de la red de forma desglosada:

Componentes del nodo final	Precio (€)
Sensor PT100	5.50
MAX31685	4.11
PIC16LF1788	6.04
Estructura externa (tubo de PVC + punta de aluminio)	1.37
Ra-02	3.00
Antena	5.45
Batería de litio	9.54
Cables y componentes	2.00
Coste total de un nodo final	37.01

Tabla 2.7. Coste económico de un nodo final o termómetro.

Componentes del gateway	Precio (€)
Raspberry Pi 3B	35.66
Ra-02	3.00
Antena	22.61
Coste total del gateway	61.27

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Tabla 2.8. Coste económico del Gateway.

Componentes del repetidor	
PIC16LF1788	6.04
Estructura externa (tubería de PVC + punta de aluminio)	1.37
Ra-02	3.00
Antena	5.45
Batería de litio	9.54
Cables y componentes	2.00
Precio total del repetidor	27.40

Tabla 2.9. Coste económico del repetidor.

2.7. Resultados

2.7.1. Emplazamiento de la red

La red se instaló el 20 de noviembre de 2018 en Las Cañadas del Teide en Tenerife, Islas Canarias. El emplazamiento elegido para el gateway fue el Parador Nacional del Teide, mientras que el resto de los elementos (repetidor y ocho termómetros) se colocaron en la parte superior del volcán Teide, áreas A y B (Figura 2.18), donde se encuentran las principales zonas de anomalías térmicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

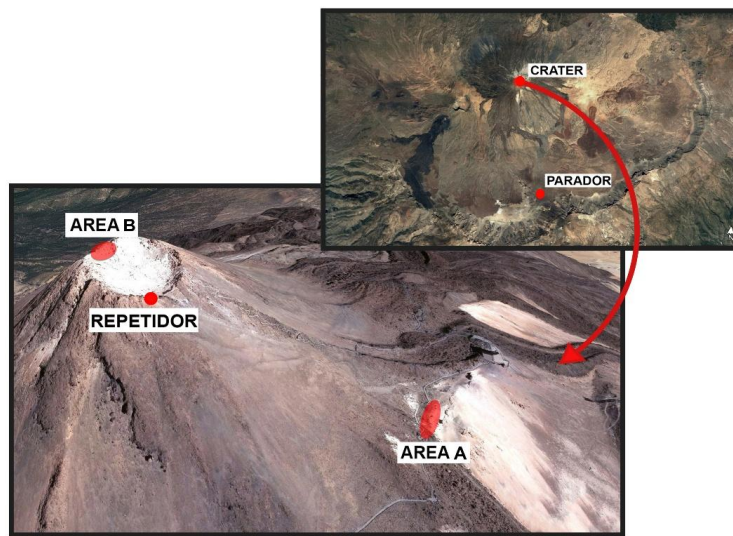


Figura 2.18. Configuración de red inalámbrica instalada en Las Cañadas del Teide, Tenerife. Los dispositivos fueron desplegados de la siguiente forma: el gateway en el Parador, el repetidor en el borde sur del cráter del Teide, y los ocho termómetros en la cima del volcán Teide (áreas A y B).

En el Parador, el gateway se instaló aprovechando la ubicación de una cámara de video que está integrada en el sistema de monitorización de volcanes de Canarias perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (Figura 2.4 (a)).

El repetidor se colocó asegurando una línea de visión adecuada con el Parador para mejorar la intensidad de la señal del enlace gateway-repetidor (Figura 2.18 y enlace 1 en la Figura 2.2).

Las ubicaciones de los termómetros se seleccionaron cuidadosamente en base a los datos recopilados por el proyecto MultiTeide [94] (V. Villasante-Marcos [14], comunicación personal). Desde octubre de 2016, cada tres meses se han llevado a cabo medidas de la temperatura a 40 cm de profundidad en las principales áreas de anomalías térmicas en la parte alta de la cumbre del volcán Teide. Dos de las mismas son las áreas A y B (Figura 2.18). El Área A está ubicada en la zona sureste en la parte superior del edificio

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

“Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica”

del Teide, cerca de las instalaciones del teleférico, y el área B se encuentra dentro del cráter del Teide.

Se tuvieron en cuenta tres criterios principales para seleccionar la configuración final de los ocho termómetros, distribuidos equitativamente entre las dos áreas: (i) puntos que muestren mayores variaciones de temperatura con el tiempo, (ii) puntos que muestren con los valores de temperatura más altos y más bajos, y (iii) monitorización de puntos que muestran menor estabilidad durante todo el año. Considerando esto, la distribución final de termómetros seleccionada se muestra en la Figura 2.19. Se colocaron cuatro termómetros en el área A (T1 – T4) formando un perfil lineal, y los otros cuatro (T5-T8) se desplegaron en el área B, formando un cuadrado.

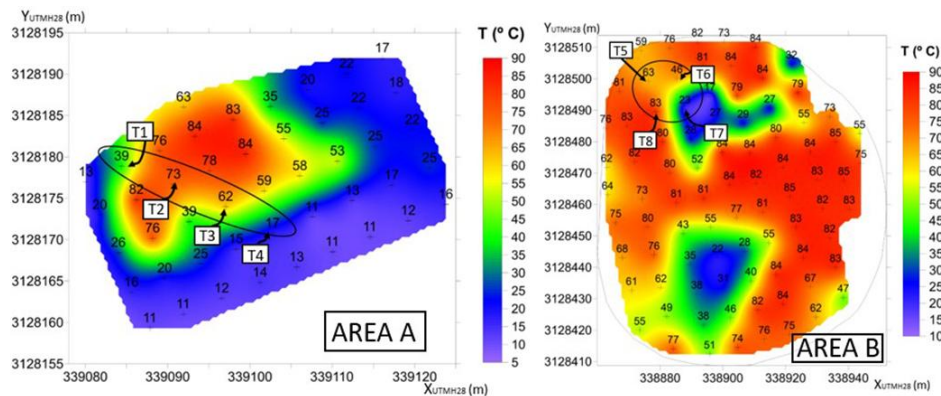


Figura 2.19. Mapas de temperatura de las áreas A y B proporcionadas por las campañas MultiTeide (no publicadas aún). Se resalta la ubicación de cada termómetro dentro de ambas áreas.

Es necesario señalar que la red es escalable, pudiendo expandirse o reducirse el número de dispositivos finales incluso después de desplegar la red, teniendo que modificar únicamente un solo parámetro en la configuración del gateway.

2.7.2. Configuración de la red

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Teniendo en cuenta el diseño final de la red (Figuras 2.18 y 2.19) y con objeto de lograr una operación óptima de la misma, un consumo de energía lo más bajo posible y una sensibilidad suficiente para lograr la detección, los valores seleccionados para los parámetros de configuración de la red se describen a continuación. Es necesario mencionar que hay algunos parámetros LoRa que permanecen fijos como son CF, TP, BW y CR, y otros como SF o la longitud del preámbulo que cambian según los elementos que se comunican:

- CF = 433 MHz, la banda sin licencia (Europa) con el mayor rango.
- TP = 10 dBm (10 mW de potencia radiada efectiva), la potencia de transmisión máxima para asegurar que los mensajes lleguen al receptor.
- CR = 4/5 dado que no hay demasiadas interferencias, logrando un tiempo más corto del mensaje en el aire (cuantos más bits de corrección se usen, más fácil será la corrección de datos, pero mayor será la duración de la transmisión).
- BW = 125 kHz para lograr una sensibilidad suficiente para la detección.
- Para SF, se ha elegido el valor más bajo posible que permita un funcionamiento correcto de la red. Un SF bajo permite menos tiempo en el aire y, por lo tanto, menos consumo (ver Sección 2.2.2 y [73], [74]). Existen varias configuraciones de SF dentro de la red: SF = 7 para los enlaces repetidor-termómetro, y SF = 8 para el enlace de gateway-repetidor por ser más largo que los otros.
- La longitud del preámbulo se adapta a dos situaciones diferentes. Como se mencionó anteriormente, se necesitan al menos 4.25 símbolos para la detección. En casos donde el receptor se encuentra en modo recepción permanentemente, un preámbulo corto será suficiente. Este es el caso de la comunicación gateway-repetidor en ambas direcciones, y también cuando los termómetros hablan con el repetidor (ver Sección 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3). Para los casos mencionados, la longitud del preámbulo elegida es de 12 símbolos. Cuando el repetidor se comunica con los termómetros, éstos últimos se encuentran en modo de baja potencia (consulte la Sección 2.4.3). Teniendo en cuenta que un ciclo del modo de baja potencia dura 1000 milisegundos (980

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

ms en modo deep sleep y 20 ms en modo recepción) y la siguiente ecuación [74]:

$$T_{symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.1)$$

donde T_{symbol} representa la duración del símbolo en segundos o el tiempo necesario para enviar 2^{SF} chips y BW representa el ancho de banda. Para $SF = 7$ y $BW = 125$ kHz, $T_{symbol} = 1.024$ milisegundos. Por lo tanto, se ha elegido una longitud de preámbulo de 1100 símbolos para que incluso en los casos más desfavorables (la transmisión del preámbulo comienza cuando el termómetro pasa al modo deep sleep o poco antes), se produzca la detección.

2.7.3. Datos registrados

La frecuencia de muestreo establecida es de 10 minutos para garantizar un registro adecuado de la temperatura del suelo, aunque se puede modificar en cualquier momento a voluntad del usuario accediendo al gateway a través de Secure Shell (SSH) y modificando el archivo correspondiente.

La red inalámbrica de temperatura ha estado funcionando desde su instalación, lo cual ha permitido la verificación de la robustez de la operación de la red y de cada dispositivo individual, y la calidad de los registros de temperatura. Para mayor claridad en los gráficos de resultados, se mostrará un periodo de funcionamiento de 3 meses (Enero 2019 a Marzo 2019), representativo del funcionamiento de la red. La Tabla 2.10 resume los datos recopilados por la red durante dicho periodo:

	Muestras		T (°C)	RSSI (dBm)	BAT (V)
T1	14522	MIN	31.87	-101	3.27
		MED	36.95	-92	3.55

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

		MAX	40.18	-89	3.58
T2	13005	MIN	61.91	-107	2.57
		MED	82.82	-95	3.56
		MAX	83.88	-92	3.64
T3	14480	MIN	50.52	-123	3.54
		MED	63.17	-89	3.57
		MAX	68.31	-84	3.59
T4	14445	MIN	13.04	-102	3.98
		MED	15.95	-92	4.06
		MAX	18.00	-89	4.10
T5	14466	MIN	58.89	-114	3.61
		MED	68.70	-101	3.87
		MAX	81.09	-95	4.10
T6	14445	MIN	28.68	-115	3.40
		MED	41.08	-103	3.47
		MAX	77.77	-99	3.59
T7	14551	MIN	14.75	-116	3.92
		MED	16.90	-103	3.99
		MAX	18.75	-94	4.08
T8	9565	MIN	79.29	-104	3.43
		MED	82.43	-90	3.56
		MAX	83.41	-86	4.10

Tabla 2.10. Resumen de los datos registrados por la red

En condiciones normales, el funcionamiento de la red es bastante estable y los registros de temperatura de cada termómetro coinciden con los valores esperados según las campañas de MultiTeide (Tabla 2.10 y Figura 2.19). Las variaciones en los valores de temperatura están asociadas a cambios en las condiciones meteorológicas y/o actividad

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

volcánica [95]. Sin embargo, durante este período de tiempo, hubo algunos problemas que afectaron al funcionamiento normal de la red.

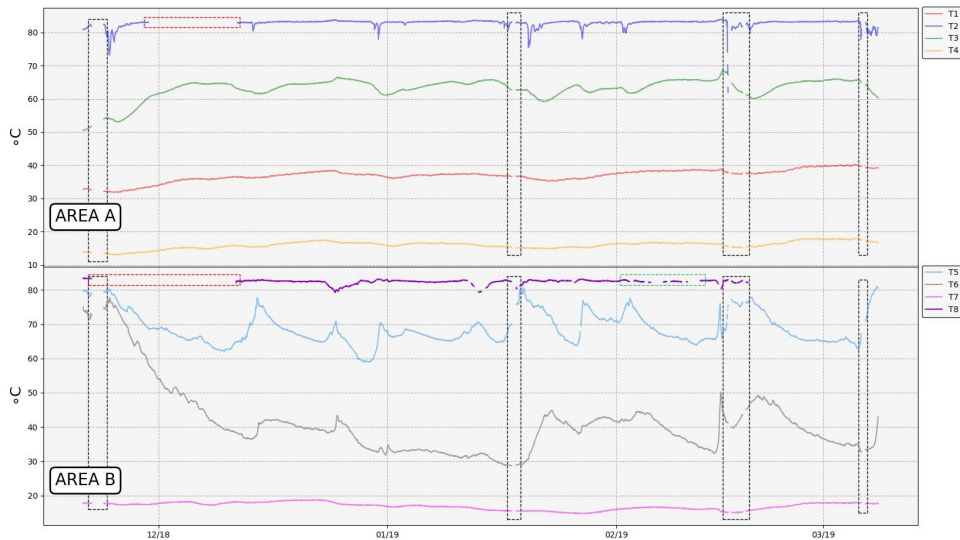


Figura 2.20. Registros de temperatura. Los rectángulos grises discontinuos señalan interrupciones temporales en las comunicaciones debido a condiciones climáticas adversas. Los rectángulos rojos discontinuos resaltan el mal funcionamiento en los termómetros T2 y T8.

Después del despliegue de la red, hubo algunos períodos en los que las condiciones climáticas en Las Cañadas del Teide empeoraron notablemente, especialmente en el cráter del Teide, donde llovió y nevó, y se estableció de forma permanente una capa espesa de nubes. Con ello, la robustez de la red pudo ser probada bajo condiciones climáticas adversas. Debido a la capa de nieve/hielo que cubría tanto el repetidor como los termómetros, el RSSI de todos estos elementos disminuyó notablemente. Además, la capa de nubes asentada de forma frecuente en la parte de la cumbre del volcán Teide llevó a que se produjesen interrupciones en el enlace gateway-repetidor. Esto se debió principalmente a que la antena del gateway tiene baja ganancia, por lo que el enlace gateway-repetidor es el más débil de la red y el más afectado cuando se produjeron condiciones climáticas adversas extremas. Se puede deducir por lo tanto que una posible mejora sería utilizar una antena de mayor ganancia.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

“Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica”

En consecuencia, no se obtuvieron medidas de temperatura durante estos períodos (rectángulos grises discontinuos en las Figuras 2.20 y 2.21). Una vez que las condiciones climáticas pasaron a ser más favorables, la nieve/hielo se disolvió y la red volvió a retomar su funcionamiento nuevamente (Figuras 2.20 y 2.21).

Cuando tiene lugar un error de transmisión, no existe valor de temperatura registrado para ese termómetro en esa muestra, lo cual se traduce en un “gap” en la representación de los datos (Figuras 2.20 y 2.21).

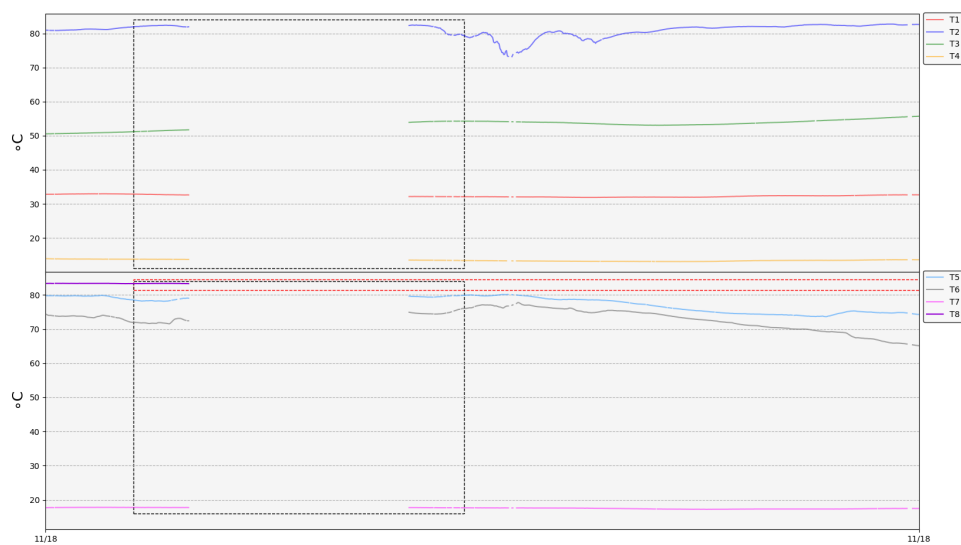


Figura 2.21. Detalle del registro de temperatura cuando hay interrupciones en la operación de la red (resaltado en rectángulos grises) debido a condiciones climáticas adversas.

La Figura 2.22 y la Tabla 2.8 muestran los registros de la batería de cada termómetro. Los termómetros T1, T2, T3, T6 y T8 funcionan con baterías no recargables de 3.6 V, y los termómetros T4, T5 y T7 se alimentan con baterías recargables de ion-litio de 3.7 V. Exceptuando el termómetro T5, cuyos valores registrados son erróneos (Figura 2.22, línea azul en el área B) debido a un problema de hardware con el divisor de tensión que permite medir el valor de la batería, se puede observar que la mayoría de las curvas mostradas son

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Yml1CZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

bastante constantes con una descarga de batería muy lenta y un pequeño rizado inherente al ciclo noche-día.

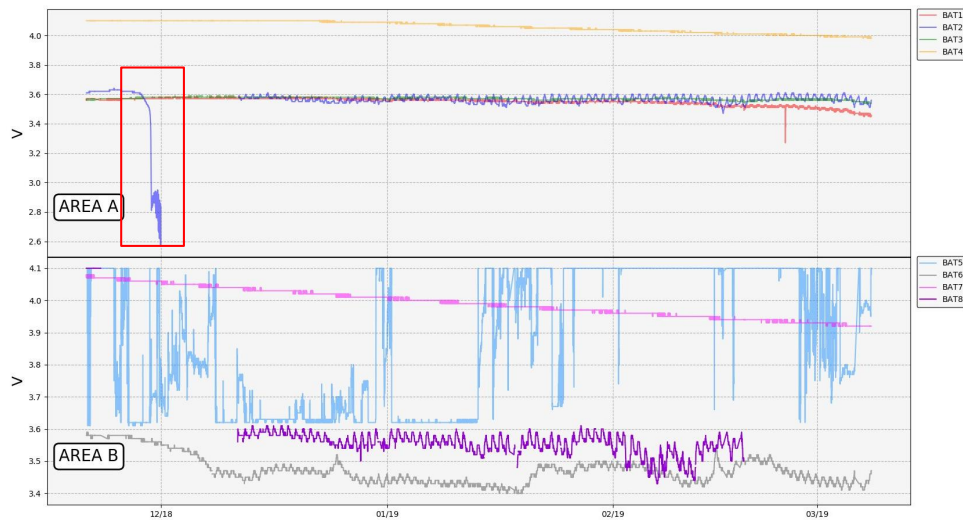


Figura 2.22. Registros del nivel de batería. El rectángulo rojo resalta la descarga de la batería del termómetro T2 debido al sobrecalentamiento.

Además de los problemas de transmisión comentados entre el gateway y el repetidor, la Figura 2.22 también muestra problemas relacionados con las baterías y la temperatura.

Al diseñar el hardware para los termómetros, se supuso que el tubo de PVC podría actuar como protección y aislante de la electrónica contra los gases corrosivos y la alta temperatura del suelo. También se pensó que la parte del tubo que no estaba enterrada actuaría como disipador de calor por encontrarse en contacto con el aire. Mientras los termómetros se probaron en el laboratorio, no surgieron problemas relacionados con las baterías, ya que los valores de temperatura medidos no superaron los 30°C. Sin embargo, una vez que la red se desplegó en el área seleccionada, se observó que las medidas utilizadas para disipar el calor dentro del tubo no funcionaron como se esperaba y, posiblemente, la temperatura dentro del tubo excedió el rango de temperatura recomendado para la batería (Tabla 2.4). Analizando las curvas de capacidad versus corriente

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

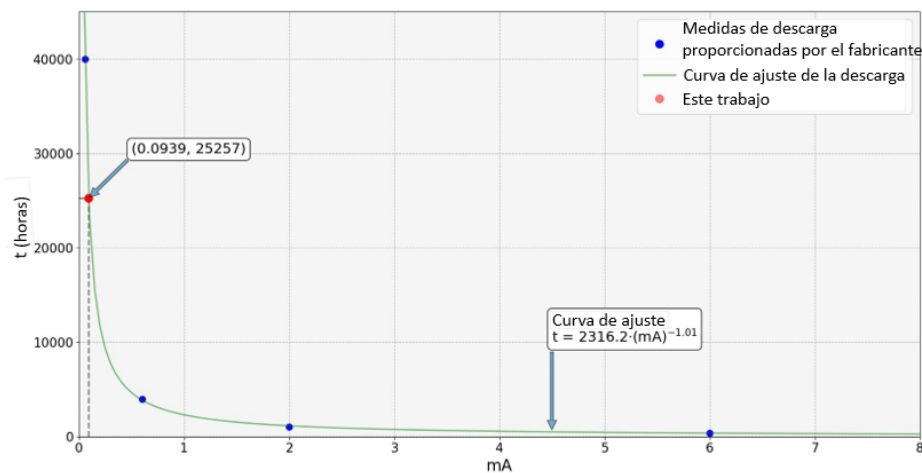
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

dependiendo de la temperatura de operación proporcionadas por el fabricante [90], se puede ver que la capacidad de la batería se ve reducida considerablemente a medida que aumenta la temperatura, incluso aunque el consumo sea mínimo, como es el caso de los termómetros. Como resultado, algunas baterías se agotaron por completo, como puede observarse en la Figura 2.22, y, en consecuencia, los termómetros detuvieron su funcionamiento quedando inoperativos (rectángulos rojos discontinuos en la Figuras 2.20 y 2.21).

Con respecto al termómetro T8, el 8 de noviembre de 2018, se verificó in situ que la batería estaba completamente descargada. La explicación más plausible es que la batería se agotó debido a la disipación de calor ineficiente dentro del tubo del termómetro T8. Sin embargo, el registro del proceso de descarga no se adquirió como ocurrió con el termómetro T2 debido a que, durante los primeros días de operación de la red, las condiciones climáticas no permitieron comunicación entre los dispositivos que la componen.

El problema del sobrecalentamiento afectó no solo la integridad de las baterías, sino también la capacidad y, por lo tanto, la duración de las mismas. Tomando los valores de corriente y el tiempo en horas de la curva de descarga de la batería proporcionada por el fabricante [90], se ha trazado una curva de ajuste (Figura 2.23):



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 2.23. Curva de ajuste para la duración de la batería versus el consumo de corriente. Los puntos azules resaltan los valores obtenidos de las curvas de descarga de la batería proporcionadas por el fabricante. El punto rojo resalta el valor correspondiente a este trabajo

A partir de los valores que se muestran en la Sección 2.5, el consumo medio de un termómetro es de 0.0939 mA. Tomando este valor y la curva de ajuste de descarga que se muestra arriba, el valor estimado de duración de la batería suponiendo un nivel de descarga máximo del 80% es 2,34 años, que es un valor muy similar al calculado teóricamente (Sección 2.5). Sin embargo, tomando las curvas de la capacidad versus corriente dependiendo en la temperatura de operación proporcionada por el fabricante [90], para los rangos de temperatura de funcionamiento de la red, la capacidad de la batería se ve reducida a 1400 mAh y, por lo tanto, 1,46 años sería un valor más preciso para la duración de la batería del dispositivo.

Al analizar el problema del sobrecalentamiento de las baterías, se tomaron una serie de medidas para tratar de asegurar en la medida de lo posible, que no superaran su rango de temperatura de funcionamiento. En primer lugar, las baterías descargadas fueron reemplazadas por baterías no recargables de 3.7 V, cuyo rango de operación es más adecuado para esta aplicación (Tabla 2.4). Luego, para mejorar el enfriamiento de las mismas, se cambiaron desde su posición inicial (Figura 2.5) a la parte superior del tubo de PVC en los termómetros T2 y T8. Además, se colocó un aislante térmico a media altura dentro del tubo para reducir la transmisión de calor desde su parte inferior. Tras estos cambios, el termómetro T8 quedó mal sellado, permitiendo que el agua se filtrara dentro del tubo de PVC, deteriorando la electrónica poco a poco. Este termómetro comenzó a mostrar un mal funcionamiento dos meses después, fallando a la hora de adquirir los valores de temperatura y mostrando algunos problemas de comunicación (que aumentaron el porcentaje de error en la recepción de los paquetes del termómetro T8, Figura 2.25), hasta que finalmente dejó de funcionar. Respecto al resto de la red, ésta quedó completamente operativa nuevamente, registrándose los datos sin problemas gracias a condiciones climáticas favorables (Figura 2.20).

La Figura 2.24 y la Tabla 2.8 muestran los niveles de RSSI de cada termómetro medido en el lado del repetidor. En general, los niveles de RSSI se mantuvieron bastante

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

estables y por encima del límite de sensibilidad de -123 dBm según los parámetros LoRa del enlace repetidor-termómetro (SF = 7 y BW = 125 kHz). Sin embargo, la Figura 2.24 muestra diferentes períodos en los que, debido al empeoramiento de las condiciones climáticas, se produjo una caída en los niveles RSSI asociados a una disminución en la intensidad de la señal. Si se producen grandes atenuaciones de señal, estas pueden llegar a provocar interrupciones en el funcionamiento de la red (rectángulos grises discontinuos en las Figuras 2.20 y 2.21).

A medida que estas condiciones mejoraron gradualmente (desaparición de posibles capas de hielo, visibilidad entre dispositivos mayor, etc.), la red se recuperó y retomó el funcionamiento normal (rectángulos grises en la Figuras 2.20 y 2.21).

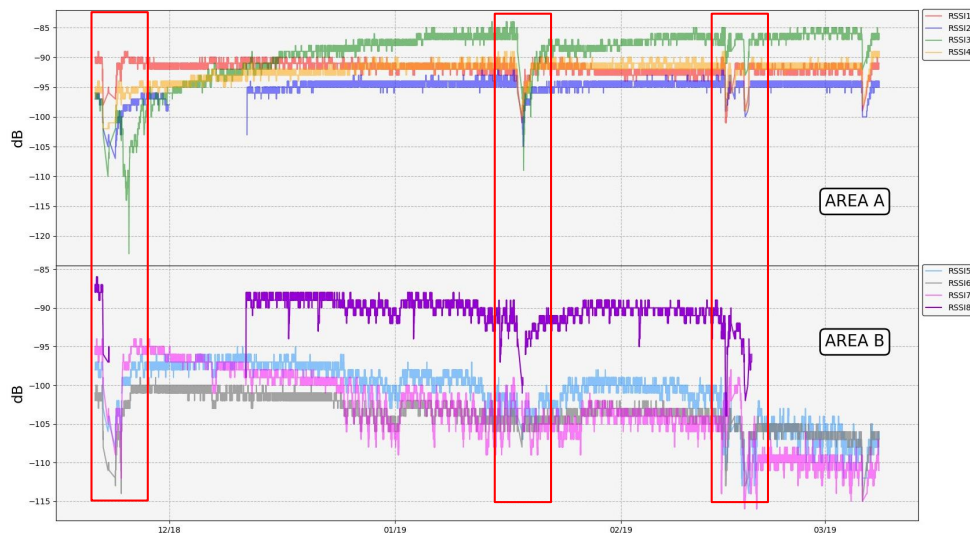


Figura 2.24. Niveles de RSSI de cada termómetro en las áreas A y B medidos en el lado del repetidor. Los rectángulos rojos señalan períodos en los que la recepción de paquetes en el repetidor empeora debido a las condiciones climáticas adversas.

Se llevó a cabo una estimación del error en la recepción de los paquetes de cada termómetro computando la proporción de paquetes recibidos y teóricamente recibidos de la siguiente forma:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

$$ERROR = 1 - \frac{NRM}{TRM} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Donde NRM representa el número de medidas registradas en un período de tiempo específico, y TNM representa el número teórico de medidas en el mismo período. Se aplicó la Ecuación (2.2) al período de tiempo en el que todos los termómetros han estado funcionando, y se trazaron los resultados en la Figura 2.25.

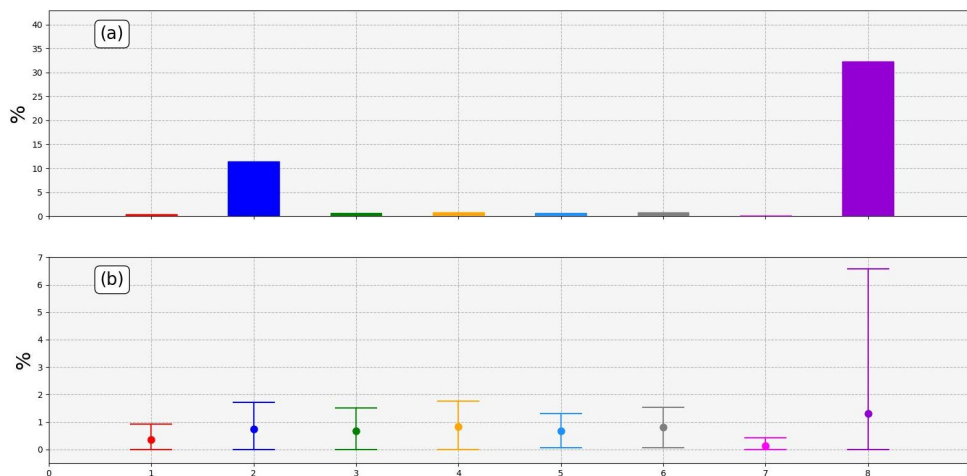


Figura 2.25. Estimación de errores. (a) Porcentajes de error total en paquetes transmitidos aplicando la ecuación 2.2; (b) Desviación estándar del error de transmisión promedio de 24 horas

Los porcentajes de error de los termómetros T2 y T8 en 24 h son los más altos debido al problema con las baterías ya mencionado. Los porcentajes de errores de transmisión de los termómetros restantes son bastante bajos (por debajo del 2% en 24 h). Un porcentaje de error tan bajo permite llevar a cabo un muestreo de la temperatura adecuado cuando las condiciones climáticas son suficientemente favorables, revelando la robustez de la red diseñada.

Las diferencias entre los termómetros se deben a las diferentes características de los sitios en los que se colocaron, las condiciones climáticas, la distancia al repetidor, si había

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: YmlICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

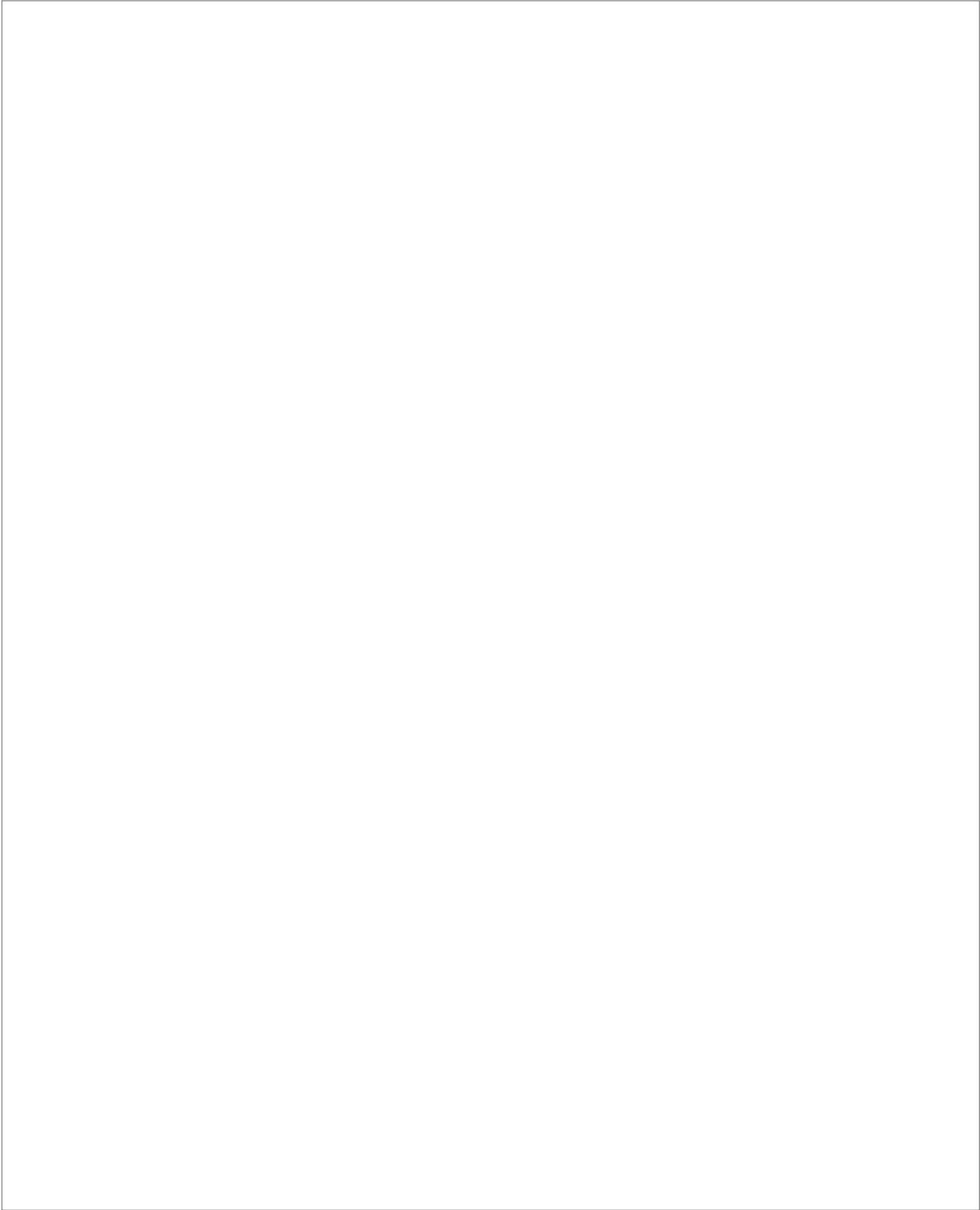
"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

visión directa con el repetidor o no, y la incidencia del sol (relacionado con la fusión de las capas de hielo que puedan formarse).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

CAPITULO 3

Sistema de bajo consumo y bajo coste para la monitorización de la concentración de CO₂ en el suelo en áreas volcánicas.

En el primer capítulo de introducción se menciona el diseño y desarrollo de sistemas de medida de parámetros geoquímicos como línea sobre la que se desarrollará esta Tesis. Dentro de esta línea se define el diseño y desarrollo de un sistema para la medida de la concentración de CO₂ a una determinada profundidad en suelo de áreas volcánicas como el otro pilar elemental de este trabajo. En este capítulo se describe de forma detallada dicho sistema planteado tratándose de un sistema de bajo costo y bajo consumo basado en Arduino. Así, en primer lugar, se realiza la descripción del hardware del sistema para a continuación realizar la descripción del software diseñado. Además, se concreta su consumo y su coste total junto con los resultados obtenidos.

3.1. Sistema para la monitorización de la concentración de CO₂ en el suelo en áreas volcánicas. Hardware.

Se ha diseñado un sistema compacto de bajo costo y bajo consumo para medir la concentración de CO₂ en el suelo de las zonas volcánicas. El sistema está compuesto por un elemento principal, el datalogger, encargado de gestionar tanto el funcionamiento global del sistema como el de los restantes elementos que lo componen: un actuador lineal con un pistón, electroválvulas, sensores (concentración de CO₂ y meteorología), electrónica para el manejo de los elementos del sistema y el módulo de comunicaciones (Figura 3.1 y Figura 3.2). Todo ello se distribuirá dentro de dos cajas de registro plásticas de dimensiones 39 cm

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

x 31 cm y 25 cm x 20 cm, que hacen que el sistema sea fácilmente portable además de facilitar su instalación. Se han distribuido los componentes en dos cajas en lugar de una para, a la hora de la instalación definitiva del sistema, posibilitar su alojamiento dentro de determinadas estructuras metálicas fabricadas para este tipo de aplicaciones y que disponen del diseño necesario para instalar un panel solar en su parte superior.

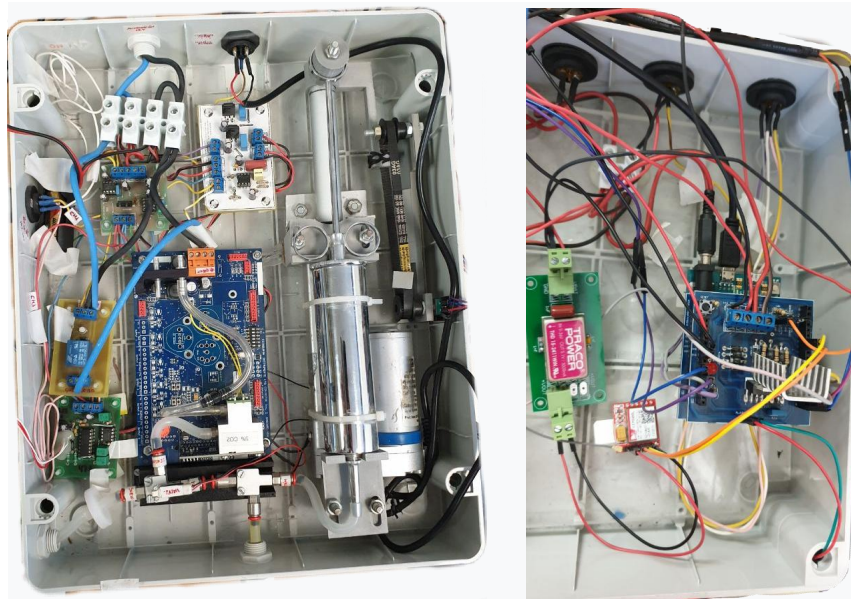


Figura 3.1. Sistema de medida de concentración de CO₂

La metodología de operación del sistema puede ser resumida de la siguiente manera: a través de una piqueta perforada enterrada a 40 cm de profundidad, periódicamente de acuerdo al muestreo predefinido se toman muestras de gas con la ayuda de un actuador lineal junto a un pistón. Estas muestras se inyectan a través de un circuito neumático en el espectrómetro, que mide la concentración de CO₂ de la muestra. Simultáneamente, el sistema registra parámetros meteorológicos como la presión atmosférica, precipitación, humedad relativa y temperatura en el aire y suelo, parámetros que posteriormente podrán ser utilizados para corregir su posible influencia en el valor de concentración de CO₂ en el

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

suelo. Los datos son almacenados de forma local en una tarjeta SD y transmitidos vía GPRS al centro de análisis de datos donde se monitoriza la actividad volcánica.

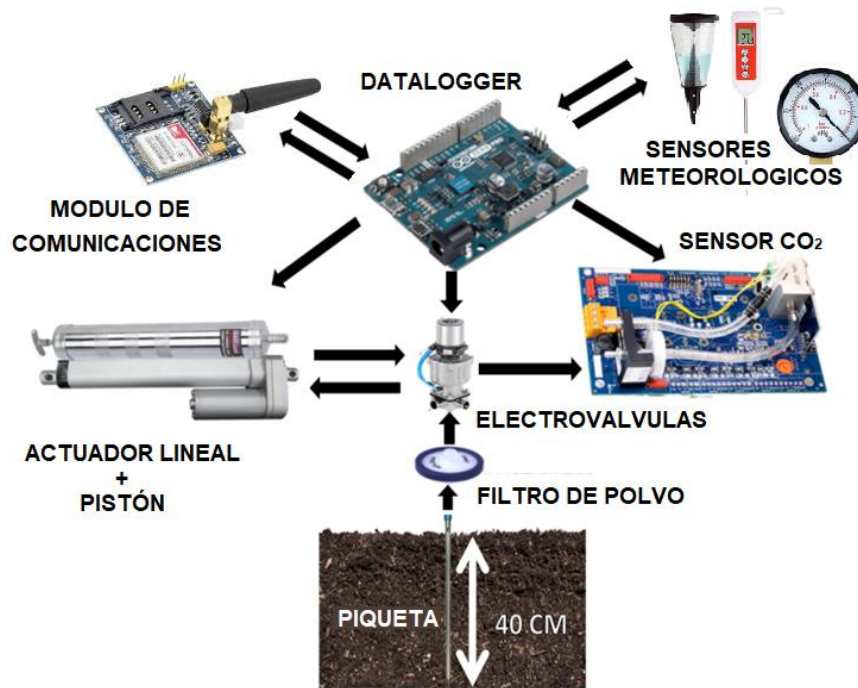


Figura 3.2. Diagrama de elementos del sistema de medida de concentración de CO₂

A continuación, se describe los elementos que componen el hardware del sistema en profundidad, recogiendo en la siguiente figura el esquema general del sistema:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

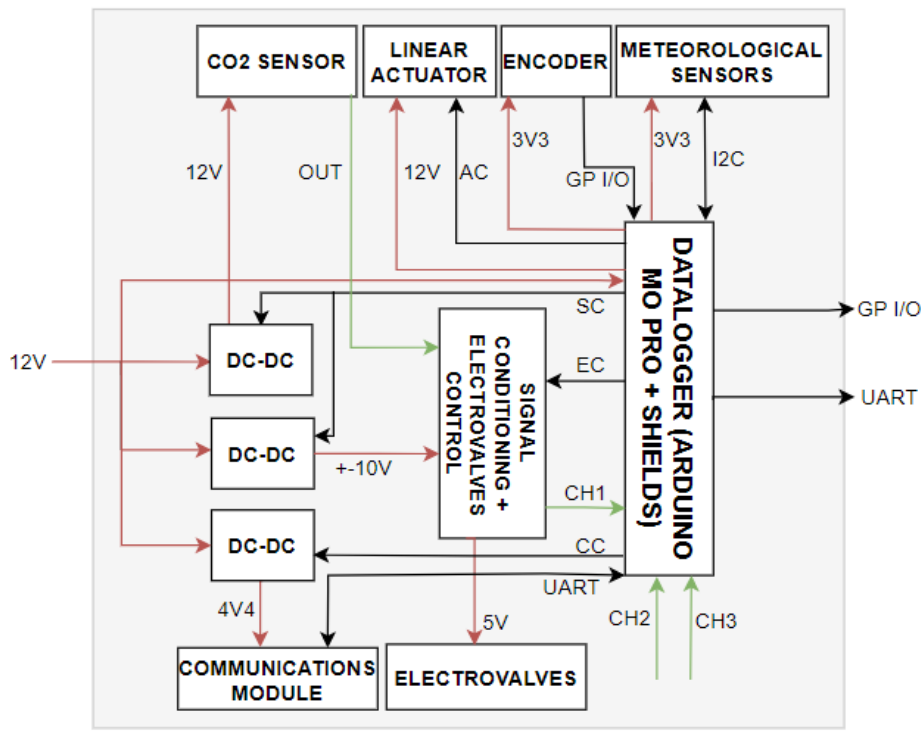


Figura 3.3. Esquema hardware general del sistema de medida de concentración de CO₂, donde OUT es la salida del sensor de CO₂, CH1, CH2 y CH3 son los tres canales del convertor A/D y AC, SC, EC y CC son las señales de control para la alimentación del actuador, sensor de CO₂, alimentación de electroválvulas y alimentación del módulo de comunicaciones respectivamente.

3.1.1. Datalogger

Hoy en día se ha producido un boom en el desarrollo de sistemas que utilizan plataformas electrónicas de código abierto (plataformas “open-source”), basadas en hardware y software fáciles de usar y originalmente destinadas a fines educativos. Este es el caso de Raspberry Pi o Arduino [96]. Estas han potenciado el crecimiento y desarrollo de importantes y numerosas comunidades, lo que permite un aprendizaje más fácil y rápido respecto de otras plataformas. Esto conlleva, por un lado, la disponibilidad de abundante documentación sobre hardware y el software, incluyendo múltiples ejemplos de código y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

librerías y, por otro lado, actualizaciones periódicas de software, correcciones de "bugs" y parches de seguridad.

Para el sistema diseñado, se ha elegido la plataforma Arduino debido a algunos factores fundamentales:

- El extraordinario tamaño de la comunidad detrás de esta plataforma. El número de desarrolladores es tan elevado que permite un rápido desarrollo de aplicaciones gracias a la gran cantidad de ejemplos de código y bibliotecas.
- El empleo de una plataforma que permita usar protocolos de comunicación estándar y formato de datos estándar, lo cual permite una intercomparación fácil y rápida entre datos de diferentes técnicas en la red de monitorización volcánica.
- Proporciona hardware extensible y de código abierto que permite a los usuarios emplearlo de forma independiente y adaptarlo a sus necesidades particulares.
- La accesibilidad y el precio del hardware, se puede comprar en distribuidores electrónicos internacionales, tiendas electrónicas locales y centros comerciales,
- El software Arduino (IDE) es una herramienta de código abierto y se ejecuta en todos los sistemas operativos.
- Engloba todos los detalles confusos implícitos en la programación de microcontroladores en paquetes fáciles de usar.
- Arduino ofrece múltiples protocolos de comunicación como I²C, SPI, UART, USB y Ethernet.
- Bajo coste.

Arduino dispone de una amplia variedad de placas en el mercado a usar dependiendo de las necesidades del proyecto. A continuación, se resumen algunas de ellas junto con sus principales características:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Placa Arduino	Uno	Mega 2560	M0	M0 Pro	Due
Procesador	AVR	AVR	ARM Cortex-M0+	ARM Cortex- M0+	ARM Cortex-M3
Voltaje de operación (V)	5	5	3.3	3.3	3.3
Velocidad CPU (MHz)	16	16	48	48	84
SRAM (kB)	2	8	32	32	96
Flash (kB)	32 ¹	256 ²	256	256	512
Digital I/O	20	54	20	20	54
Consumo(mW)	172	190	95.7	145.2	330
Precio (€)	21.25	43.51	18.83	31.63	33.06

¹32kB de los cuales 0.5kB usados por el boot loader, ²256 kB de los cuales 8kB usados por boot loader.

Tabla 3.1. Comparación entre las placas Arduino más populares. Los precios fueron obtenidos de un distribuidor electrónico internacional mientras que las características se han obtenido de la página web oficial de Arduino.

Para la aplicación diseñada se ha elegido la placa Arduino M0 Pro por diferentes razones, como son la cantidad de memoria disponible, los niveles lógicos que gestiona, su compatibilidad con la mayoría de las shields de Arduino (placas compatibles que se pueden colocar en la parte superior de los Arduino y permite extender las capacidades del mismo), su disponibilidad en el mercado y la cantidad de librerías disponibles para esta placa relativas a los diferentes elementos a implementar y gestionar en el diseño del sistema planteado. Se trata de una placa que funciona con un microcontrolador SAMD21 de Atmel, que presenta un núcleo ARM Cortex® M0 de 32 bits y cuyas prestaciones son suficientes de acuerdo a los requisitos del sistema diseñado.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

La placa Arduino M0 Pro, junto con dos shields específicamente diseñadas para la aplicación presentada en esta Tesis, componen el elemento principal del sistema de medida de concentración de CO₂, el datalogger (Figura 3.3 y Figura 3.4). El datalogger será el encargado de gestionar cada uno de elementos del sistema además del funcionamiento global del mismo.

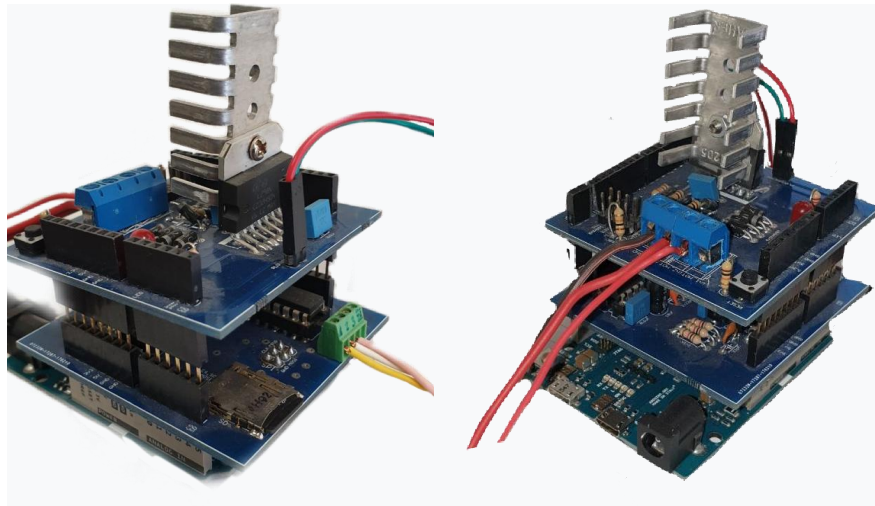


Figura 3.4. Datalogger visto desde distintas perspectivas

Las dos shields (Figura 3.5) han sido diseñadas para extender las capacidades de la placa Arduino M0 Pro en base a los requisitos y necesidades del sistema diseñado. Así, empleando los pines I/O de la placa Arduino, se acopla sobre la misma la shield inferior, que incorpora y permite el manejo de los elementos necesarios para el sistema de adquisición y el almacenamiento local de datos. Sobre la shield inferior, de igual forma a la descrita para ésta última, se alojará la shield superior que permitirá el manejo del actuador lineal y los sensores meteorológicos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

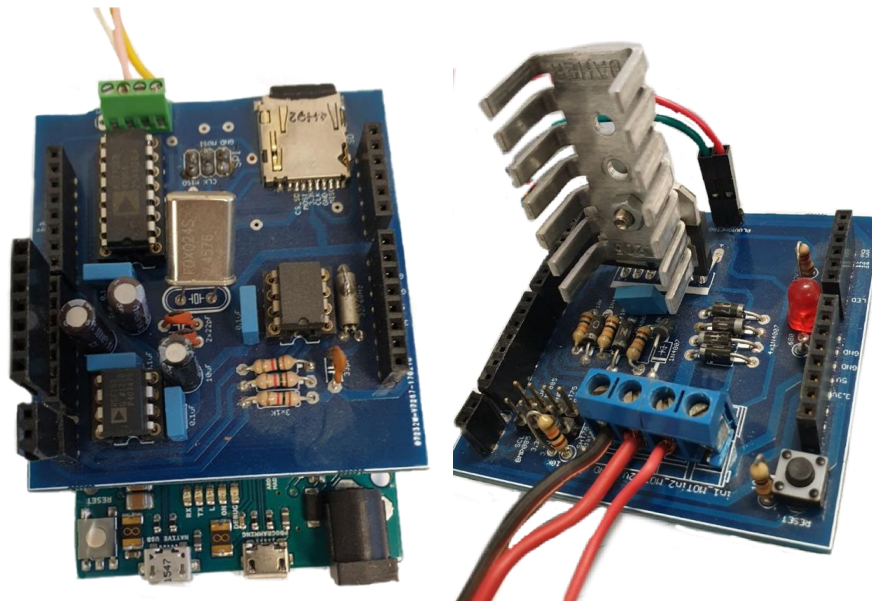


Figura 3.5. Shield inferior a la izquierda y shield superior a la derecha.

Shield inferior (AD + RTC + SD)

Una de las funciones implementadas en el datalogger desarrollado es la adquisición de datos analógicos de 16 bits y su posterior almacenamiento y transmisión. El tiempo de muestreo, el número de canales a adquirir, y otro tipo de información y parámetros se podrán configurar principalmente desde el menú del software desarrollado a tal efecto.

El sistema de adquisición integrado en el datalogger se compone básicamente de un convertor A/D de 16 bits y bajo ruido de Analog Devices (AD7706 [34]) y un reloj en tiempo real (RTC) de NXP Semiconductors (PCF8583 [33]). El reloj en tiempo real es necesario puesto que el sistema toma el tiempo de la propia red de Internet mediante el protocolo NTP, en caso de que no haya conectividad debe proporcionarse el tiempo por medio del RTC. El convertor tiene tres canales de adquisición disponibles, uno de los cuales se emplea para la adquisición de salida del sensor de CO₂. Se ha desarrollado la correspondiente electrónica de acondicionamiento de señal de dicho sensor, para adaptarla

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

al circuito de adquisición ajustando la señal a medir al rango de entrada del convertor A/D (que emplea una referencia externa de 2.5 V) para luego filtrarla.

Respecto al almacenamiento local de los datos adquiridos (datos de los canales adquiridos y datos procedentes de los sensores meteorológicos), se efectuará en una tarjeta microSD a través del protocolo SPI. Dado que este protocolo también se emplea para la comunicación con otros elementos del sistema, se hace necesario definir diferentes líneas de "chip select" que permitan seleccionar en cada momento con qué elemento se está estableciendo la comunicación.

Shield superior (Actuador Lineal + Sensores Meteorológicos)

Una de las funciones del shield superior diseñada es permitir el control del actuador lineal del sistema, el cual permite la toma de las diferentes muestras. Para ello, se ha utilizado el integrado L298N [97] de ST Microelectronics, que posee dos canales de Puente H que pueden utilizarse para controlar hasta dos motores DC, controlando el sentido de giro y velocidad. A este integrado se le proporciona una fuente de alimentación lógica de 5V por medio de un pin GPIO del Arduino, y otra fuente con el valor del voltaje que trabaja el motor, es decir, una alimentación de 12V proporcionada por medio de una batería y un panel solar. También se han destinado dos pines GPIO del Arduino para ingresar las señales TTL para controlar el sentido de giro del motor y su parada. A la salida del integrado (entrada para el control del motor) se emplean diodos de protección.

Debido a la influencia de los parámetros meteorológicos en las medidas de la concentración del sensor de CO₂, el datalogger también adquiere algunos parámetros meteorológicos: presión atmosférica, aire y suelo, temperatura, precipitación y humedad relativa. Así, otra de las funciones de la shield superior es la de permitir el manejo de los sensores mencionados.

Por último, la shield superior también incorpora un interruptor que permite resetear el sistema o detenerlo en caso de encuentre lanzado el proceso de medida (manteniendo pulsado durante unos segundos, el sistema parará el proceso de medida y retornará al menú de configuración inicial.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

3.1.2. Actuador lineal + pistón, encoder y circuito neumático.

Las muestras de CO₂ tomadas del suelo se inyectan en el sensor de CO₂ a través de un circuito neumático con la ayuda del actuador y un pistón acoplado al mismo. El actuador seleccionado es el CAHB-10-A3A-100209AAA000-000 de SKF [98], un motor de corriente continua que se alimenta a 12 V con una carrera de 100 mm, velocidad máxima de 16 mm/s y que soporta una carga de 500 N. De manera solidaria al movimiento del actuador lineal se mueve el pistón acoplado al mismo de 100 mm de carrera y 100 ml de capacidad. Ambos elementos se han elegido de acuerdo a su disponibilidad y fácil adquisición, su precio y sus características.



Figura 3.6. Actuador lineal + pistón.

Con objeto de poder llevar un control del volumen de fluido tomado por el pistón (ver Sección 3.2, estado "muestreo diluido"), se ha incorporado al sistema un mecanismo formado por un encoder rotatorio KY-040 [99] alimentado a 3.3 V a través de un pin I/O del Arduino, una correa y dos engranajes. Este mecanismo permitirá que, cuando el actuador lineal efectúe el movimiento de apertura/cierre con objeto de llenar/vaciar el pistón, la correa se mueva de manera solidaria por medio de una pieza 3D sujeta al actuador y a la correa y unos engranajes 3D, todo ello diseñado al efecto. Uno de los engranajes se encuentra acoplado al encoder rotatorio, de manera que el movimiento del actuador, y con ello el movimiento de la correa, generará el giro del encoder y la cuenta de pasos por parte del datalogger [99] a través del pin I/O destinado a tal fin. Siendo 100 ml el volumen total del pistón, cada paso del encoder supone 2.5 ml, de manera que 100 ml se traducirán en 40

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

“Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica”

pasos. Esto permitirá a la hora de efectuar diluciones (ver Sección 3.2, estado “muestreo diluido”) contabilizar la cantidad de gas procedente del suelo y de aire de la atmósfera.

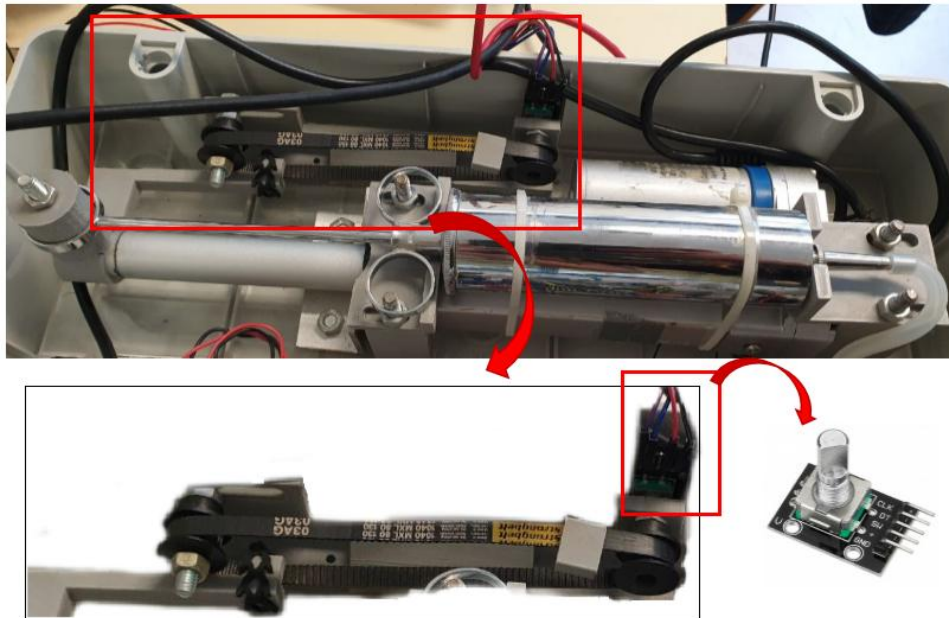


Figura 3.7. Mecanismo de encoder + correa + engranajes a la derecha.

Las muestras tomadas con ayuda del pistón y el actuador se inyectan en el sensor de medida de concentración de CO₂ por medio de un circuito neumático formado por dos electroválvulas S070B-SAG-M3 [100] de SMC de 3 vías que permitirán, según la posición de las mismas, modificar el recorrido del circuito de toma de muestra para seleccionar la toma de aire de la atmósfera (conexión atmósfera-pistón), la toma de gas del suelo a través de la piqueta (conexión suelo-pistón) o la inyección de gas/aire en el sensor de CO₂ (conexión pistón-sensor). El control de las electroválvulas se efectúa por medio de dos pines GPIO del Arduino y con ayuda de un regulador de tensión DC-DC lineal BA51W12ST [101] de baja caída de ROHM Semiconductor. Este regulador permite, en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

función de las señales de control enviadas por el Arduino, habilitar/deshabilitar la alimentación a 5V de las válvulas según la conexión de vías deseada.

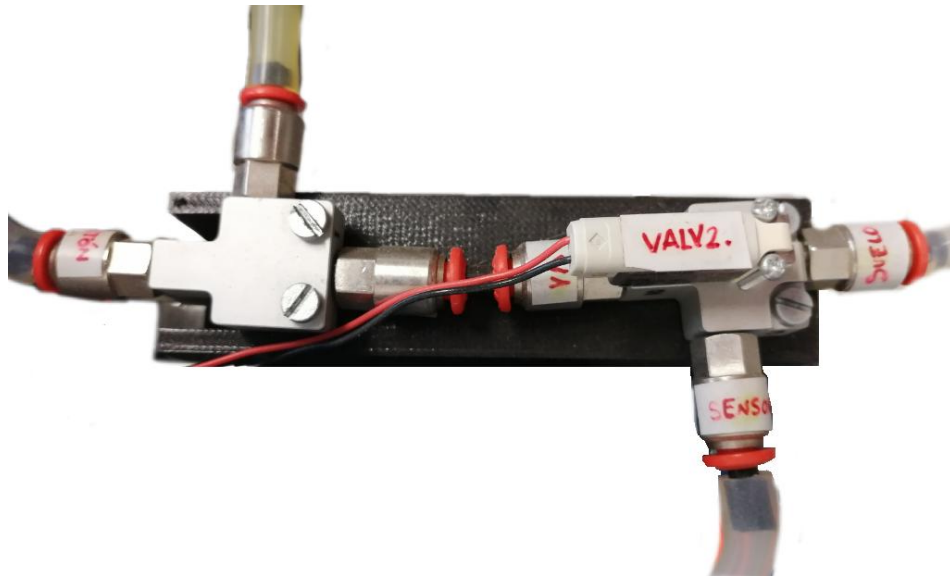


Figura 3.8. Electroválvulas que componen el circuito neumático

Como puede apreciarse en las Figuras 3.6 y 3.8, para el soporte y la sujeción tanto del actuador lineal + pistón como de las electroválvulas y los engranajes, se diseñaron e imprimieron diferentes piezas 3D de plástico ABS diseñadas y adaptadas específicamente a esta aplicación.

3.1.3. Sensor de concentración de CO₂

El objetivo del sistema es medir la concentración de CO₂ del suelo en áreas volcánicas. Para realizar esta medida se ha empleado el sensor de gas infrarrojo Gascard NG 5% de Edinburgh Sensors [102]. Por regla general en suelos de ambientes volcánicos es esperable una concentración de CO₂ considerablemente alta dependiendo de la zona. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la precisión de los sensores de CO₂ depende del

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

rango de medida: cuanto mayor es el rango, mayor es el porcentaje de error que se comete. Haciendo un balance entre estos dos puntos, se ha elegido para esta aplicación el sensor cuyo rango de medida es de 0-5% de CO₂ (Tabla 3.2).

Gascard NG 5%	
Rango	0-5% (50000 ppm)
Precisión	±2% del rango ±<0.015% del rango por mbar
Temperatura de operación	0-45°C
Presión de operación	800-1150 mbar
Alimentación	12 V DC
Tiempo de calentamiento	1 minuto
Tasas de flujo de gas	0.2 litros por minuto a 1.2 litros por minuto
Salida	Lineal 4-20 mA

Tabla 3.2. Especificaciones del sensor de medida de concentración de CO₂

Para el control de dicho sensor se ha empleado un pin GPIO del Arduino, que proporcionará la señal de control para indicar en qué momentos se desea habilitar o deshabilitar la alimentación del sensor de CO₂. Este pin actúa sobre una electrónica compuesta por un transistor BJT y un relé SRD-12VDC-SL-C de Songle que permitirá conmutar los 12 V procedentes de la batería para alimentar o no alimentar el sensor de CO₂. Cuando este sensor recibe alimentación, se deberá esperar un tiempo de calentamiento definido en sus especificaciones para que esté listo para realizar una medida.

Puesto que el sensor de CO₂ proporciona una salida lineal de 4-20 mA, es necesario incorporar una electrónica de acondicionamiento de la señal para adaptarla al circuito de adquisición ajustando la señal a medir al rango de entrada del conversor A/D (emplea una referencia externa de 2.5 V). Con este objetivo se ha seleccionado una resistencia de 120 Ω,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

siendo el rango de medida de entre 480 mV y 2400 mV. Para el rango de medida de 0-5% (0 – 50000 ppm) o 480 mV- 2400 mV, se tiene que 1 mV equivaldrá a 26 ppm.

A continuación, se filtrará la señal por medio de un seguidor de tensión junto con un filtro butterworth de 2 polos a 20 Hz, cuya salida constituirá el valor de concentración de CO₂ en suelo registrado por el datalogger a través del canal 1 del conversor A/D.

3.1.4. Sensores meteorológicos.

El sistema adquiere una serie de parámetros meteorológicos: presión atmosférica, aire y suelo, temperatura, precipitación y humedad relativa. Para la medida de presión y humedad relativa se han empleado dos sensores digitales: un SHT75 [103] para la humedad relativa y un BMP085 [104] de Bosch para la presión. Su comunicación con el datalogger se realiza a través del protocolo serie I²C para el BMP085 y un pseudo I²C para el SHT75 (el sensor utiliza un bus de comunicaciones de "2 hilos" que es similar a I²C y puede coexistir en el mismo cable físico que los dispositivos I²C). Ambos sensores tienen incorporados sensores de temperatura.

	SHT75		BMP085	
	Humedad	Temperatura	Presión	Temperatura
Resolución	12 bits	14 bits	0.01 mbar	0.1°C
Precision	±3% HR	±0.3°C	±0.2 mbar	±0.5°C
Rango	0–100% HR	-4 to 123.8°C	300 to 1100 hPa	-40 to 130°C
Offset	<0.5 HR/year	<0.04 °C /year	256±1 mbar/year	..

Tabla 3.3. Especificaciones de los sensores de presión y humedad.

Respecto a la medida de la precipitación, se ha empleado el pluviómetro Rain-O-Matic Small Rain Gauge de Pronamic [105] para reunir y medir la cantidad de precipitación líquida durante un período de tiempo establecido. Se trata de un pluviómetro de alta calidad

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

y bajo costo ideal para estaciones meteorológicas pequeñas, que se alimenta a 3.3 V y tiene una resolución de 1 mm y una precisión de $\pm 5\%$. Este pluviómetro mide la precipitación por medio de un embudo (orificio de 50 cm²), que conduce el agua hacia el cubo de volcado auto vaciante, sostenido en su lugar por medio de un imán. El imán siempre ejerce suficiente tensión para permitir que el cubo de medida se vacíe de un solo movimiento (menos de 300 ms) y luego volver a su posición normal, listo para recoger de nuevo la precipitación. Cada vez que se produzca un volcado del cubo, se genera una interrupción recogida por el Arduino que permitirá al datalogger llevar la cuenta de la precipitación.

Para la temperatura del suelo se ha utilizado un sensor PT100 (RTD cuya temperatura mínima detectada es de -50 °C y la temperatura máxima detectada es + 200 °C).

Todos estos datos procedentes de los sensores meteorológicos, tras la adquisición, son almacenados en la memoria local.

3.1.5. Módulo de comunicaciones

Los datos almacenados por el sistema localmente también se transmiten al centro de análisis de datos cada intervalo de tiempo predeterminado utilizando comunicación GPRS (General Packet Radio Service). El GPRS es una extensión del GSM (Global System for Mobile communication) basada en la transmisión por paquetes que ofrece un servicio más eficiente para las comunicaciones de datos, especialmente en el caso de tener acceso a Internet.

Para las comunicaciones del sistema se ha empleado el módulo inalámbrico ultra compacto SIM800L de SIMCOM [106] junto con una tarjeta SIM. El módulo SIM800L, que ofrece rendimiento GSM / GPRS, es ideal para sistemas remotos, comunicación recursiva, mandar mensajes de texto a teléfonos móviles, realizar llamadas, conectar con internet a través de GPRS, TCP/IP, etc., permitiendo transformar el Arduino en un teléfono móvil. Con un bajo consumo de energía, puede configurarse y controlarse vía UART usando comandos AT.

El rango de tensión para el funcionamiento de este módulo es de 3.4 V a 4.4 V, por lo que se ha empleado un convertidor DC-DC junto con la electrónica necesaria para la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

adaptación de los 12 V DC de alimentación a los 4.4 V de entrada del módulo. Sin embargo, siendo uno de los objetivos la reducción del consumo en la medida de lo posible, este módulo sólo recibirá alimentación en los momentos en los que toque llevar a cabo la transmisión de la información. Por este motivo se ha destinado uno de los pines GPIO del Arduino para la implementación de la señal de control que permita actuar sobre el conversor DC-DC mencionado para habilitar/deshabilitar la alimentación del módulo.



Figura 3.9. Módulo SIM800L empleado para las comunicaciones del sistema.

3.2. Sistema para la monitorización de la concentración de CO₂ en el suelo en áreas volcánicas. Software.

3.2.1. Software incorporado en el sistema.

Para la operación de funcionamiento del sistema se llevó a cabo un desarrollo de software empleando el lenguaje de programación de Arduino, que está basado en C++.

Así, para un correcto desarrollo y funcionamiento del software se incluyeron diferentes librerías (Tabla 3.4) que permiten la gestión de diferentes elementos del sistema, algunas de ellas disponibles para ser aplicadas directamente y otras modificadas para adaptarlas al sistema desarrollado.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

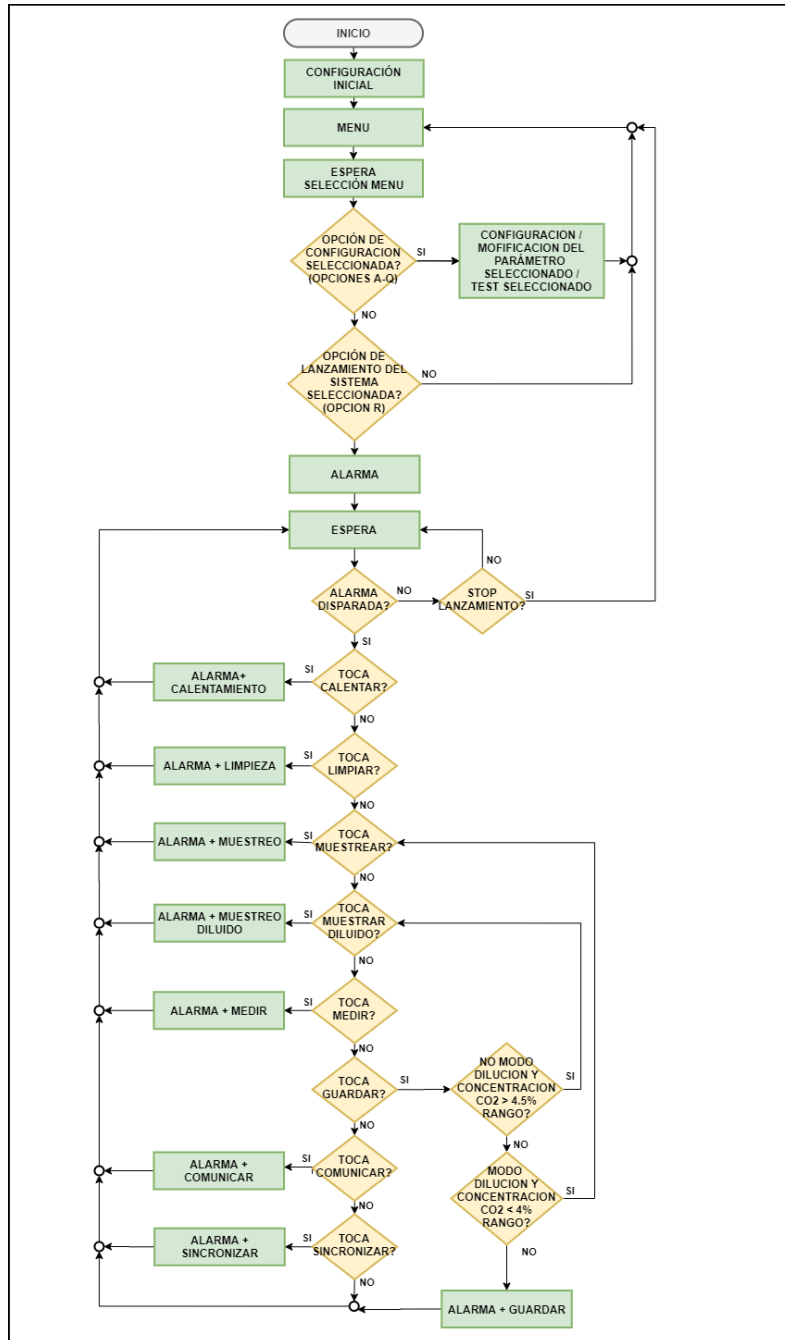
Librería	Función
<PCF8583.h>	Permite controlar todos los aspectos del integrado PCF8563 (Reloj en tiempo real)
<SPI.h>	Permite comunicar con dispositivos SPI, con Arduino como dispositivo maestro.
<AD770X.h>	Librería para la gestión del convertor A/D AD7705 / AD7706.
<SD.h>	Permite leer y escribir en la tarjeta SD
<SHT1x.h>	Proporciona una interfaz simple para los sensores de temperatura / humedad de las series SHT1x (SHT10, SHT11, SHT15) y SHT7x (SHT71, SHT75) de Sensirion.
<Adafruit_BMP085.h >	Librería para la gestión del sensor de presión barométrica + temperatura Adafruit BMP085 / BMP180
<time.h>	Agrega la funcionalidad de cronometraje a Arduino (con o sin hardware externo de cronometraje). Permite obtener la hora y la fecha como: segundo, minuto, hora, día, mes y año. También proporciona el tiempo como un C time_t estándar para que los tiempos transcurridos puedan calcularse fácilmente.
<SoftwareSerial.h>	El hardware Arduino tiene soporte incorporado para comunicación serie en los pines 0 y 1. Esta librería permite la comunicación serie de datos a través de otros pines digitales de Arduino diferentes. La librería replica funciones de hardware y maneja la tarea de comunicación en serie. Esto posibilitará la comunicación serie entre el Arduino y el módulo SIM800L.

Tabla 3.4. Librerías incluidas en el software del sistema para el manejo de diferentes elementos del mismo.

El funcionamiento total del sistema podría quedar resumido de acuerdo al siguiente diagrama de flujo:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 3.10. Diagrama de flujo de funcionamiento del sistema de medida de la concentración de CO₂ en suelo volcánico.

Al arrancar el sistema de medida, este software comienza configurando una serie de parámetros establecidos en un archivo de configuración config.txt creado por el usuario y almacenado en la SD. Esos parámetros almacenados en ese fichero son: el nombre de la estación, el tiempo de muestreo, el tiempo de calentamiento del sensor de CO₂, el tiempo total destinado a las comunicaciones, los canales que se van a registrar y almacenar localmente y el tiempo de estabilización (tiempo durante el cual, tras inyectar el total de la muestra en el sensor, se continúa tomando medidas de los canales) y se pueden modificar en cualquier momento a través de un menú implementado para el sistema. También se configurará y se inicializará todos los parámetros y variables que intervienen en el sistema y se cargará los parámetros de las curvas de calibrado a aplicar a los tres canales del conversor y que se encuentran almacenados localmente en la SD en el fichero calib.txt. Al finalizar esta configuración inicial, el menú principal se muestra al usuario:

```
NOMBRE DE LA ESTACION: CrLf
Elija opcion:CrLf
A) SINCRONIZAR HORA Y FECHA: 16/02/19 05:46:05 CrLf
B) CAMBIAR TIEMPO MUESTREO: 960 SEGUNDOS. <16 MINUTOS> CrLf
C) CAMBIAR TIEMPO CALENTAMIENTO: 60 SEGUNDOS. <1 MINUTOS> CrLf
D) CANALES ACTIVOS: CANAL 1 CANAL 2 CANAL 3 CrLf
E) CAMBIAR PARAMETROS DE LAS CURVAS DE CALIBRADO: 1x+0 1x+0 1x+0 CrLf
F) SOBRESCRIBIR EL FICHERO DE ALMACENAMIENTO DE DATOS DE DATOS DE CONFIGURACION ACTUAL CrLf
G) TEST CANALES +METEO CrLf
H) TEST MOTOR CrLf
I) CAMBIAR TIEMPO DE ESTABILIZADO DE SENSOR: 30 SEGUNDOS CrLf
J) CARGAR CONFIGURACION POR DEFECTO: CrLf
   t_muestreo=1hora t_calentamiento=2min canales activos=1,2,3 t_estabilizado_sens
   or=50s, tiempo_comunicaciones=2min CrLf
K) CARGAR CALIBRADO POR DEFECTO: CrLf
L) CAMBIAR IP RECEPTOR: "193.146.80.7" CrLf
M) CAMBIAR PUERTO RECEPTOR: "22101" CrLf
N) CAMBIAR TIEMPO PARA LAS COMUNICACIONES: 4 minutos CrLf
O) TEST COMUNICACIONES CrLf
P) SINCRONIZAR RTC CrLf
Q) REALIZAR UNA MEDIDA CrLf
R) LANZAMIENTO CrLf
```

Figura 3.11. Menú principal del sistema.

El usuario podrá seleccionar por medio del teclado entre las opciones a elegir:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: YmlICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- La opción A permite de forma manual introducir fecha y hora para el sistema, indispensable para el correcto funcionamiento del mismo y registro de los datos. Una vez modificadas, se volverá a mostrar el menú del sistema.
- En las opciones B-E el sistema permite modificar los valores de los parámetros cargados desde los ficheros de configuración y calibración del sistema (tiempo de muestreo, tiempo de calentamiento del sensor de CO₂, canales que se van a registrar y almacenar localmente y parámetros de las curvas de calibrado). Una vez modificados cualquiera de estos parámetros, se volverá a mostrar el menú del sistema. Es necesario destacar que, el tiempo de muestreo podrá seleccionarse por el usuario con una serie de restricciones. En base a los tiempos fijos implícitos al sistema para determinadas acciones (toma de la muestra, tiempo de inyección de la muestra, tiempo de guardado de datos local, etc.) y a otros tiempos configurables por el usuario (tiempo de estabilizado, tiempo de comunicaciones o el tiempo de calentamiento del sensor), el sistema calculará un tiempo mínimo de muestreo. Este tiempo mínimo será el necesario para realizar un ciclo completo de medida de la concentración. De esta forma, el usuario no podrá configurar tiempos de muestreo inferiores a este valor calculado. De igual forma, si se desea modificar el tiempo de calentamiento del sensor, esto se podrá llevar a cabo dentro de una serie de límites calculados por el sistema de acuerdo al tiempo de muestreo y al resto de parámetros de tiempo configurados.
- Mediante la opción F, el usuario podrá sobrescribir el fichero de configuración almacenado en la SD. De esta manera, los cambios realizados en cualquiera de dichos parámetros quedarán almacenados. Una vez sobrescrito, se volverá a mostrar el menú del sistema.
- Mediante la opción G el usuario podrá iniciar un test de los canales activos y los sensores meteorológicos, en el cuál durante un minuto se tomará medidas continuas de cada uno de ellos y se mostrarán por pantalla los resultados obtenidos. Tras el testeo se retornará al menú principal.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- Con la opción H se podrá testear el correcto funcionamiento del actuador lineal (apertura total y cierre del mismo). Tras el testeo se retornará al menú principal.
- La opción I permite modificar el tiempo de estabilización. Una vez modificado, se retornará al menú principal. Esto se podrá llevar a cabo dentro de una serie de límites calculados por el sistema de acuerdo al tiempo de muestreo y al resto de parámetros de tiempo configurados.
- De igual forma, si se desea modificar el tiempo de calentamiento del sensor o el tiempo de estabilizado, esto se podrá llevar a cabo dentro de una serie de límites calculados por el sistema de acuerdo al tiempo de muestreo y al resto de parámetros de tiempo configurados.
- La opción J permite, en caso deseado o en caso de no inicializarse correctamente la SD o de que no exista SD en el sistema, y con ello no se tenga acceso al fichero de configuración, cargar una configuración de parámetros por defecto. A continuación, se regresará al menú principal.
- La opción K permite, en caso deseado o en caso de no inicializarse correctamente la SD o de que no exista SD en el sistema y con ello no se tenga acceso al fichero de calibración, cargar una configuración de parámetros de calibrado por defecto. A continuación, se regresará al menú principal.
- Las opciones L- O permiten al usuario realizar acciones relacionadas con las comunicaciones del sistema. Con las opciones L y M se puede modificar la IP y el puerto del servidor receptor con el cual el sistema comunicará para realizar la sincronización de datos. La opción N permitirá modificar el tiempo total destinado a las comunicaciones dentro del tiempo de muestreo establecido (esto se podrá llevar a cabo dentro de una serie de límites calculados por el sistema de acuerdo al tiempo de muestreo y al resto de parámetros de tiempo configurados). Por último, la opción O permitirá testear las comunicaciones mediante la conexión al servidor configurado y el intercambio con el mismo de una serie de mensajes de test (se enviará tres mensajes "PING", esperando los mensajes de confirmación "OKPING" por

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

“Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica”

parte del servidor cada vez que se envía cada uno de ellos). Tras realizar las modificaciones/test, se volverá al menú principal.

- La opción P permite sincronizar la hora del sistema (hora del RTC) empleando el Network Time Protocol (NTP), un protocolo de Internet para sincronizar los relojes de los sistemas informáticos a través del enrutamiento de paquetes en redes con latencia variable. Una vez finalizado el proceso de sincronización, se regresará al menú principal.
- Por medio de la opción Q el sistema realiza una única medida de muestreo (un único proceso de medida completo). Esta opción es útil cuando se está testeando el funcionamiento del sistema en campo. Tras realizar la medida, se mostrará de nuevo el menú principal.
- La opción R permitirá lanzar el sistema, iniciando el proceso continuo de medida de acuerdo al tiempo de muestreo. Este proceso podrá ser detenido si se pulsa durante unos segundos el botón de reset o paro del sistema, incorporado en la shield superior como parte del datalogger. De esa forma se detendrá el proceso de medida regresando al menú principal.

Una vez realizadas todas las configuraciones necesarias de acuerdo a las necesidades del usuario, se podrá lanzar el proceso de medida continua por medio de la opción K: “LANZAMIENTO”. En este momento el sistema esperará al siguiente minuto exacto para comenzar con el ciclo de medida.

Para el proceso de medida se ha implementado una máquina de estados en la que se pueden distinguir los siguientes estados: “Espera”, “Calentar”, “Limpiar”, “Muestrear”, “Medir”, “Guardar”, “Comunicar” y “Sincronizar”. Para el tránsito entre los diferentes estados, se programarán progresivamente diferentes alarmas mediante el RTC que generarán interrupciones al cumplirse. Estas interrupciones permitirán al sistema cambiar de estado dependiendo del estado actual en el que se encuentre. Así, al inicio de cada estado (excepto el estado de “espera”) se programará la alarma para pasar al siguiente estado.

A continuación, se describe cada uno de los estados implementados:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Estado "Espera"

Una vez se finalicen las diferentes acciones a realizar asociadas al estado actual, se pasará a este estado, en el cual el sistema se encuentra a la espera de que se produzca el salto de la alarma programada. Una vez se produzca el salto de la alarma, el sistema verificará cual es el último estado ejecutado por el sistema y tomará una decisión en base a ello. El tránsito entre estados se llevará a cabo de la siguiente forma:

- Si el estado anterior es "calentar", el sistema pasará a estado "limpiar".
- Si el estado anterior es "limpiar", se pasará a estado "muestrear".
- Si el estado anterior es "muestrear", el siguiente estado a ejecutar será "medir".
- Si el estado anterior es "medir", el estado a ejecutar a continuación será "guardar".
- Si el estado anterior es "guardar", el sistema pasará a estado "comunicar", estado "sincronizar" o "muestrear".
- Si el sistema se encontraba en estado "comunicar", el siguiente estado será el de "sincronizar".
- Si el sistema se encuentra en estado "sincronizar", el siguiente estado será el de "calentar".

Estado "Calentar"

Se trata del primer estado del ciclo de medida, tal y como se aprecia en la Figura 3.10. En primer lugar, atendiendo al tiempo necesario para el estado "calentar", se programará la alarma para el siguiente estado a ejecutar, que será el estado "limpiar". A continuación, se llevará a cabo el calentamiento del sensor de CO₂, para lo cual mediante la señal de control de alimentación del sensor se habilitará la alimentación del mismo. El calentamiento durará el tiempo configurado por el usuario, pudiendo este no ser inferior a 1 minuto (de acuerdo a las especificaciones del sensor). Una vez habilitada la alimentación, el sistema pasará a estado "espera" hasta que salte la alarma programada"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Estado "Limpiar"

Se trata del segundo proceso del ciclo de medida, en el que se llevará a cabo una limpieza del sistema. En base al tiempo predefinido necesario para efectuar la limpieza, se programará la alarma para comenzar con la toma de la muestra. A continuación, se tomarán con ayuda del pistón varias muestras de aire procedente de la atmósfera y se inyectarán en el sistema con objeto de eliminar todo resto de la muestra anterior tanto en los conductos como en el sensor de CO₂ que pudiese contaminar o falsear la medida de la muestra actual. Durante la última inyección de muestra de aire para la limpieza, se medirá la concentración de CO₂ obteniendo la concentración de CO₂ en el aire. Efectuada la limpieza, se transitará a estado "espera" hasta que sea el turno de la toma de la muestra.

Estado "Muestrear"

Tras efectuarse la limpieza del sistema, se procederá a la toma de la muestra procedente del suelo a analizar. Se programará la alarma para pasar al estado "medir" en función del tiempo necesario para el llenado del pistón más un tiempo de espera con el cual se pretende que la muestra que se halla dentro del pistón se homogenice. Después, se procederá a la toma de la muestra llenando el pistón de capacidad 100 ml con gas procedente del suelo. Efectuado lo mencionado, el sistema pasará a estado "espera" aguardando a que salte la alarma programada para pasar a estado "medir".

Estado "Medir"

Para la toma de medidas será necesario un tiempo equivalente al vaciado del pistón más el tiempo de estabilizado (definido por el usuario en el menú principal). En base a este tiempo total mencionado, se programará como primera tarea de este estado la alarma para indicar al sistema que pase al siguiente estado. Luego, se inyectará la muestra tomada en el sensor de CO₂. De manera simultánea a inyección de la muestra, el sistema tomará cada segundo medidas de los canales que esté registrando. Una vez se haya inyectado la muestra por completo, el sistema continuará tomando medidas durante el tiempo de estabilizado. Finalizada la toma de medidas, se pasará a estado "guardar".

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Estado "Guardar"

En primer lugar, al iniciar este estado, se tomará el tiempo de guardado local de datos (calculado por el sistema) junto con el tiempo establecido para las comunicaciones y la sincronización, y se establecerá la alarma para el estado "calentar", que permitirá dar comienzo al siguiente ciclo de muestreo (de acuerdo con el tiempo de muestreo establecido). A continuación, se procede al cálculo de diferentes parámetros: máximo valor, media, mediana y desviación típica. Estos valores se calcularán tomando los valores de concentración registrados para nuestra muestra, concretamente aquellos valores pertenecientes a la parte estable de la curva de concentración (ver Figura 3.19). Se asumirá que el valor de concentración en el suelo para la muestra es el valor de la media calculada.

El siguiente paso tras el cálculo mencionado será el de determinar si para el siguiente muestreo es necesario llevar a cabo una dilución (ver estado "muestreo diluido") o si se continuará en modo normal de muestreo. En este punto, pueden darse diferentes casos:

- Si el sistema se encontraba en modo de muestreo "normal" y se detecta que la concentración medida para la muestra se sitúa por encima del 4.5% del rango de medida del sensor de concentración (45000 ppm o 2208.004426 mV), se interrumpirá el proceso de guardado para repetir la toma de la muestra en modo "muestreo diluido". Se continuará durante sucesivos muestreos en modo "muestreo diluido" hasta que se detecte que la concentración del suelo es inferior al 4% (40000 ppm o 2016.00393 mV).
- Si el sistema se encontraba en modo de muestreo "diluido" y se detecta que la concentración medida para la muestra se sitúa por debajo del 4% del rango de medida del sensor de concentración, se interrumpirá el proceso de guardado para repetir la toma de la muestra en "modo normal". Se continuará en modo "normal" de muestreo durante los sucesivos procesos de medida salvo que vuelva a detectarse que la concentración es superior al 4.5%.

Para la detección de la concentración por debajo del 4%, se tomará el valor de la concentración medido para la muestra diluida, y aplicando la siguiente ecuación, se calculará el valor de concentración real del suelo (sin diluir):

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

“Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica”

$$C_T = \frac{m_T}{V_T} = \frac{m_{aire} + m_{suelo}}{V_T} = \frac{C_{aire} \cdot V_{aire} + C_{suelo} \cdot V_{suelo}}{V_T} \quad (3.1)$$

siendo C_T la concentración de CO_2 de la muestra diluida, m_T la masa de la muestra diluida, V_T el volumen de la muestra diluida, C_{aire} la concentración de CO_2 medida para el aire (medida durante la limpieza del sistema), V_{aire} el volumen de la muestra tomado del aire de la atmósfera, C_{suelo} la concentración de CO_2 del suelo y V_{suelo} el volumen de muestra tomado de gas del suelo, se tiene:

$$C_{suelo} = C_T \cdot \left(1 + \frac{V_{aire}}{V_{suelo}}\right) - C_{aire} \cdot \left(\frac{V_{aire}}{V_{suelo}}\right) \quad (3.2)$$

donde C_{suelo} se trata del valor de concentración del gas del suelo sin diluir, valor que se comparará con el 4% para determinar si no es necesario seguir en modo “muestreo diluido”.

Como bien se ha mencionado, si el sistema se encontraba en modo “normal” y pasa a modo “muestreo diluido” o viceversa, se repetirá de nuevo el proceso partiendo del punto de la limpieza del sistema. En caso de que el sistema prosiga en el mismo modo en que se encontraba, se continuará con el proceso de guardado de datos tal y como se describe en los siguientes párrafos.

Se realizarán a continuación las medidas de la presión mediante el sensor BMP085 y las medidas de humedad y temperatura mediante el sensor SHT75. Para ello se toman diez medidas de cada parámetro y se calcula la media para obtener el valor a almacenar.

Tras la toma de los parámetros meteorológicos se procederá a llevar a cabo el almacenamiento local de los datos. Así, este almacenamiento se llevará a cabo siguiendo la estructura de DATOS/AÑO/MES/DIA. El sistema verificará si existe cada uno de estos directorios en la SD local de acuerdo a la fecha actual y, en caso negativo, los creará. Para cada muestreo se creará un fichero bajo el nombre “HHmm.txt”, siendo HH la hora actual de muestreo y mm los minutos actuales de muestreo. En este fichero se almacenará, en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

primer lugar la cabecera (ver Figura 3.12), que contendrá datos correspondientes a la estación de medida, los datos meteorológicos, los parámetros calculados para la muestra (valor máximo, media, mediana y desviación típica), y parámetros relativos al modo dilución cuando el sistema se encuentra en el mismo (si está en modo muestreo diluido o no, la concentración de CO₂ del aire medida durante el proceso de limpieza, el volumen de la dilución indicando el porcentaje de muestra del suelo y el porcentaje de muestra de aire de la atmósfera y el valor de concentración del suelo para la muestra una vez revertida la dilución). Los parámetros relativos al modo dilución se incluyen con objeto de que una vez se reciban los datos por el servidor del centro de análisis, se pueda calcular el valor de la concentración sin diluir para cada una de las medidas tomadas.

```

1322.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
#2019/06/21 13:22:45
Nombre: ESTACION_MEDIDA
Canales: CANAL 1 CANAL 2 CANAL 3
Presión (mb): NaN
T_ambiente (°C): 615.35 °C
HR (%): -6274.38 %
Pre (mm): 0 gotas.
[Co2]_max (mV): 500.8316
[Co2]_med (mV)[concentracion suelo]: 500.3344
[Co2]_mda (mV): 500.3357
[Co2]_des (mV): 0.2089
Muestra_diluida:No
Concentracion_aire (mV):501.0223
Volumen dilucion (mL): NaN
Concentracion suelo sin diluir (mV):NaN
-----
SEGUNDO, C1(mV),C2(mV),C3(mV),C1(calib),C2(calib),C3(calib)
1,448.34,386.77,554.35,448.34,386.77,554.35
2,500.11,386.62,554.35,500.11,386.62,554.35
3,500.11,386.77,554.47,500.11,386.77,554.47
4,500.14,386.77,554.62,500.14,386.77,554.62
5,500.14,386.54,554.28,500.14,386.54,554.28
6,500.22,386.66,554.35,500.22,386.66,554.35
7,500.34,386.31,554.20,500.34,386.31,554.20
8,500.34,386.43,554.08,500.34,386.43,554.08
9,500.34,386.28,553.86,500.34,386.28,553.86
10,500.37,386.28,553.82,500.37,386.28,553.82
11,500.45,386.35,553.67,500.45,386.35,553.67

```

Figura 3.12. Ejemplo de fichero de almacenamiento de datos de una muestra.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

A continuación de la cabecera se almacena los datos correspondientes a los canales registrados en milivoltios (en este caso canal 1 con el total de valores de concentración de CO₂ medidos para la muestra, y canales 2 y 3 con valores para su testeo correspondientes a un termómetro y a una batería). Para cada canal y cada valor medido (se mide el valor de los canales cada segundo), se almacena su valor medido y su valor tras aplicar la curva de calibrado establecida para cada canal.

Adicionalmente, se almacenará la ruta del fichero de datos recién almacenado en el fichero comunicaciones.txt almacenado localmente dentro del directorio COMUNICACIONES (de no existir el directorio o el fichero, se creará). Este fichero contendrá la ruta de todos los ficheros a enviar al centro de análisis de datos en el siguiente proceso de sincronización de datos que se lleve a cabo por el sistema.

Finalizado el proceso completo de guardado, se verificará si se ha de llevar a cabo la sincronización de datos durante este ciclo de muestreo o no. Esto se comprobará en base a la configuración preestablecida por el usuario, que podrá elegir si desea realizar una sincronización de datos cada vez que se muestree, cada dos veces que se muestree, etc. En caso de que toque sincronizar durante este ciclo de muestreo, el sistema transitará al estado "comunicar". En caso negativo, pasará directamente a estado "sincronizar".

Estado "Comunicar"

En este estado se procederá a iniciar el proceso de comunicaciones habilitando en primer lugar la alimentación del módulo SIM800L. Para la comunicación del Arduino con el módulo mencionado, se habrá creado al inicio del programa un puerto serie adicional mediante la librería <SoftwareSerial.h>. Este módulo se operará por medio de comandos AT para conectar nuestro sistema con el servidor receptor del centro de análisis de datos. El orden de comandos será el siguiente, teniendo en cuenta que, si no se recibe la respuesta esperada, se volverá a repetir los comandos necesarios hasta obtener las respuestas adecuadas:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

1. "AT+CMEE=2": Habilita el uso del código de resultado + ERROR CME: <err> como una indicación de un error relacionado con la funcionalidad del módulo.
2. "AT": Permite verificar si el módulo responde y que por lo tanto la comunicación funciona (conexiones, velocidad y encendido correctos).
3. "AT+CGATT?": Determina si el módulo se encuentra conectado al servicio GPRS.
4. "AT+CIPSHUT?": Permite determinar en qué estado se encuentra el contexto PDP. Para realizar una comunicación de datos es necesario que previamente se hayan establecido una serie de condiciones. A la suma de dichas condiciones se le denomina "Contexto PDP" (Contexto de Protocolo de Paquetes de Datos).
5. "AT+CIPSTATUS?": Consulta el estado actual de la conexión.
6. "AT+CSTT=<apn>, <usuario>, <contraseña>": Establece APN (nombre del punto de acceso GPRS), nombre de usuario GPRS y contraseña GPRS.
7. "AT+CIICR": Establece una conexión inalámbrica GPRS.
8. "AT+CIFSR": Obtiene la dirección IP local
9. "AT+CIPSTART=<tipo>, <dirección IP>, <puerto> ": Inicia la conexión TCP o UDP. En este caso, el tipo de la conexión será TCP, y la dirección IP y el puerto se corresponderán con los parámetros configurados por el usuario al inicio del sistema.
10. "AT+CIPSEND?": Permite conocer la longitud máxima posible de los paquetes de datos enviados.
11. "AT+CIPSEND=<num>": Establece el tamaño <num> de los paquetes a enviar de acuerdo al parámetro devuelto por el comando anterior.

A partir de este momento, se comenzará la sincronización de datos almacenados localmente en el sistema. Para ello, el sistema irá accediendo de manera secuencial a medida que se vayan transmitiendo por completo, a todos los ficheros cuyas rutas estén contempladas en el fichero comunicaciones.txt. Así, accederá en primer lugar al fichero contemplado en la primera ruta reflejada en comunicaciones.txt e irá leyendo la

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

información y enviándola en paquetes de tamaño <num>. Además, para todo paquete el sistema calculará un checksum que transmitirá junto con la información y que permitirá al receptor determinar si ha recibido la información sin errores de transmisión.

En el proceso de envío de información, en primer lugar, el módulo enviará el paquete de información, e informará del correcto envío del mismo. De no producirse el envío de manera correcta, se repetirá. Tras enviarse de forma correcta, se quedará al a espera de la respuesta del servidor receptor. Si la respuesta recibida por parte del receptor indica que la recepción del paquete de información se ha producido correctamente, el sistema procederá al envío del siguiente paquete. En caso contrario, se repetirá el envío realizado anteriormente. Una vez se haya transmitido un fichero por completo, se pasará a transmitir el siguiente contemplado en el fichero comunicaciones.txt y así sucesivamente. En caso de transmitirse todos los ficheros pendientes, se borrará todo el contenido del fichero comunicaciones.txt, y se procederá al cierre de la comunicación mediante los siguientes comandos:

1. "AT+CIPCLOSE": Cierra la conexión TCP
2. "AT+CIPSHUT": Desactiva el contexto PDP

En este punto, el siguiente estado a ejecutar será el de "sincronizar".

Es necesario mencionar que para todo el proceso de comunicaciones se ha establecido un tiempo determinado (configurado por el usuario al iniciar el sistema). Al comienzo de dicho proceso de comunicaciones, se tomará como referencia la hora del sistema. Así, cada vez que se va a efectuar el envío de un comando o de un paquete de información, en primer lugar, se chequeará la hora actual del sistema y se verificará mediante la hora de referencia si ha transcurrido el tiempo total para las comunicaciones. En caso negativo, se procederá al envío del comando/paquete. En caso afirmativo, se tendrá que finalizar el proceso de comunicaciones. Pueden darse dos casos diferentes:

- Que se produzca time out antes de haber establecido conexión TCP, en cuyo caso finalizará el estado "comunicar" y el sistema pasará a estado "sincronizar". En este caso, el fichero de comunicaciones.txt que contiene las rutas de los ficheros pendientes de sincronizar quedará tal cual se encontraba,

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

de manera que las nuevas rutas de los ficheros a transmitir se acumularán a los ficheros que ya se encontraban pendientes.

- Que se produzca time out cuando ya se haya establecido conexión TCP cuando el sistema se encuentre transmitiendo datos. En este caso, el sistema eliminará del fichero comunicaciones.txt las rutas de los ficheros que hayan sido transmitidos por completo, quedando en el fichero de comunicaciones.txt las rutas de aquellos ficheros cuya transmisión no se hubiese llevado a cabo o cuya transmisión se haya interrumpido. Las nuevas rutas de los ficheros a transmitir se acumularán a estos ficheros pendientes. Por último, se procederá al cierre de la comunicación mediante los siguientes comandos:

1. "AT+CIPCLOSE": Cierra la conexión TCP
2. "AT+CIPSHUT": Desactiva el contexto PDP

En este punto, el siguiente estado a ejecutar será el de "sincronizar".

Estado "Sincronizar"

En este estado se lleva a cabo la sincronización de la hora del sistema (hora del RTC) empleando el protocolo NTP. Para ello se efectuará con ayuda del módulo SIM800L una conexión UDP al servidor "hora.roa.es", servidor del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, Cádiz, que proporciona la hora oficial de España.

Para este proceso de sincronización ocurre lo mismo que para el proceso de comunicaciones: al iniciarse se tomará una hora de referencia con la que se podrá ir verificando, a medida que se lleva a cabo el proceso de sincronización, si ha transcurrido el tiempo preestablecido para la sincronización. En caso afirmativo, se interrumpirá el mismo.

Tras este proceso, el sistema regresará a estado "Espera", estado en el que permanecerá hasta que la alarma indique el inicio de un nuevo ciclo de muestreo.

Estado "Muestreo diluido"

Tras el primer testeo del equipo en campo se detectó que, en aquellas zonas en las que el valor de concentración de CO₂ puede alcanzar valores muy elevados, se puede producir

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

la saturación del sensor de medida si la concentración supera el rango de medida del sensor (5%). Con ello, las capacidades del sistema para la monitorización volcánica se ven "reducidas" dependiendo de las características de la zona en la que se instale el equipo.

El uso de un sensor de rango superior para el sistema diseñado no constituye una solución puesto que llevaría implícita una notable disminución de la precisión de medida del sensor debido al rango de error asociado al mismo. Por ello, se implementó en el sistema un método de dilución de la muestra para lograr obtener medidas de concentración de CO₂ incluso en aquellos casos en los que los valores medidos superan el rango de medida del sensor.

Así, si el sistema detecta que la medida de la concentración de CO₂ se sitúa por encima del 4.5% del rango de medida del sensor, pasará a modo muestreo diluido, repetirá el ciclo de muestreo actual pero esta vez diluyendo la muestra y permanecerá en el mismo a la hora de realizar los sucesivos muestreos. Si se detectase que la medida de la concentración se encuentra por debajo del 4% de rango de medida del sensor, el sistema pasará de nuevo a modo de muestreo normal, repetirá el actual ciclo de muestreo sin diluir la muestra y permanecerá en este modo para futuros ciclos de muestreo.

Como ya se ha mencionado, si el sistema se encontraba en modo "normal" y pasa a modo "muestreo diluido" o viceversa, se repetirá de nuevo el proceso de muestreo actual partiendo del punto de la limpieza del sistema.

Así, tras efectuarse la limpieza del sistema, se procederá a la toma de la muestra procedente del suelo a analizar. Se programará la alarma para pasar al estado "medir" en función del tiempo necesario para el llenado del pistón más un tiempo de espera con el cual se pretende que la muestra que se halla dentro del pistón se homogenice. Después, se procederá a la toma de la muestra realizando la dilución.

Para la toma de la muestra diluida, se tomará el 80% de la muestra de aire procedente de la atmósfera (80 ml dado que el pistón es de 100 ml) y 20% de muestra procedente del suelo (20 ml), proporciones que, junto con la medida de la concentración del aire tomada durante el proceso de limpieza del sistema, se emplearán a posterior para obtener el valor de concentración de CO₂ del suelo.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

A continuación, el sistema pasará a estado "espera" aguardando a que salte la alarma programada para pasar a estado "medir" y proseguir con el ciclo de muestreo.

3.2.2. Software del servidor del centro de análisis de datos.

La sincronización de la información recopilada por el sistema de medida de concentración de CO₂ en el suelo con el servidor del centro de análisis de datos se lleva a cabo realizando una conexión cliente/servidor. Para ello se emplea el módulo estándar Socket [107] en Python, que provee una interfaz de bajo nivel para crear conexiones de tipo TCP/IP y UDP o, en otros términos, no es más que un canal de comunicación que permite conectar dos equipos a través de la red. La separación entre cliente servidor en estas conexiones es de tipo lógico. Además, cabe destacar que cuando se abre la conexión cliente-servidor, las vías de comunicación son bidireccionales por lo que ambas pueden emitir y recibir mensajes a través del socket.

En el caso que nos ocupa, se creará una conexión de tipo TCP para la cual el servidor debe crear un objeto socket e indicar que escuchará peticiones en una dirección de IP (local o pública) y un puerto determinados. Estos parámetros serán los que se deberán configurar para el sistema diseñado en el menú de configuración inicial (ver Sección 3.2.1) para que sea posible la sincronización de la información.

Así, el archivo recepcion.py recoge el software diseñado en Python para el servidor y que permite la configuración de un servidor TCP/IP, la conexión de un cliente (sistema de medida de concentración de CO₂), y la recepción y almacenamiento de la información recibida. El diagrama de flujo que resume el funcionamiento del software del servidor se presenta en la siguiente figura:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

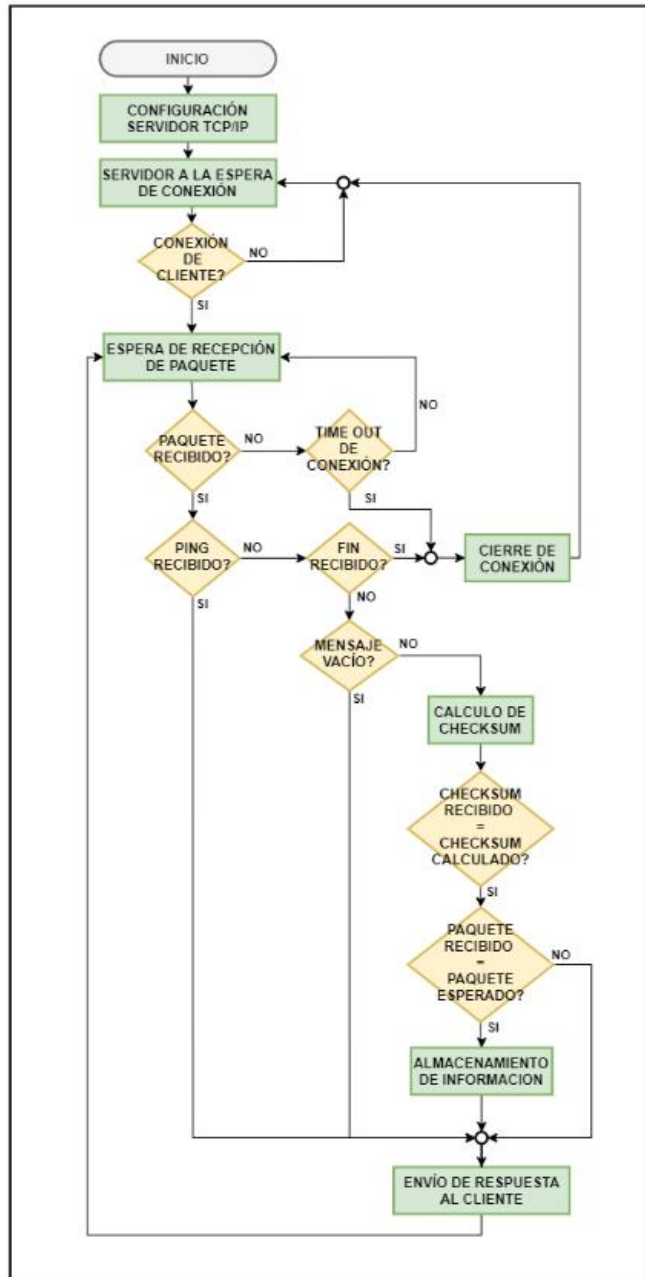


Figura 3.13. Diagrama de flujo de funcionamiento del servidor del centro de análisis.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Como se puede apreciar, en primer lugar, se establecerá la configuración necesaria para el servidor, indicándose la dirección de IP (local o pública) y el puerto en el que escuchará peticiones de conexión. A continuación, se quedará a la espera de peticiones de conexión por parte del sistema de medida de la concentración de CO₂ (cliente) (Figura 3.14).



Figura 3.14. Servidor TCP a la espera de una conexión de cliente.

Una vez el cliente establezca conexión (cuando al sistema le toque sincronizar, de acuerdo a los parámetros definidos por el usuario), comenzará la sincronización de datos. El servidor irá recibiendo los diferentes paquetes que el cliente (sistema de medida de la concentración) vaya enviando e irá procesando dicha información. En caso de que se dé un periodo de tiempo predefinido durante el cual no se reciba nada por parte del cliente, se producirá el time out de la conexión y se cerrará la misma (quedando el servidor a la espera de una nueva conexión). A la hora de la recepción de un paquete, en primer lugar, se analizará la información recibida, pudiendo darse diferentes casos:

- El paquete recibido se corresponde con "PING". Este mensaje se recibe cuando se ha seleccionado en el menú principal del sistema de medida la opción "O" para el testeo de las comunicaciones. El servidor, al recibir este mensaje responderá "OKPING" y quedará a la espera del siguiente mensaje.
- El paquete recibido se corresponde con "FIN". Este mensaje se recibirá por parte del cliente cuando se haya transmitido por completo toda la información pendiente de sincronizar. En este momento enviará el mensaje "FIN" al

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

servidor con objeto de cerrar la conexión actual en curso. Una vez cerrada dicha conexión, el servidor quedará esperando una nueva conexión del cliente.

- Se ha recibido un paquete vacío. El servidor responderá "KO", mensaje que indica al cliente que se ha producido algún tipo de error en el envío y por lo tanto éste deberá reenviar de nuevo el paquete.
- Ninguna de las anteriores. Este caso se recibirá un paquete de información recopilada por el sistema. En primer lugar, el servidor identificará el checksum incorporado en dicho paquete y lo separará del paquete de información en sí. Si no localizase dicho checksum, interpretará que ha habido un error en la recepción del paquete y responderá "KO" al cliente, lo cual supondrá que este último deba reenviar el paquete de nuevo. En caso de localizar el checksum, el servidor realizará el cálculo del checksum de la información recibida y lo comparará con el valor de checksum recibido. En caso de que no coincidan los valores, interpretará que ha habido un error en la recepción del paquete y responderá "KO" al cliente, lo cual supondrá que este último deba reenviar el paquete de nuevo. En caso de que los valores de checksum coincidan, el paquete habrá sido recibido sin errores y proseguirá con el procesado de la información. El siguiente paso consistirá en identificar si el paquete recibido se corresponde con la cabecera de inicio de un fichero de información o no. En caso afirmativo, el servidor deberá crear el nuevo fichero cuya información se recibirá en este y los sucesivos paquetes. Así, primero extraerá del paquete recibido la información de fecha y hora del fichero a recibir. Luego accederá al directorio base "DATOS CO₂" definido en el servidor en el cual se almacenará toda la información. Dentro del mismo, los ficheros recibidos se almacenarán en una estructura de AÑO/MES/DIA/horamin.txt de la misma forma que se lleva a cabo el almacenamiento local de la información en el sistema. Así, el servidor verificará si existe cada directorio asociado al año, mes y día del fichero a recibir y en caso de no existir alguno, lo creará. Dentro del directorio día correspondiente, generará un fichero bajo el nombre "horaminuto.txt" donde hora y minuto se extraen del paquete recibido. A continuación, se abrirá dicho

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

fichero y se escribirá la información recibida en el paquete actual. Finalizado lo anterior, el servidor responderá "OK" al cliente (indicando la correcta recepción y almacenamiento del paquete número "1" del fichero en vías de transmisión y confirmando el envío del siguiente paquete "2") y quedará a la espera de la recepción del siguiente paquete.

En caso de que el paquete recibido no se corresponda con la cabecera de inicio de un fichero de información, el servidor comprobará, en primer lugar, que el paquete recibido se corresponde con el esperado comprobando el número identificador del paquete recibido y comparándolo con el identificador del paquete que espera (en caso de que el último recibido sea el "1" esperará por el paquete "2" y así sucesivamente). Esta comprobación se efectúa para evitar el almacenamiento de información duplicada que pueda producirse si el servidor envía la confirmación al cliente para que envíe el siguiente paquete y este no reciba dicha confirmación o la reciba con errores. De ser así el cliente reenviaría de nuevo el último paquete y, de no efectuar el servidor esta comprobación mencionada, almacenaría el paquete recibido por segunda vez.

Así, si el identificador del paquete recibido no coincide con el esperado, pero sí con el identificador del paquete anterior recibido, se enviará "OK" al cliente, pero no se almacenará este paquete. Si el identificador del paquete recibido no coincide con el esperado ni con el del paquete anterior recibido, se enviará "KO" al cliente para indicarle que reenvíe de nuevo el paquete actual. En caso de que el identificador del paquete recibido coincida con el esperado, añadiremos la información del paquete recibido al fichero correspondiente con el cual estábamos trabajando, aumentaremos el identificador del paquete a esperar en la siguiente recepción y se enviará "OK" al cliente. El servidor quedará a la espera de la recepción de otro paquete por parte del cliente.

De esta forma se irá creando en el directorio del servidor del centro de datos un espejo del directorio local de almacenamiento de información en el sistema de medida.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

3.3. Consumo

El sistema ha sido diseñado para ser instalado en un lugar sin acceso a la red de suministro eléctrico, utilizando como fuentes de energía una batería de 12 V y un panel solar que la recargue. El consumo de energía se convierte en un punto crucial, debiendo ser el mínimo posible.

Para estimar el consumo en los diferentes estados de funcionamiento (ver Sección 3.2), se empleó un periodo de muestreo de una hora y una batería de 12 V como fuente de alimentación. Los resultados se muestran a continuación, calculándose teóricamente la autonomía utilizando los parámetros especificados en la siguiente tabla:

Modo	Sleep (estado espera)	ON (estado guardar)	Toma de la muestra limpiar + estado muestrear)	Inyección de la muestra (estado medir)
Consumo (W)	0.06	0.48	12	10.2
Tiempo (s)	3370	30	20	180

Tabla 3.5. Consumo del sistema de medida de la concentración de CO₂

Se tiene un consumo de 15.38 Wh/día.

Teniendo en cuenta una descarga del 80% en una batería de 12 V y utilizando una batería de 7 Ah se logra una autonomía de 11 días. Con este consumo, el sistema puede ser instalado con un pequeño panel solar de 10 W.

3.4. Coste económico.

En la Tabla 3.6, se muestra el costo de los componentes del sistema de forma desglosada:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Componentes	Precio (€)
Actuador lineal	240
Pistón	25
2 Electroválvulas	34
Sensores meteorológicos	124.6
Sensor CO ₂	600
Sim800L	2
Datalogger	60
Cables y componentes	90
Carcasa contenedora	50
Precio total	1225.60

Tabla 3.6. Coste total del sistema de medida de la concentración de CO₂

Si se compara el precio de equipos comerciales similares al sistema diseñado, como puede ser el caso de la estación para la medida de flujo de CO₂ en continuo de West Systems cuyo precio asciende a miles de euros, el equipo presentado con esta Tesis ofrece un precio total muy competitivo.

3.5. Resultados

Antes de desplegar el sistema en áreas volcánicas, con objeto de verificar su fiabilidad y robustez, en primer lugar, se efectuaron pruebas en laboratorio y posteriormente se realizaron pruebas en suelo de áreas no volcánicas (Figura 3.15).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

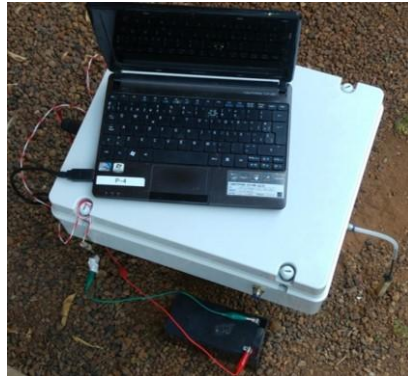
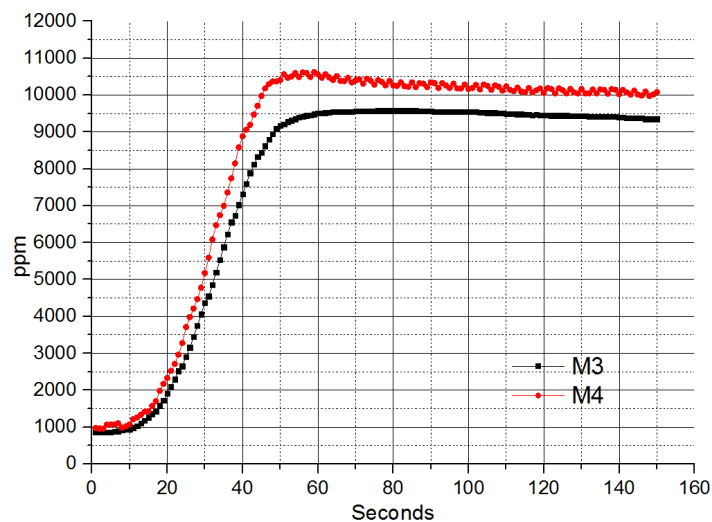


Figura 3.15. Pruebas del sistema en sueño de áreas no volcánicas

Las Figuras 3.16 y 3.17 son muestras representativas de los resultados obtenidos en los múltiples muestreos realizados para el testeo del sistema en laboratorio y el testeo en suelo de áreas no volcánicas. La Figura 3.16 muestra dos muestreos diferentes realizados artificialmente en el laboratorio, donde se puede apreciar que las concentraciones iniciales de CO₂ son casi las mismas, mientras que los niveles máximos de CO₂ medidos cambian dependiendo de la cantidad de CO₂ inyectada sintéticamente.



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Figura 3.16. Pruebas del sistema en laboratorio. M3 y M4 son dos muestreos diferentes realizados artificialmente en el laboratorio en días diferentes.

La Figura 3.17 muestra tres muestreos diferentes realizados en el mismo punto de muestreo en el suelo, en un área no volcánica y con una frecuencia de muestreo de cinco minutos. Las medidas se llevan a cabo durante 150 segundos (tiempo de medida + tiempo de estabilizado) para garantizar que toda la muestra de gas pase por delante del sensor de CO₂.

Aunque las concentraciones iniciales de CO₂ no son las mismas (debido a una limpieza insuficiente del sistema), los niveles máximos de concentración de CO₂ de los tres experimentos son similares. Aunque el rango de niveles de CO₂ en los experimentos artificiales es mayor que los que se pueden esperar en suelo auténtico, se debe señalar que la evolución de las medidas de CO₂ es similar en todas las pruebas, coincidiendo con el comportamiento esperado para la concentración de CO₂ de acuerdo al método elegido para efectuar las medidas.

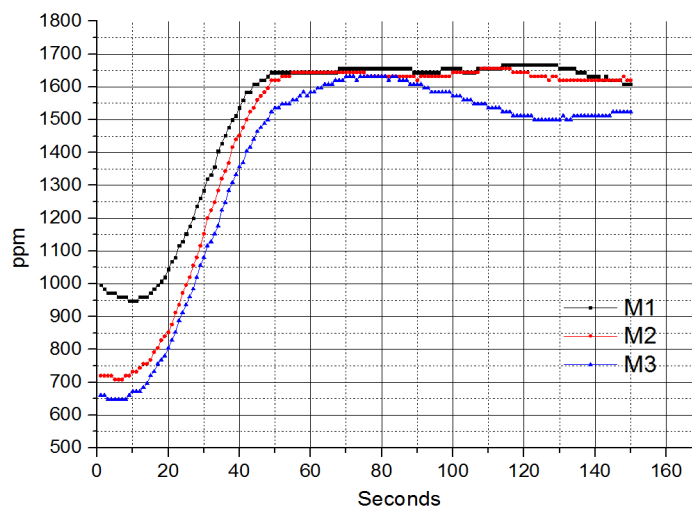


Figura 3.17. Pruebas del sistema en suelo de áreas no volcánicas. M1 M2 y M3 son tres muestreos diferentes realizados en el mismo punto de muestreo en el suelo de un área no volcánica, con una frecuencia de muestreo de cinco minutos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este experimento permitió detectar que el método de limpieza hasta el momento implementado resultaba ineficiente para lograr una adecuada limpieza del sistema, motivo por el cual se implementó otro método de limpieza, actualmente en uso, pasando de inyectar una única muestra de aire procedente en la atmósfera en el sensor a inyectar dos muestras de aire procedente de la atmósfera.

Tras las pruebas del sistema en laboratorio y en suelos de área no volcánica, la siguiente fase de validación del sistema consistió en el testeo del sistema en suelo de un área volcánica. El lugar seleccionado para realizar las pruebas fue en la cima del Teide, concretamente en la zona del mirador de Fortaleza (Figura 3.18), zona en la que se efectúa con frecuencia campañas de medida de flujo de CO₂ siguiendo un mallado preestablecido para luego cartografiar la emisión de CO₂ en el área.

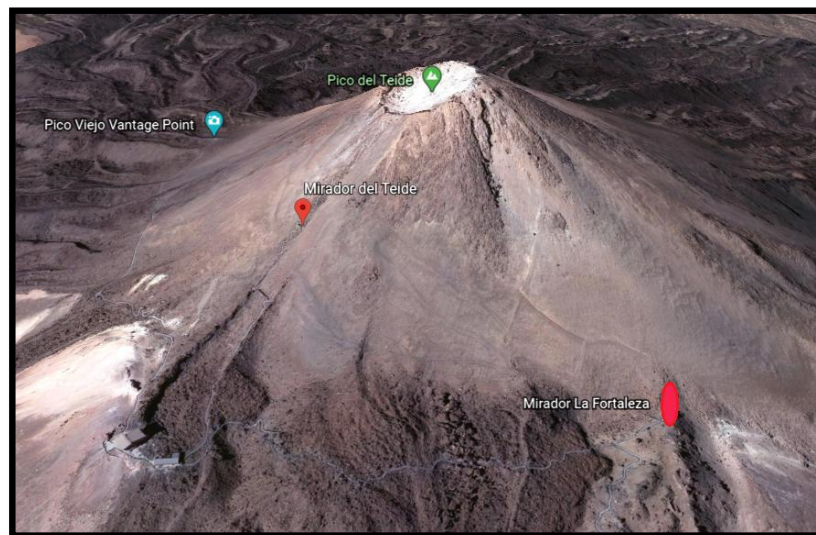


Figura 3.18. Zona escogida para efectuar la validación del sistema en área volcánica.

La Figura 3.19 representa algunos de los resultados obtenidos para diferentes muestreos que se llevaron a cabo, en los que las medidas se tomaron durante 150 segundos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

(de la misma forma que las pruebas en suelo no volcánico). En los mismos puntos se llevaron a cabo medidas con equipos comerciales portátiles de medida de concentración de CO₂ que permitiesen disponer de valores de referencia.

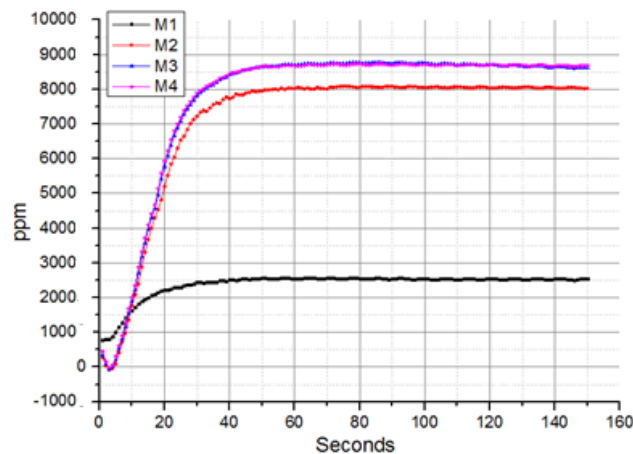


Figura 3.19. Resultados de las pruebas en suelo volcánico. M1 corresponde a un muestreo realizado en un punto de concentración de CO₂ muy bajo. M2, M3 y M4 corresponden a muestreos realizadas en un mismo punto con 5 minutos de diferencia entre ellos. Este punto tiene concentración baja-media de CO₂.

De estas pruebas realizadas se pueden inferir diferentes conclusiones:

Por un lado, se comprobó que se pueden dar niveles muy diferentes de CO₂ en puntos de medida muy cercanos entre sí.

Por otra parte, en aquellos puntos donde la concentración de CO₂ es baja o media-baja, el sistema ofrece una respuesta muy similar a la obtenida en las pruebas de laboratorio y en suelo de áreas no volcánicas. Además, los valores medidos coinciden con los esperables de acuerdo a los valores tomados como referencia. Así, el sistema muestra ser una solución válida y robusta para la monitorización volcánica en estos casos.

Por último, en aquellos puntos donde la concentración de CO₂ es media-alta o alta, el sensor de medida de la concentración de CO₂ se satura y con ello la funcionalidad del sistema se ve reducida para estos casos. Dado que, como regla general, se tomarán medidas

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

dentro de este rango de concentraciones especificado, quedó patente la necesidad de buscar una solución a este punto y que haga del sistema una opción válida y robusta para la monitorización de la concentración de CO₂ en todos los casos posibles. Descartando la posibilidad de utilizar un sensor de CO₂ de mayor rango de medida ya que esto implicaría no solo un incremento notable del precio, sino que además llevaría implícito asumir un mayor error en la medida, se implementó en el sistema un método de dilución aplicable únicamente en caso de saturación del sensor. Si las muestras de gas que se toman del suelo se diluyen con aire de la atmósfera, el sensor detectará concentraciones de CO₂ más bajas, reduciendo el rango de medida necesario y permitiendo el uso de un sensor menos costoso y de mejor resolución. Así, si al realizar la medida de la concentración el sistema detecta que los valores medidos llevarán a la saturación del sensor o se sitúan muy próximos al límite superior del rango de medida de mismo, se auto configurará para realizar la dilución de la muestra en la siguiente medida (ver Sección 3.2.1 estado "guardar" y estado "muestreo diluido"). La incorporación de esta mejora al sistema hace del mismo una solución completa y válida para la monitorización de la concentración de CO₂ en áreas volcánicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

CAPITULO 4

Conclusiones

Se ha alcanzado el objetivo final de esta Tesis, desarrollando instrumentación para el seguimiento de la actividad volcánica dentro del campo de la geoquímica.

Se ha logrado, por un lado, el desarrollo de un sistema de medida de la temperatura a profundidad determinada. Se trata de un sistema de bajo coste, robusto y fiable, que presenta un muy bajo consumo gracias a la inclusión de la tecnología IoT y al desarrollo hardware y software realizados. Permite la monitorización en tiempo real de la temperatura en la zona seleccionada mostrándose los datos vía Internet a través de una web. El sistema ha sido validado favorablemente en pruebas de laboratorio y campo y ha sido empleado positivamente mediante el despliegue de una red de medida de la temperatura en diferentes puntos de una zona volcánica que presenta anomalías térmicas.

Se ha logrado, por otro lado, el desarrollo de un sistema de medida de la concentración de CO₂ a una determinada profundidad. Se trata de un sistema robusto de coste muy competitivo respecto a equipos comerciales de similares funciones y que permite la monitorización en tiempo cuasi real (dependiendo de la configuración) de este parámetro junto con otros parámetros meteorológicos con un consumo muy reducido. El sistema ha sido validado favorablemente en pruebas de laboratorio y campo.

Se tiene por tanto dos sistemas para la monitorización de dos de los parámetros geoquímicos más importantes en la vigilancia volcánica.

4.1. Aportaciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

En este apartado se explican las diferentes aportaciones específicas conseguidas en el presente trabajo de Tesis:

Sistema de medida de temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.

Se presenta una red inalámbrica basada en LoRa, escalable fiable, robusta, de bajo consumo y de bajo costo, válida para la monitorización de anomalías térmicas en áreas volcánicas en tiempo real. Aprovechando el protocolo de comunicación LoRa, la red de termómetros portátiles diseñada permite monitorizar de forma continua los valores de temperatura en diferentes puntos dentro las áreas deseadas, mostrando los valores adquiridos a usuarios remotos a través de una web. Además de los valores de temperatura, los usuarios también pueden visualizar parámetros relacionados con la operación de la red como el RSSI, los niveles de batería de cada termómetro y el porcentaje de error en la transmisión de los paquetes.

La principal ventaja de la red presentada es su extremadamente bajo consumo de energía, lo que garantiza una larga duración de la batería. Para cada termómetro, alimentado por una batería de 3.7 V y transmitiendo datos cada 10 min, se estima teóricamente un tiempo de vida de 2,14 años (Sección 2.5 y 2.7.3). Este resultado asegura un muestreo adecuado para la temperatura del suelo además de un largo período de tiempo sin necesidad de mantenimiento, lo cual es de vital importancia en el ámbito de la monitorización de volcanes, ya que estas áreas generalmente son remotas e inaccesibles.

Se logró un bajo costo ya que el precio total de la red es 384.75€, siendo el gateway el elemento más caro (Tablas 2.7, 2.8 y 2.9). Cada termómetro tiene un costo estimado de 37.01€ y se diseñaron de forma óptima para facilitar su transporte e la instalación. Se hace posible, por tanto, el rápido despliegue de una red de monitorización fiable y con una cantidad de termómetros y un precio adecuados. Además, si es necesario, a posterior del despliegue inicial de la red ésta se puede ampliar fácilmente agregando nuevos termómetros y modificando simplemente un único parámetro en el gateway.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Su instalación permitió verificar la validez de la misma, coincidiendo los valores de temperatura registrados con los datos proporcionados y recolectados por el proyecto MultiTeide (Figura 2.19 y Tabla 2.10). Se puede garantizar, por lo tanto, la monitorización adecuada de la temperatura mediante la red inalámbrica desarrollada. Con respecto a los niveles de RSSI (Figura 2.24), LoRa ha mostrado un buen rendimiento, confirmando ser una elección correcta entre las diferentes opciones de tecnologías de transmisión.

Los resultados confirman que la red inalámbrica desarrollada diseñada para monitorizar la temperatura del suelo en áreas volcánicas ha cumplido los requisitos esenciales de baja potencia, baja costo, escalabilidad, operación robusta y comunicación en tiempo real. La red puede instalarse en cualquier área volcánica, siendo totalmente extrapolable a cualquier otro ambiente que no guarde relación con los ambientes volcánicos donde se requiera la monitorización de la temperatura.

Resultados recogidos en los trabajos realizados con la participación del doctorando:

- "An Internet of Things (IoT) Application on Volcano Monitoring". Awadallah, S.; Moure, D.; Torres-González, P. Sensors 2019, 19(21), 4651; doi: 0.3390/s19214651
- "An Internet of Things (IoT) application on volcano monitoring". Shadia Awadallah-Estévez, Ángel David Moure-García, Pedro Torres-González and Víctor Villasante-Marcos. EGU General Assembly 2018, 8–13 April, Vienna (Austria).

Sistema de bajo consumo y bajo coste para la monitorización de la concentración de CO₂ en el suelo en áreas volcánicas.

Se presenta un sistema de bajo consumo y bajo coste para la monitorización de la concentración de CO₂ en el suelo en áreas volcánicas basado en Arduino. Este dispositivo permite monitorizar de forma continua el valor de la concentración de CO₂ a una determinada profundidad (40 cm) en el punto deseado, recopilando la información de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

manera local y sincronizándola también con el centro de análisis de datos. De esta forma se consigue la monitorización en tiempo cuasi real (dependiendo de la sincronización configurada) de este parámetro. Además de los valores de concentración de CO₂, también se tendrá acceso a diferentes parámetros meteorológicos en este punto como son la presión atmosférica, humedad relativa temperatura y precipitación.

Se logró un bajo costo ya que el precio total del mismo es de 1225.60 € (Tabla 3.6) siendo éste altamente competitivo si se compara con los precios de mercado de equipos comerciales de similar propósito y que requieren de grandes inversiones económicas no solo inicialmente sino cada vez que sea necesario sustituir un componente (algo muy común debido a los ambientes extremadamente corrosivos en los que se instalan estos equipos). El bajo precio permite tanto la fácil sustitución de componentes dañados o averiados como la producción en masa de este equipo de manera que pueda disponerse de tantos equipos como puntos se desee monitorizar. Además, el sistema se diseñó de forma óptima para facilitar tanto su transporte como su instalación posibilitando su rápido despliegue.

Tanto el hardware y software del sistema ha sido diseñado de manera que se garantice el mínimo consumo de energía posible alcanzando una autonomía teórica de 11 días (Tabla 3.5) alimentándolo con una batería de 12 V y 7 Ah. Esta batería se acompaña de un panel solar de 10 W que permita la recarga de la misma. De esta manera se garantiza un largo período de tiempo de funcionamiento sin necesidad de mantenimiento, lo cual es de vital importancia en el ámbito de la monitorización de volcanes, ya que estas áreas generalmente son remotas e inaccesibles. Esta característica también contribuye a que el sistema constituya una solución altamente competitiva respecto a los equipos comerciales, de extremadamente elevado consumo.

Su testeo en campo permitió verificar la validez del mismo, coincidiendo los valores de concentración registrados con los datos de referencia recolectados por medio de equipos portátiles. Con la introducción de mejoras tras este primer testeo en cuanto a la limpieza del sistema y al método de diluciones, se puede garantizar la monitorización adecuada de la concentración de CO₂ mediante el sistema desarrollado tanto en puntos de baja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

concentración como en puntos donde la concentración sea superior al rango de medida del sensor.

La obtención de datos en tiempo cuasi real es posible gracias a que el sistema ha sido dotado de comunicación vía GPRS, que permite la sincronización de grandes cantidades de información con el centro de datos.

Los primeros resultados confirman que el sistema desarrollado para monitorizar la concentración de CO₂ del suelo en áreas volcánicas cumple los requisitos de baja potencia, bajo costo y comunicación en tiempo real. El sistema puede instalarse en cualquier área volcánica, siendo totalmente extrapolable a cualquier otro ambiente que no guarde relación con los ambientes volcánicos donde se requiera la monitorización de este parámetro. Con la incorporación de las mejoras implementadas tras estos primeros resultados (limpieza y método de diluciones) se persigue la validez del sistema en el 100% de los posibles escenarios, incluso aquellos en los que el valor de concentración medido supera el rango de medida del sensor. De esta forma se logra un sistema robusto y efectivo en cualquier caso.

Resultados recogidos en los trabajos realizados con la participación del doctorando:

- "Development of a low cost and low power consumption system for monitoring CO₂ soil concentration in volcanic areas" Shadia Awadallah-Estévez, Ángel David Moure-García, Pedro Torres-González, Leopoldo Acosta and Ithaiza Dominguez-Cerdeña. EGU General Assembly 2017, 23-28 April, Vienna (Austria).

4.2. Futuras líneas de trabajo.

El trabajo de investigación realizado para la Tesis queda abierto a una serie de futuras líneas de trabajo:

Respecto al sistema de medida de la temperatura a profundidad determinada, se ha planteado una segunda versión para el hardware de los termómetros, en la que se han introducido algunas mejoras y se ha reducido notablemente el espacio que ocupa gracias al

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

empleo de componentes SMD y a la sustitución del módulo de medida de la temperatura por su circuito equivalente. Esta segunda versión ha quedado pendiente de ser testeada como futura línea de trabajo. Por otra parte, tomando como base la red implementada, se plantea su adaptación software y hardware para la obtención de una red de monitorización de parámetros meteorológicos. Se diseñó una primera versión hardware del medidor meteorológico dejando como futura línea de trabajo la adaptación software y el testeado de la red.

Respecto al sistema de medida de la concentración de CO₂ a una determinada profundidad, se plantea el testeado en laboratorio del método de diluciones diseñado para verificar su total validez por medio de equipamiento profesional y los materiales (botellas de CO₂ de concentración conocida) necesarios, cuya adquisición ya se halla en trámite por parte del IGN (organismo que ha financiado esta Tesis doctoral).

Por otra parte, se pretende la instalación del sistema diseñado en un emplazamiento definitivo, dentro del Parque Nacional de Las Cañadas del Teide. Al tratarse de un paraje protegido se hace necesario llevar a cabo diferentes trámites en el organismo oficial encargado de otorgar estos permisos aportándose la documentación, memorias e informes pertinentes. Este trámite ya se halla iniciado, plateándose la instalación del equipo como línea de futuro. Actualmente se aguarda la concesión de dicho permiso.

Una vez se instale el sistema y éste se halle registrando un período de tiempo suficiente, se podrá plantear mostrar los datos registrados a usuarios remotos a través de una web, cuyo diseño se plantea como línea de desarrollo futuro.

Por último, otra línea de futuro no tan inmediata como las anteriormente expuestas y que podría ser planteada sería el diseño de un método de corrección de la influencia de los parámetros meteorológicos sobre los valores de la concentración.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

125

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

CAPITULO 5

Bibliografía

- [1] H. U. Schmincke, *Volcanism*. Springer, 2004.
- [2] «The Encyclopedia of Volcanoes - 2nd Edition». <https://www.elsevier.com/books/the-encyclopedia-of-volcanoes/sigurdsson/978-0-12-385938-9> (accedido jun. 26, 2020).
- [3] L. Parfitt y L. Wilson, *Fundamentals of Physical Volcanology*. Wiley, 2009.
- [4] R. S. J. S. Sparks, «Forecasting volcanic eruptions», *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 210, pp. 1-15, may 2003, doi: 10.1016/S0012-821X(03)00124-9.
- [5] R. Scarpa y R. I. Tilling, *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- [6] C. López *et al.*, «Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011–2012 submarine eruption», *Geophysical Research Letters*, vol. 39, n.º 13, 2012.
- [7] G. Phillipson, R. Sobrado, y J. Gottsmann, «Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 264, pp. 183-196, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.08.004>.
- [8] C. R. J. Kilburn, «Multiscale fracturing as a key to forecasting volcanic eruptions», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 125, n.º 3, pp. 271-289, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00117-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00117-3).
- [9] P. Jousset *et al.*, «Signs of magma ascent in LP and VLP seismic events and link to degassing: An example from the 2010 explosive eruption at Merapi volcano, Indonesia», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 261, pp. 171-192, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.014>.
- [10] A. Hooper, F. Prata, y F. Sigmundsson, «Remote Sensing of Volcanic Hazards and Their Precursors», *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, n.º 10, pp. 2908-2930, oct. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2199269.
- [11] G. Williams-Jones y H. Rymer, «Detecting volcanic eruption precursors: a new method using gravity and deformation measurements», *Journal of Volcanology and*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por:	Fecha:
Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- Geothermal Research*, vol. 113, n.º 3, pp. 379-389, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00272-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00272-4).
- [12] P. A. Torres-González *et al.*, «Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 392, p. 106757, feb. 2020, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.106757.
- [13] S. Sainz-Maza Aparicio, J. Arnos Sampredo, F. González Montesinos, y J. Martí Molist, «Volcanic signatures in time gravity variations during the volcanic unrest on El Hierro (Canary Islands)», *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 119, n.º 6, pp. 5033-5051, 2014.
- [14] V. Villasante-Marcos *et al.*, «Hydrothermal system of central tenerife volcanic complex, Canary Islands (Spain), inferred from self-potential measurements», *Journal of volcanology and geothermal research*, vol. 272, pp. 59-77, 2014.
- [15] A. Finizola, F. Sortino, J.-F. Lénat, M. Aubert, M. Ripepe, y M. Valenza, «The summit hydrothermal system of Stromboli. New insights from self-potential, temperature, CO₂ and fumarolic fluid measurements, with structural and monitoring implications», *Bulletin of Volcanology*, vol. 65, n.º 7, pp. 486-504, 2003.
- [16] P. Bormann y E. Bergman, «The new IASPEI Manual of Seismological Observatory Practice», *Seismological Research Letters*, vol. 71, pp. 510-518, sep. 2000, doi: 10.1785/gssrl.71.5.510.
- [17] *Earthquake and Volcano Deformation*. 2010.
- [18] «Introduction to Volcanic Seismology, Volume 6 - 3rd Edition». <https://www.elsevier.com/books/introduction-to-volcanic-seismology/zobin/978-0-444-63631-7> (accedido jun. 26, 2020).
- [19] G. Melián *et al.*, «A magmatic source for fumaroles and diffuse degassing from the summit crater of Teide Volcano (Tenerife, Canary Islands): a geochemical evidence for the 2004–2005 seismic–volcanic crisis», *Bull Volcanol*, vol. 74, n.º 6, pp. 1465-1483, ago. 2012, doi: 10.1007/s00445-012-0613-1.
- [20] P. Torres-González *et al.*, «Spatial and Temporal Analysis of Temperature and Gaseous Emission Inside a Gallery in An Active Volcanic Island (Tenerife, Canary Islands)», *Pure Appl. Geophys.*, vol. 176, n.º 8, pp. 3467-3485, ago. 2019, doi: 10.1007/s00024-019-02174-8.
- [21] P. Torres-González *et al.*, «Geochemical signals related to the 2011–2012 El Hierro submarine eruption», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 381, pp. 32-43, 2019, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.05.018.
- [22] «Variations on the concentration of ²²²Rn in the subsurface of the volcanic island of Tenerife, Canary Islands | Request PDF», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/248814149_Variations_on_the_concentration_of_222Rn_in_the_subsurface_of_the_volcanic_island_of_Tenerife_Canary_Islands (accedido sep. 11, 2020).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- [23] P. Francis y D. Rothery, «Remote Sensing of Active Volcanoes», *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 28, pp. 81-106, nov. 2003, doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.81.
- [24] «COSPEC Remote Sensor - Resonance Ltd». <http://resonance.on.ca/cospec.htm> (accedido ago. 17, 2020).
- [25] «Cerex Multi-Gas FTIR and UV DOAS Analyzers». <http://cerexms.com/products/> (accedido ago. 17, 2020).
- [26] «Remote Sensors – Spectrometers, Monochromators and Light Sources from Vacuum Ultra-Violet (VUV) to Visible (Vis) | Resonance Ltd». <https://resonance.on.ca/remote-sensors/> (accedido ago. 17, 2020).
- [27] S. S. Instruments, «FTIR Spectrometers», ene. 22, 2018. <https://www.ssi.shimadzu.com/> (accedido ago. 17, 2020).
- [28] «Soil Gas Flux System | LI-COR Environmental». https://www.licor.com/env/products/soil_flux/ (accedido jun. 26, 2020).
- [29] «Portable Fluxmeter - A West System Monitoring Solution», *Portable Fluxmeter*. <https://www.portablefluxmeter.com/> (accedido jun. 26, 2020).
- [30] «Continuous monitoring • West Systems srl». <https://www.westsystems.com/continuous-monitoring/> (accedido jun. 26, 2020).
- [31] «Dióxido de carbono (CO₂)», *Vaisala*. <https://www.vaisala.com/es/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/carbon-dioxide-co2> (accedido jun. 26, 2020).
- [32] «Detección portátil de gases». https://www.draeger.com/es_es/Applications/Productselector/Portable-Gas-Detection (accedido jun. 26, 2020).
- [33] «Taking Earth's Temperature via Satellite «Landsat Science». <https://landsat.gsfc.nasa.gov/taking-earths-temperature-via-satellite/> (accedido jun. 26, 2020).
- [34] I. G. Nacional, «Instituto Geográfico Nacional», *Geoportal oficial del Instituto Geográfico Nacional de España*. <http://www.ign.es> (accedido sep. 20, 2019).
- [35] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, y E. Cayirci, «Wireless sensor networks: a survey», *Computer Networks*, vol. 38, n.º 4, pp. 393-422, 2002, doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
- [36] J. Zheng y A. Jamalipour, *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. 2009.
- [37] R. Amin, S. H. Islam, G. P. Biswas, M. K. Khan, y N. Kumar, «A robust and anonymous patient monitoring system using wireless medical sensor networks», *Future Generation Computer Systems*, vol. 80, pp. 483-495, 2018, doi: 10.1016/j.future.2016.05.032.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- [38] F. Liu, Z. Chen, y J. Wang, «Intelligent medical IoT system based on WSN with computer vision platforms», *Concurrency Computation*, 2018, doi: 10.1002/cpe.5036.
- [39] W.-C. Hsu *et al.*, «A WSN smart medication system», *Procedia Engineering*, vol. 5, pp. 588-591, 2010, doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.178.
- [40] Dunfan Ye, Daoli Gong, y Wei Wang, «Application of wireless sensor networks in environmental monitoring», en *2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, dic. 2009, vol. 1, pp. 205-208, doi: 10.1109/PEITS.2009.5407035.
- [41] K. Vairamani, N. Mathivanan, K. Arun Venkatesh, y U. Dinesh Kumar, «Environmental parameter monitoring using wireless sensor network», *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 56, n.º 4, pp. 468-471, jul. 2013, doi: 10.1134/S0020441213040118.
- [42] V. Bapat, P. Kale, V. Shinde, N. Deshpande, y A. Shaligram, «WSN application for crop protection to divert animal intrusions in the agricultural land», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 133, pp. 88-96, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2016.12.007.
- [43] M. Srbinovska, C. Gavrovski, V. Dimcev, A. Krkoleva, y V. Borozan, «Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks», *J. Clean Prod.*, vol. 88, pp. 297-307, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.036.
- [44] S. A. Nikolidakis, D. Kandris, D. D. Vergados, y C. Douligeris, «Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 113, pp. 154-163, 2015, doi: 10.1016/j.compag.2015.02.004.
- [45] R. Vera-Amaro, M. E. R. Angeles, y A. Luviano-Juarez, «Design and Analysis of Wireless Sensor Networks for Animal Tracking in Large Monitoring Polar Regions Using Phase-Type Distributions and Single Sensor Model», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45911-45929, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908308.
- [46] A. Boulmaiz, D. Messadeg, N. Doghmane, y A. Taleb-Ahmed, «Robust acoustic bird recognition for habitat monitoring with wireless sensor networks», *Int J Speech Technol*, vol. 19, n.º 3, pp. 631-645, 2016, doi: 10.1007/s10772-016-9354-4.
- [47] H. Mostafaei, M. U. Chowdhury, y M. S. Obaidat, «Border Surveillance With WSN Systems in a Distributed Manner», *IEEE Systems Journal*, vol. 12, n.º 4, pp. 3703-3712, 2018, doi: 10.1109/JSYST.2018.2794583.
- [48] S. Ismail, E. Alkhader, y A. Ahmad, «Prison perimeter surveillance system using WSN», *Journal of Computer Science*, vol. 13, n.º 11, pp. 674-679, 2017, doi: 10.3844/jcssp.2017.674.679.
- [49] Elisati Hulu, Bambang Riyanto, y Sri Widiantoro, «Wireless Sensor Networks For Volcano Activity Monitoring: A Survey», *Scientific Journal of Informatics*, vol. 2, n.º 1, pp. 53-62, 2016, doi: 10.15294/sji.v2i1.4528.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- [50] R. Lopes Pereira, J. Trindade, F. Gonçalves, L. Suresh, D. Barbosa, y T. Vazão, «A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, n.º 12, pp. 3123-3142, dic. 2014, doi: 10.5194/nhess-14-3123-2014.
- [51] R. Buyya y A. V. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*. 2016.
- [52] A. Høglund *et al.*, «Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT», *IEEE Network*, vol. 31, n.º 6, pp. 16-22, dic. 2017, doi: 10.1109/MNET.2017.1700082.
- [53] R. S. Sinha, Y. Wei, y S.-H. Hwang, «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT», *ICT Express*, vol. 3, n.º 1, pp. 14-21, 2017, doi: 10.1016/j.ict.2017.03.004.
- [54] «Home page | LoRa Alliance™». <https://lora-alliance.org/> (accedido ago. 16, 2018).
- [55] A. Augustin, J. Yi, T. H. Clausen, y W. M. Townsley, «A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things», *Sensors*, vol. 16, n.º 9, p. 1466, 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [56] «Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)». <https://www.sigfox.com/en> (accedido ago. 16, 2018).
- [57] «Sigfox Technology Overview | Sigfox». <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview> (accedido feb. 05, 2019).
- [58] M. Mahmoud y A. Mohamad, «A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications», *Advances in Internet of Things*, vol. 06, pp. 19-29, ene. 2016, doi: 10.4236/ait.2016.62002.
- [59] U. Raza, P. Kulkarni, y M. Sooriyabandara, «Low Power Wide Area Networks: An Overview», *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, n.º 2, pp. 855-873, Secondquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [60] R. Sanchez-Iborra y M.-D. Cano, «State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services», *Sensors*, vol. 16, n.º 5, p. 708, may 2016, doi: 10.3390/s16050708.
- [61] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, y Fernand Meyer, «A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment», *ICT Express*, vol. 5, n.º 1, pp. 1-7, 2019, doi: 10.1016/j.ict.2017.12.005.
- [62] «LTE». <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte> (accedido sep. 17, 2019).
- [63] «Semtech». <https://www.semtech.com> (accedido may 14, 2019).
- [64] «Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication - IEEE Conference Publication». <https://ieeexplore.ieee.org/document/7797659> (accedido jun. 26, 2020).
- [65] L. Vangelista, «Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation», *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, n.º 12, pp. 1818-1821, dic. 2017, doi: 10.1109/LSP.2017.2762960.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 27/10/2020 19:11:19

Leopoldo Acosta Sánchez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 11:31:39

Ángel David Moure García
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 12:30:38

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- [66] «LoRa Modulation Basics». <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJu/xvKUc5w9yjG1q5Pb2IikpolW54YYqGb.frOZ7HQBCrC> (accedido jun. 26, 2020).
- [67] «LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL». </library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (accedido jun. 26, 2020).
- [68] O. B. A. Seller y N. Sornin, «Low power long range transmitter», EP2763321A1, ago. 06, 2014.
- [69] C. A. Hornbuckle, «Fractional-N synthesized chirp generator», US7791415B2, sep. 07, 2010.
- [70] *Introduction to CDMA Wireless Communications*. Elsevier, 2007.
- [71] S. Kim, H. Lee, y S. Jeon, «An Adaptive Spreading Factor Selection Scheme for a Single Channel LoRa Modem», *Sensors*, vol. 20, n.º 4, Art. n.º 4, ene. 2020, doi: 10.3390/s20041008.
- [72] «Ra-02 Ai-Thinker». http://wiki.ai-thinker.com/_media/lora/docs/c048ps01a1_ra-02_product_specification_v1.1.pdf (accedido mar. 14, 2019).
- [73] «SX1278 | Semtech». <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/SX1278> (accedido ago. 20, 2018).
- [74] «Lora Design Guide. SX1272/3/6/7/8»: https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide_STD.pdf (accedido may 22, 2019).
- [75] R. P. Foundation, «Raspberry Pi — Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi», *Raspberry Pi*. <https://www.raspberrypi.org> (accedido ago. 16, 2018).
- [76] R. Fox, *Linux with operating system concepts*. CRC Press, 2014.
- [77] C. T. Wilkes, R. L. Stanger, R. J. Willmott, D. T. Pering, J. A. McGonigle, y A. R. England, «The Development of a Low-Cost, Near Infrared, High-Temperature Thermal Imaging System and Its Application to the Retrieval of Accurate Lava Lake Temperatures at Masaya Volcano, Nicaragua», *Remote Sensing*, vol. 10, n.º 3, 2018, doi: 10.3390/rs10030450.
- [78] J. Radebaugh, R. M. Lopes, R. R. Howell, R. D. Lorenz, y E. P. Turtle, «Eruptive behavior of the Marum/Mbwelesu lava lake, Vanuatu and comparisons with lava lakes on Earth and Io», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 322, pp. 105-118, ago. 2016, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.03.019.
- [79] D. Moure *et al.*, «Use of Low-Cost Acquisition Systems with an Embedded Linux Device for Volcanic Monitoring», *Sensors*, vol. 15, n.º 8, 2015, doi: 10.3390/s150820436.
- [80] C. T. Wilkes, D. T. Pering, J. A. McGonigle, G. Tamburello, y R. J. Willmott, «A Low-Cost Smartphone Sensor-Based UV Camera for Volcanic SO₂ Emission Measurements», *Remote Sensing*, vol. 9, n.º 1, 2017, doi: 10.3390/rs9010027.
- [81] «Earthquake Seismograph & Infrasound Monitor | Shake & Boom». <https://raspberrysshake.org/products/raspberry-shake-boom/> (accedido oct. 15, 2019).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- [82] «Raspberry Pi 3 Model B». <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> (accedido mar. 06, 2019).
- [83] «ATmega328 - 8-bit AVR Microcontrollers - Microcontrollers and Processors - Microcontrollers and Processors». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328> (accedido feb. 04, 2019).
- [84] «STM32F103C8 - Mainstream Performance line, ARM Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes Flash, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN - STMicroelectronics». <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f103c8.html> (accedido ago. 21, 2018).
- [85] «PIC18F25K40 - Microcontrollers and Processors - Microcontrollers and Processors». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F25K40> (accedido ago. 21, 2018).
- [86] «PIC16F1788 - Microcontrollers and Processors - Microcontrollers and Processors». <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F1788> (accedido ago. 21, 2018).
- [87] RS, «PT100 specifications», mar. 06, 2019. <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/15e5/0900766b815e5304.pdf> (accedido mar. 06, 2019).
- [88] A. Industries, «Adafruit PT100 RTD Temperature Sensor Amplifier - MAX31865». <https://www.adafruit.com/product/3328> (accedido ago. 21, 2018).
- [89] «Samsung ICR18650 Lithium-ion Rechargeable Battery». <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/15d2/0900766b815d2388.pdf> (accedido may 22, 2019).
- [90] «PT-2100 Keeper® | EaglePicher Technologies, LLC». <https://www.eaglepicher.com/sites/default/files/pt2100.pdf> (accedido mar. 06, 2019).
- [91] A. Tridgell, «Efficient algorithms for sorting and synchronization», PhD Thesis, 1999.
- [92] «Welcome to Bokeh — Bokeh 1.0.2 documentation». <https://bokeh.pydata.org/en/latest/> (accedido dic. 18, 2018).
- [93] «p5.js | home». <https://p5js.org/> (accedido mar. 06, 2019).
- [94] «MultiTeide -», *MultiTeide*. <http://www.multiteide.es/> (accedido may 23, 2019).
- [95] G. Richter, J. Wassermann, M. Zimmer, y M. Ohrnberger, «Correlation of seismic activity and fumarole temperature at the Mt. Merapi volcano (Indonesia) in 2000», *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 135, n.º 4, pp. 331-342, ago. 2004, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.03.006.
- [96] «Arduino - Home». <https://www.arduino.cc/> (accedido jun. 29, 2020).
- [97] «Dual full-bridge driver», p. 13.
- [98] «Linear Actuator.pdf». Accedido: jul. 06, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/e4a6/0900766b8110cf64.pdf>.
- [99] «MSRobotics - Uso de encoder con Arduino». <http://msrobotics.net/index.php/laboratorio-ard/245-uso-de-encoder-con-arduino> (accedido jul. 16, 2020).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

- [100] «V100 Electrovalves_EU.pdf». Accedido: jul. 06, 2020. [En línea]. Disponible en: https://static.smc.eu/pdf/V100_EU.pdf.
- [101] «Regulador LDO BA51.pdf». Accedido: jul. 07, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/9098/0900766b814f583a.pdf>.
- [102] «Gascard NG CO CO2 CH4 Gas Detector & Monitor», *Edinburgh Sensors*. <https://edinburghsensors.com/products/oem-co2-sensor/gascard-ng/> (accedido jul. 07, 2020).
- [103] «SHT7x (RH/T) - Digital Humidity Sensor | Sensirion». <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/pintype-digital-humidity-sensors/> (accedido jul. 07, 2020).
- [104] B. Sorter, «BMP085 Digital pressure sensor», p. 27, 2009.
- [105] «Small rain sensor with tipping bucket technology - Pronamic». <https://pronamic.com/products/small-rain-and-precipitation-sensor> (accedido jul. 07, 2020).
- [106] «SIM800». <https://www.simcom.com/product/SIM800.html> (accedido jul. 09, 2020).
- [107] «socket — Low-level networking interface — Python 3.8.5 documentation». <https://docs.python.org/3/library/socket.html> (accedido jul. 21, 2020).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Anexos

Anexo A: Esquemáticos

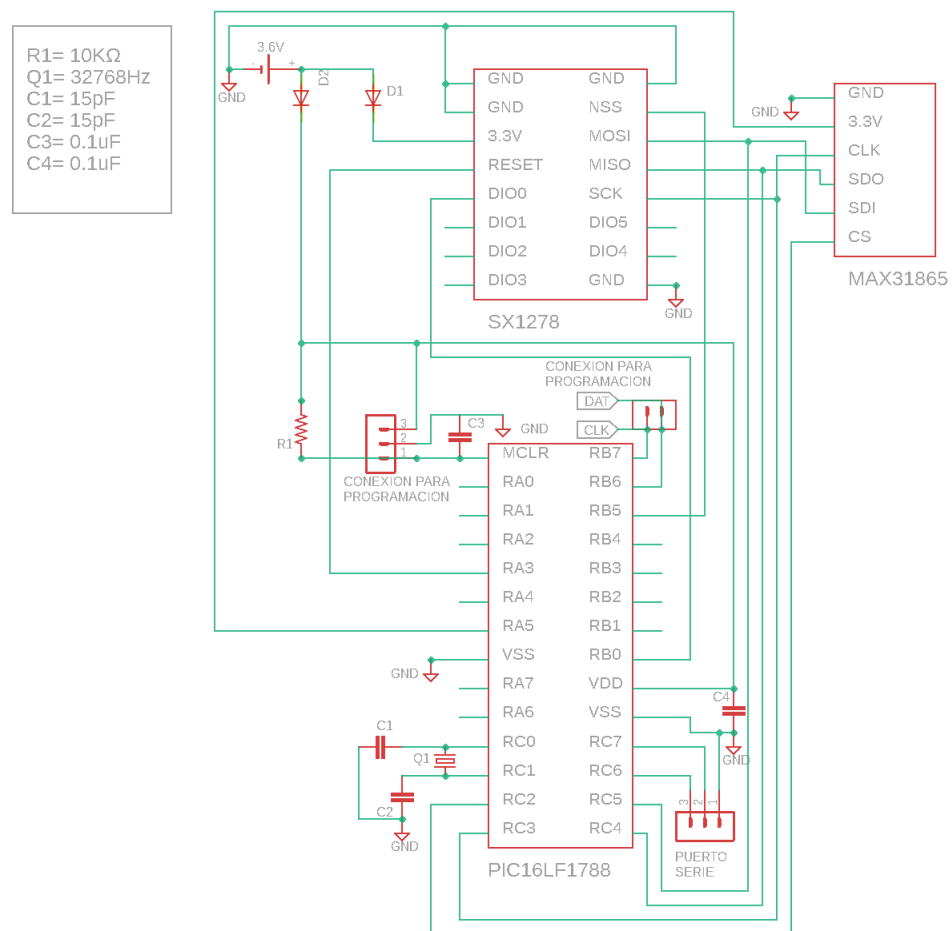


Figura A.1. Esquemático de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 27/10/2020 19:11:19

Leopoldo Acosta Sánchez
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 11:31:39

Ángel David Moure García
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 12:30:38

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"



Figura A.2. PCB de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

3

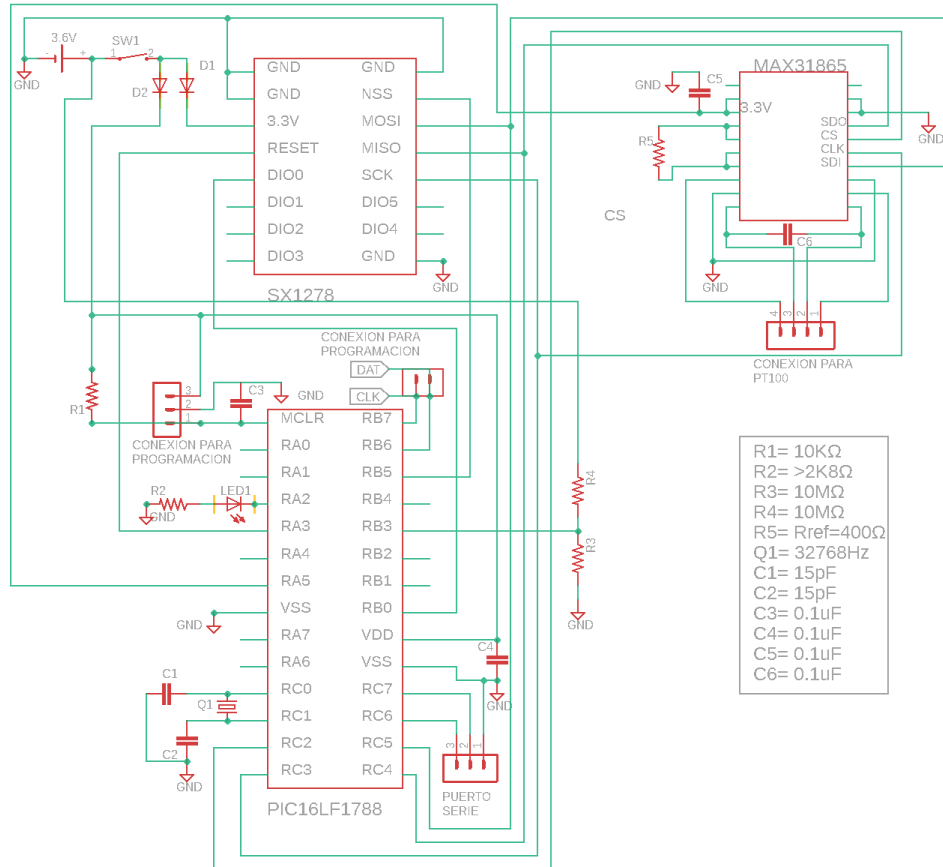


Figura A.3. Esquemático de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

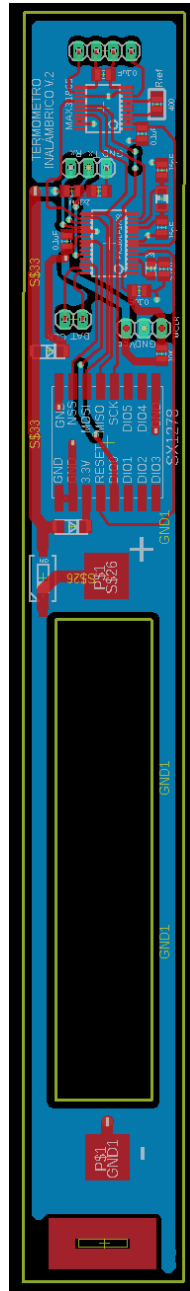


Figura A.4. PCB de los termómetros de la red inalámbrica de medida de la temperatura a determinada profundidad de zonas de anomalías térmicas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221

Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 27/10/2020 19:11:19

Leopoldo Acosta Sánchez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 11:31:39

Ángel David Moure García
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

28/10/2020 12:30:38

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

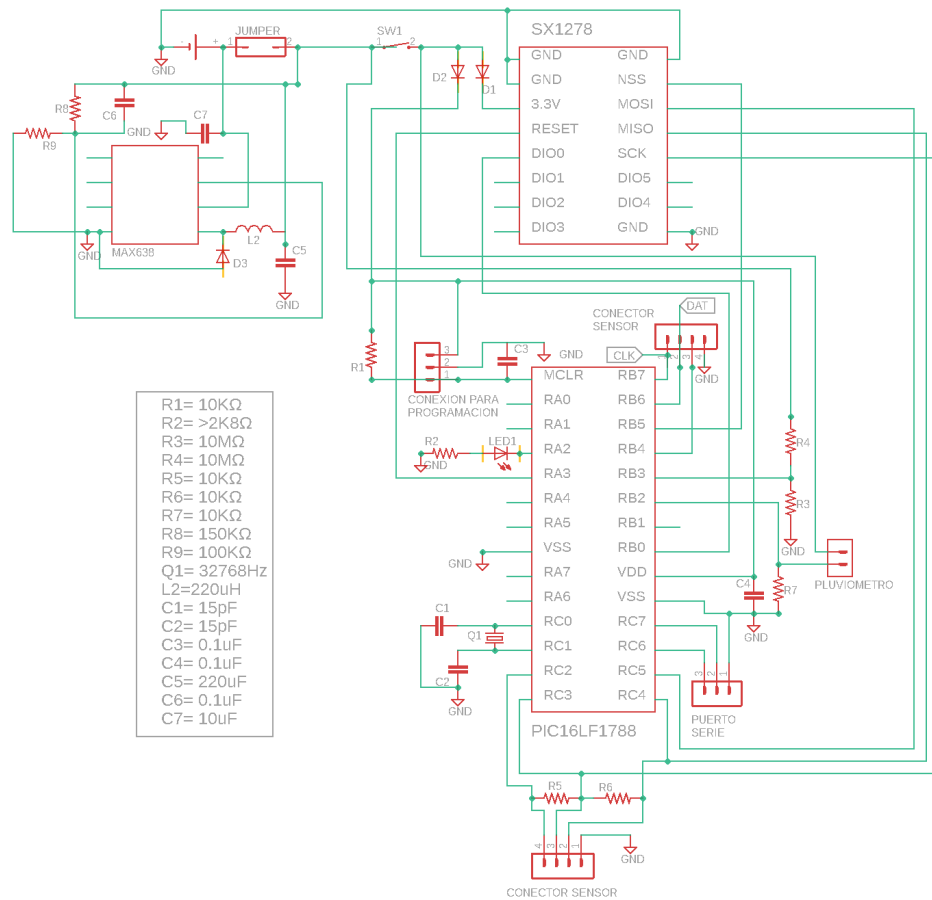


Figura A.5. Esquemático de los end devices/repetidor para la red inalámbrica de medida de parámetros meteorológicos (versión adaptada de la red de medida de temperatura).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

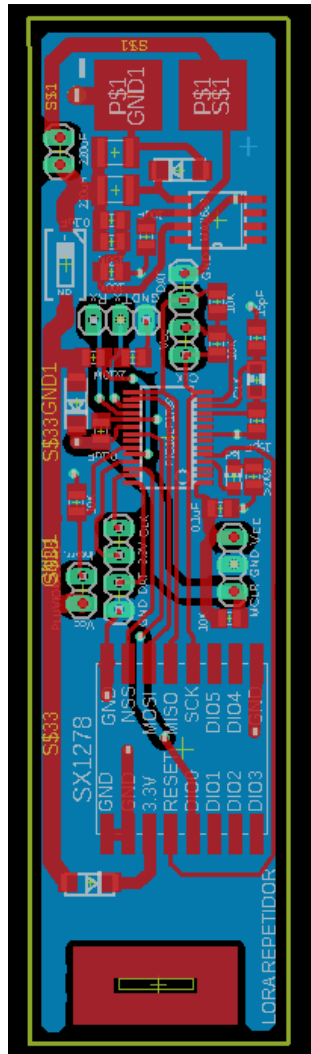


Figura A.6. PCB de los end devices/repetidor para la red inalámbrica de medida de parámetros meteorológicos (versión adaptada de la red de medida de temperatura).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: YmlICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

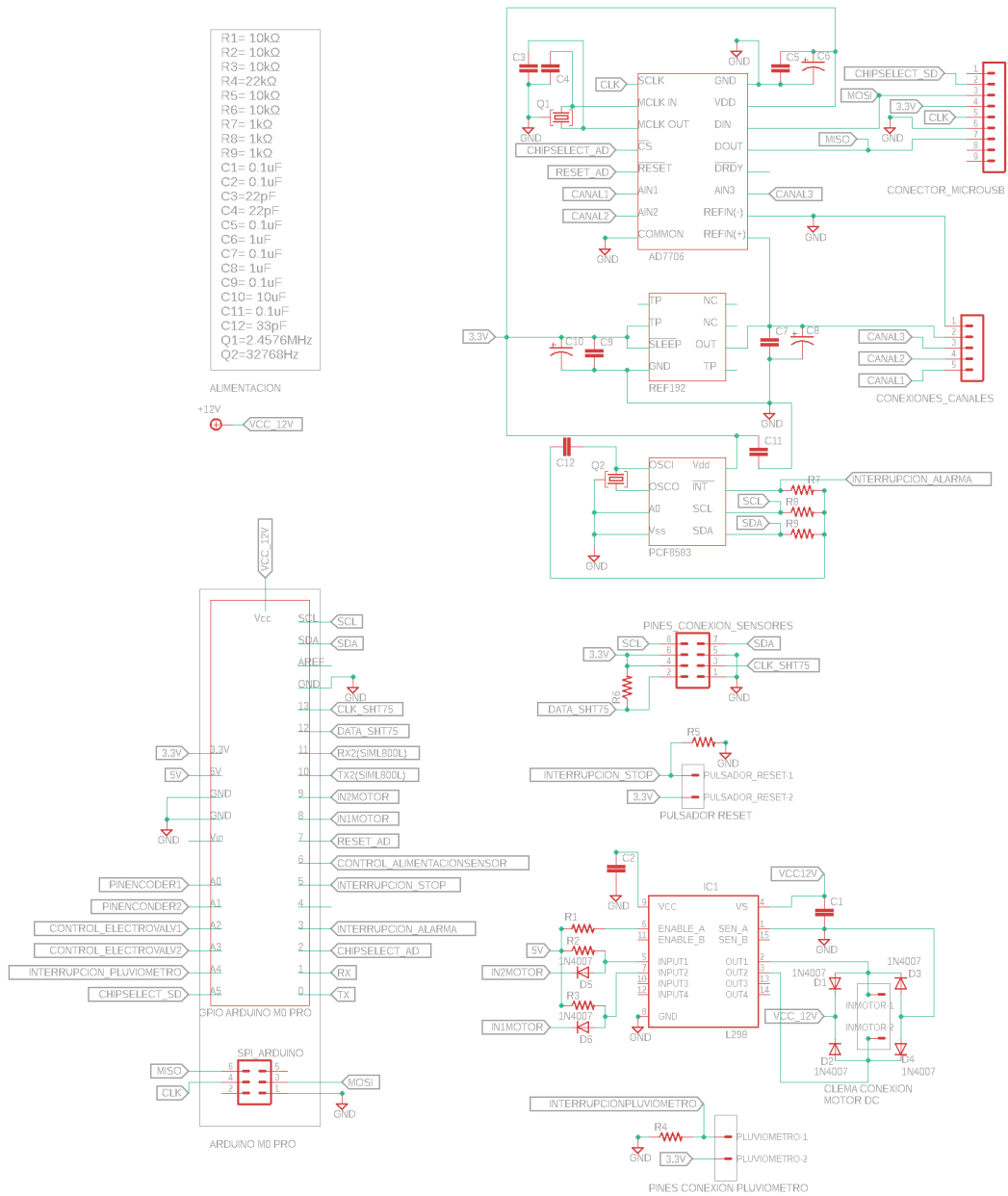


Figura A.7. Esquemático del datalogger del sistema de medida de la concentración de CO₂

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

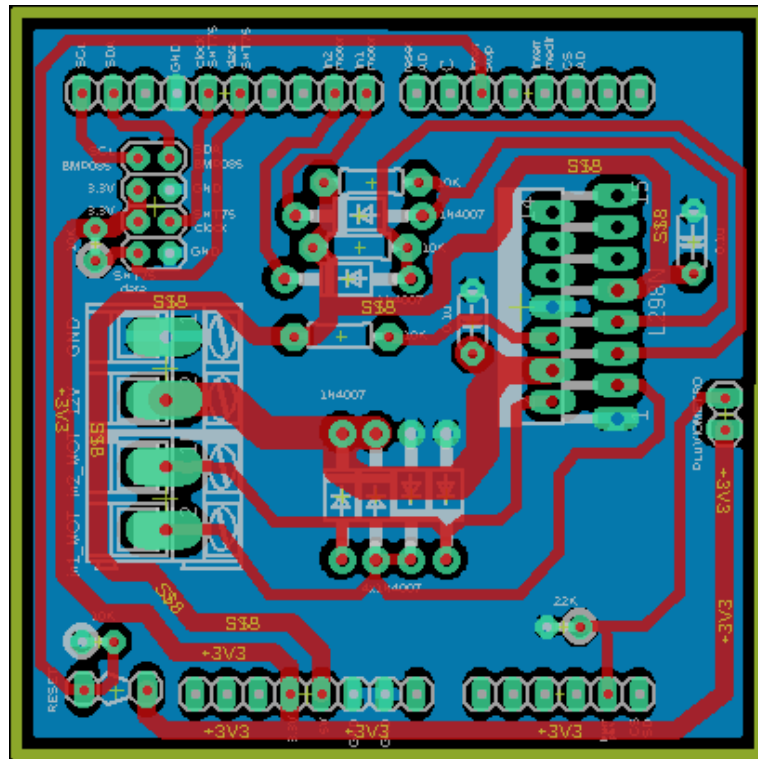


Figura A.8. PCB de la shield superior del datalogger del sistema de medida de la concentración de CO₂

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2974221	Código de verificación: Ym1ICZ3N
Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

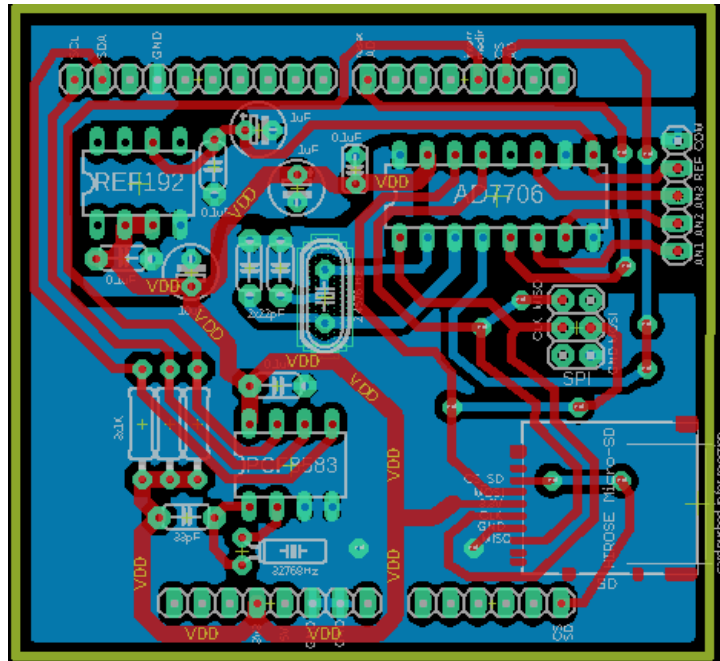


Figura A.9. PCB de la shield inferior del datalogger del sistema de medida de la concentración de CO_2

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

“Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica”

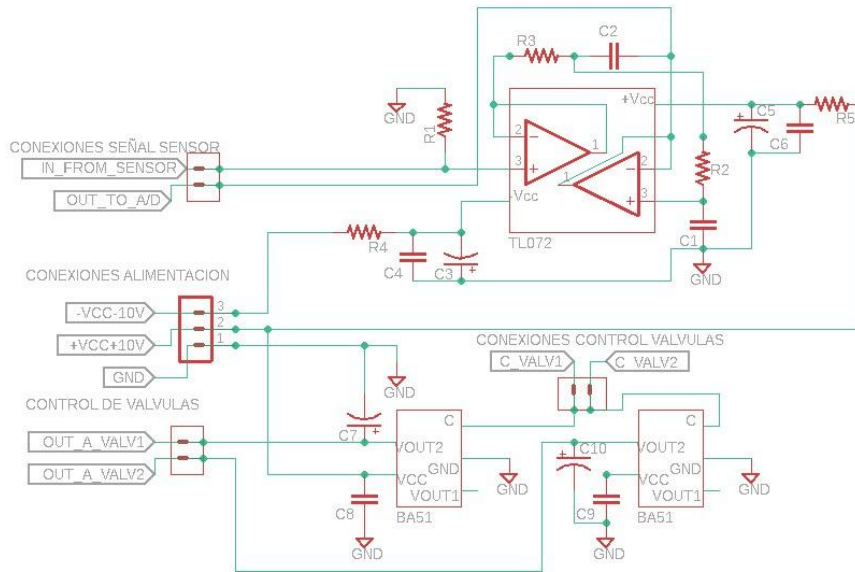


Figura A.10. Esquemático de la placa de control de electroválvulas y circuito acondicionador de la señal de salida del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂

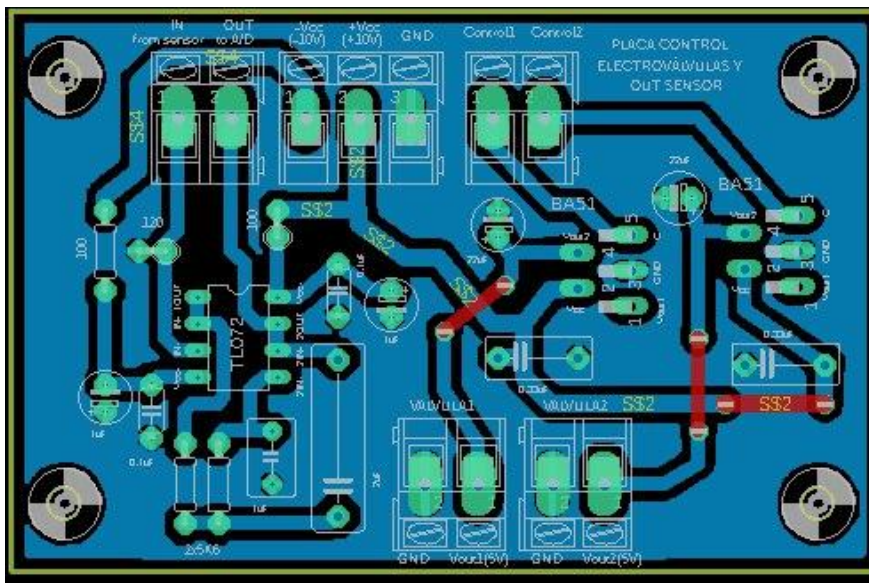


Figura A.11. PCB de la placa de control de electroválvulas y circuito acondicionador de la señal de salida del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

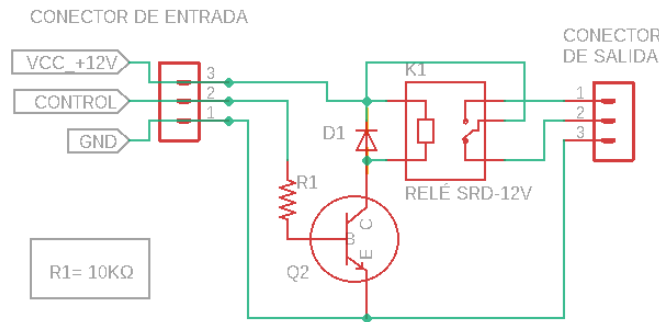


Figura A.12. Esquemático de la placa de control de alimentación del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂

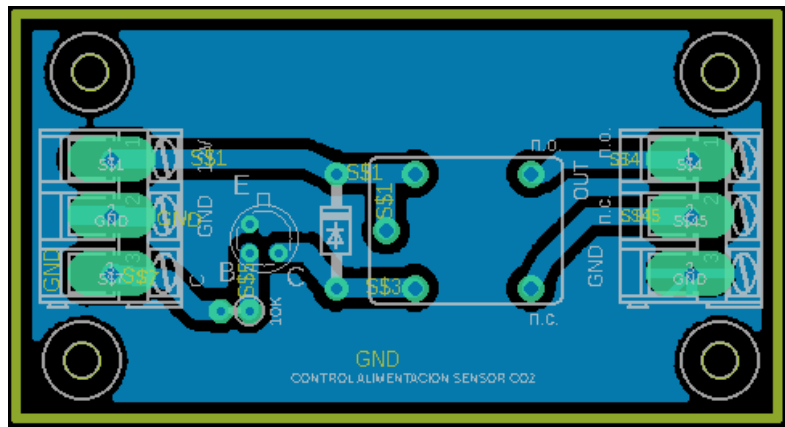


Figura A.13. PCB de la placa de control de alimentación del sensor de concentración de CO₂ del sistema de medida de la concentración de CO₂

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: Ym1ICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58

"Desarrollo de sistemas para la medida de parámetros geoquímicos para la vigilancia volcánica"

San Cristóbal de La Laguna, Octubre de 2020

Shadia Awadallah Estévez

147

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2974221 Código de verificación: YmlICZ3N

Firmado por: Shadia Awadallah Estévez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 27/10/2020 19:11:19
Leopoldo Acosta Sánchez UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 11:31:39
Ángel David Moure García UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	28/10/2020 12:30:38
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	16/11/2020 14:47:58