

Estación de Monitoreo Remoto de Variables Climáticas y Contaminantes Atmosféricos

Laureano A. Bulus Rossini^{1,2,3}, Fabián Rinalde^{1,2}, Leonardo Ortiz^{1,2}, Guillermo Güichal⁴, and Pablo A. Costanzo Caso^{1,2,3,*}

¹ Instituto Balseiro (UNCuyo and CNEA), Av. Bustillo 9500, Bariloche (8400) Argentina

² Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Bariloche Argentina

³ CONICET CCT Patagonia Norte, Bariloche (8400) Argentina

⁴ EMTECH SA, Bariloche (8400) Argentina

^(*) pcostanzo@ib.edu.ar

Abstract. En este trabajo se desarrolla una plataforma de monitoreo remoto de variables climáticas y contaminantes atmosféricos, con el objetivo de monitorear los efectos de la corrosión en equipamiento electrónico y de telecomunicaciones. Un ambiente corrosivo se puede caracterizar a partir de las condiciones climáticas (temperatura, humedad y presión) y de la concentración de partículas o contaminantes, principalmente aquellos derivados del azufre. Inicialmente, se estudian los efectos de los ambientes corrosivos sobre los circuitos impresos y en base a este conocimiento adquirido se desarrolla un prototipo de estación de monitoreo basada en componentes comerciales de fácil disponibilidad para demostrar el funcionamiento del sistema. Posteriormente, se investigan y desarrollan nuevos sensores de variables ambientales basados en tecnología electrónica y fotónica, que dejan las puertas abiertas a un nuevo desarrollo incorporando tecnología nacional.

Este trabajo se desarrolla en el marco del programa Financiamiento de Fase Cero de la Fundación Sadosky, mediante el cual se establece un convenio de desarrollo de tecnología entre la academia y una empresa con el objetivo que esta última pueda adoptar el producto desarrollado.

Keywords: Monitoreo ambiental, Monitoreo del clima, Sensor corrosión, Sensor fotónico, ReFeFO, Arsat, Red de Transporte Óptico.

1 Introducción

Las redes de comunicaciones ópticas están formadas por un número determinado de nodos los cuales están interconectados mediante fibra óptica. Estas redes permiten establecer la comunicación entre puntos distantes, ciudades, países o incluso entre continentes [1]. La necesidad de alcanzar conectividad con gran capacidad de transmisión de información en cada punto geográfico de interés, hizo necesario que las redes ópticas deban atravesar extensas regiones y adaptarse a diversas condiciones de operación. Actualmente existen desplegados equipos de telecomunicaciones en zonas remotas atravesando diferentes condiciones ambientales como pueden observarse en

regiones desérticas, húmedas, frías, calurosas, montañosas, o cruzando ríos y mares. De esta manera, uno de los principales desafíos de la infraestructura asociada a una red de comunicaciones es mantener las condiciones del entorno óptimas que aseguren el correcto funcionamiento y vida útil esperada de los equipos. A fin de cuentas, lo que se busca es reducir al mínimo posible los costos de operación y mantenimiento de las redes [2]. Por este motivo, la industria de las comunicaciones ha desarrollado requerimientos específicos sobre el ambiente en el cual será instalado y operará el equipamiento de las redes. Actualmente, los nodos de estas redes de comunicaciones se ubican físicamente en lo que se conoce como *shelter* de comunicaciones, los cuales no son más que un espacio dedicado y acondicionado, capaz de brindar tanto protección física como ambiental a los equipos de comunicaciones que conforman un nodo de una red.

Existen factores que afectan las características ambientales dentro de los *shelters* de comunicaciones y que van en desmedro de la vida útil del equipamiento que albergan en su interior. En primer término, y relacionado a la aparición de nuevas reglamentaciones que restringen el uso del plomo [3], por ejemplo, para fabricar las placas de circuito impreso que dan soporte físico a los transmisores y receptores de comunicaciones, se ha evidenciado que actualmente las mismas son más susceptibles a corroerse. Por otro lado, y considerando los mayores índices de contaminación ambiental de las zonas urbanas, se han encontrado fallas severas en equipamiento de comunicaciones relacionadas con corrosión electroquímica la cual resulta, en principio, adjudicada a contaminantes ambientales presentes en las cercanías o dentro del mismo *shelter* de comunicaciones. La instalación de sistemas sensibles en ambientes agresivos es una combinación que trae aparejada distintos tipos de consecuencias, generalmente perjudiciales.

Cuando un equipo de comunicaciones de alta performance comienza a fallar de forma repentina o bien, se daña completamente de forma intempestiva, genera consecuencias económicas y sociales importantes. Por un lado, la empresa prestadora de servicios de comunicaciones asume severas pérdidas económicas y por otro, los usuarios obtienen una disminución en la calidad del servicio o incluso una pérdida total de conectividad.

Finalmente, y teniendo en cuenta los motivos antes mencionados, surge un particular interés en monitorear en tiempo real los ambientes en donde se alojan los equipos de comunicaciones. De esta forma, puede obtenerse información vital sobre las características ambientales en las que se encuentra operando, permitiendo tomar medidas anticipadas y preventivas frente al problema del deterioro de estos equipos con el fin de evitar, en la mayoría de los casos, las posteriores fallas.

Motivación

En nuestro país, los nodos de comunicaciones de las redes de transporte óptico (por ejemplo la REFEO de ARSAT [4]) se establecen en *shelters* acondicionados, ubicados tanto en zonas urbanas como en zonas remotas, donde suelen encontrarse expuestos a condiciones extremas de trabajo. Los requerimientos para el correcto funcionamiento del equipamiento durante su ciclo de vida (superior a los 10 años en todos los casos) son muy estrictos y por diversos motivos, el microclima que se genera en el

interior de un *shelter* puede fácilmente verse alterado. Estas nuevas condiciones ambientales pueden provocar el deterioro y el mal funcionamiento del equipamiento de comunicaciones de manera acelerada, el cual está valuado, en la mayoría de los casos, en cientos de miles de dólares.

Entre los factores más importantes a monitorear se encuentran las condiciones climáticas dentro del *shelter* (humedad, temperatura y presión atmosférica) y la presencia de contaminantes aerotransportados que, por lo general, son derivados del azufre (aunque no exclusivamente) [5]. Estos contaminantes en conjunto con condiciones climáticas no apropiadas, aceleran drásticamente los procesos de corrosión, produciendo la posterior falla de los sistemas electrónicos.

Habitualmente, dentro de los *shelters* de comunicaciones, se controlan dentro de un rango preestablecido algunas características ambientales, como la temperatura. Sin embargo, éstas no se encuentran monitoreadas de forma remota y activa con el propósito de verificar su normal comportamiento. Otras variables ambientales, en cambio, no se controlan ni se monitorean, dejando al equipamiento expuesto a condiciones que pueden resultar adversas. Particularmente en nuestro país, existen desplegados cientos de equipos de comunicaciones en zonas remotas, los cuales atraviesan diferentes condiciones climatológicas, y donde se controla exclusivamente la temperatura, dejando de lado el monitoreo y control de otras variables ambientales. Esta falencia, asociada a un ambiente donde las variables climáticas y los contaminantes están fuera de los rangos admisibles, deviene en que las compañías de comunicaciones tengan que reemplazar el equipamiento dañado en períodos de tiempo que pueden ser hasta 20 veces más cortos que los especificados por los fabricantes. Esto resulta ser un problema extremadamente crítico por dos razones:

- La pérdida permanente del valor del equipamiento ubicado en los *shelters* (el cual puede alcanzar el millón de dólares).
- La pérdida o deterioro de la calidad de la comunicación con la consecuente posible pérdida de información crítica que se está transmitiendo.

Del primer punto cabe destacar que, cuando un equipo electrónico se encuentra afectado severamente por características ambientales adversas, el daño provocado sobre el mismo resulta generalmente irreversible. Del segundo punto, podemos mencionar que la pérdida de información crítica no resulta un hecho trivial. Por ejemplo, los servicios de comunicaciones de grandes ciudades podrían verse completamente interrumpidos cuando alguno de estos nodos dejase de funcionar, lo que, a su vez, también implicaría pérdidas económicas significativas.

Bajo este marco, y teniendo en cuenta las distintas consideraciones antes expuestas, la motivación de este trabajo radica en la evidente oportunidad que puede aprovecharse por quien ofrezca un equipamiento y/o un servicio de monitoreo de variables ambientales dentro de los *shelters* de comunicaciones. De esta forma, las empresas de comunicaciones o los gobiernos que posean este equipamiento/servicio contarán con información privilegiada y en tiempo real, permitiéndoles tomar medidas preventivas ante las futuras fallas de los equipos de comunicaciones que se encuentren en ambientes hostiles, con el fin de evitar dichas fallas y las correspondientes pérdidas y complicaciones que éstas generan.

Objetivos del Proyecto

Mediante la convocatoria Financiamiento de Fase Cero (FFC) de la Fundación Sadosky (FS) que vincula el sector académico con las empresas, se propone realizar el estudio de factibilidad y el desarrollo de un prototipo de laboratorio de un sistema embebido autónomo, de reducidas dimensiones y de bajo consumo, con el fin de monitorear de forma remota y en tiempo real el estado climático de un ambiente determinado. Específicamente, se analiza el desarrollo de electrónica, placas de circuito impreso (PCBs), software embebido de bajo nivel (*Firmware*) y el procesamiento y presentación de la información (de alto nivel), la integración de sensores de diferentes tecnologías (electrónicos y fotónicos), así como la posibilidad de multiplexarlos y monitorearlos.

Estructura del trabajo

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: En la Sección 2 se introduce el marco teórico. Inicialmente se dan unas breves nociones vinculadas al problema de la corrosión y se presentan casos concretos de placas de comunicaciones dañadas por el efecto de la corrosión, las cuales motivaron el presente trabajo. En la Sección 3 se define la arquitectura de la plataforma a desarrollar, se realizan las especificaciones técnicas de acuerdo a los requerimientos y se seleccionan los componentes con los cuales se fabrica la plataforma. En la Sección 4 se presentan los resultados experimentales de la plataforma obtenidos en tres ambientes con características diferentes. Finalmente, en la Sección 5, se presentan las conclusiones del trabajo.

2 Marco teórico

2.1 Corrosión

La corrosión de los metales es un proceso químico o electroquímico en el que un metal se transforma en un óxido o cualquier otro compuesto. En general, es un ataque gradual, provocado por una amplia variedad de gases, ácidos, sales, agentes atmosféricos y/o sustancias de naturaleza orgánica. Su estudio resulta complejo dada la gran variedad de materiales que lo sufren, la influencia de sus características y de los entornos ambientales [6]. La corrosión en equipamiento electrónico se puede clasificar en dos grupos:

- La corrosión uniforme, la localizada, y los mecanismos de corrosión en grietas o ranuras, corrosión galvánica y corrosión electrolítica. Requiere por lo general ambientes agresivos como son atmósferas marinas o fuertemente contaminadas y se detecta fácilmente [7].
- El segundo grupo se refiere a formas más sutiles de corrosión, que no pueden observarse fácilmente y que se presentan bajo condiciones ambientales no tan agresivas. Incluyen el desgaste por rozamiento, la corrosión en poros (*pitting corrosion*) y la migración de productos de corrosión (*creep corrosion*).

Para que ocurra un proceso corrosivo deben darse ciertas condiciones en el entorno de manera que se favorezca la generación de dichos procesos. Estas son:

Humedad: La Humedad Relativa (HR) y su velocidad de variación es un factor sumamente importante en el proceso de falla por corrosión dado que promueve el crecimiento de la misma. Los equipos de comunicaciones están diseñados para operar en el rango 30-60% de HR. Sin embargo, en ocasiones los sistemas de refrigeración y distribución de aire elevan la HR hasta el 85%, durante el control de la temperatura.

Temperatura: Un incremento de la temperatura ambiental puede acelerar la corrosión. Por ejemplo, se ha demostrado que el deterioro de placas de circuitos electrónicos expuestas a agentes corrosivos se acelera sensiblemente a temperaturas superiores a 27°C.

Partículas macroscópicas: Algunas partículas son de naturaleza higroscópica y otras captan gases corrosivos del aire. La acumulación de polvo puede ser especialmente importante en ciertas áreas en las que se deben adoptar medidas preventivas con repetidas operaciones de limpieza. Estas partículas pueden afectar la integridad de un contacto eléctrico móvil por desgaste abrasivo y, también, pueden aumentar sensiblemente la resistencia eléctrica de un interruptor.

Contaminantes ambientales: La contaminación local debida a fuentes específicas de contaminación atmosférica y a emisiones industriales próximas al lugar del emplazamiento del equipamiento, agrava la corrosión. Elementos como el cloro (Cl) y el azufre (S) aparecen de modo reiterado al analizar las causas de los problemas de corrosión en la industria electrónica. La actuación de estos elementos es notable en ambientes con HR superior al 50-60%.

2.2 Inspección de placas corroídas

Se realizó la inspección de placas de telecomunicaciones utilizadas en redes de transporte óptico WDM de alta capacidad. Las mismas operaron en *shelters* de comunicaciones remotos hasta que presentaron fallas en su funcionamiento.

Inspección Visual

La inspección visual de las placas se realizó a través de imágenes obtenidas mediante una cámara digital y por una lupa trinocular estereoscópica de laboratorio, modelo Motic SMZ 168 T-LED, con un aumento de hasta 320X.

En las Figuras 1(a)-(c) se muestran los efectos de la corrosión en diferentes *Plated Through Holes* (PTHs). En (a) se muestra como el proceso de corrosión se esparció desde un PTH que se encuentra cercano a un PAD de soldadura de un componente SMD. Puede apreciarse cómo el proceso corrosivo no afecta, en general, a las superficies con soldadura seguramente debido a la presencia de plomo. En (b) se muestra un fenómeno donde se evidencia cómo los PTHs o *pads* con mayor distancia hasta la máscara antisoldante son menos propensos a distribuir los productos de corrosión sobre el PCB. En (c) se aprecia el caso de dos PTHs vecinos donde la corrosión se distribuyó uniformemente uniendo ambos agujeros pasantes.

6

De la misma manera, en las Figuras 1(d)-(f) se muestran los procesos corrosivos sobre diferentes *pads* de la placa, los cuales constituyen puntos de prueba para las pistas internas o sobre la otra cara del PCB. En las mismas se puede ver el gran desplazamiento de la corrosión sobre la superficie de la máscara antisoldante, y en particular, en (f), se ve en detalle la morfología típica de la corrosión por arrastre.

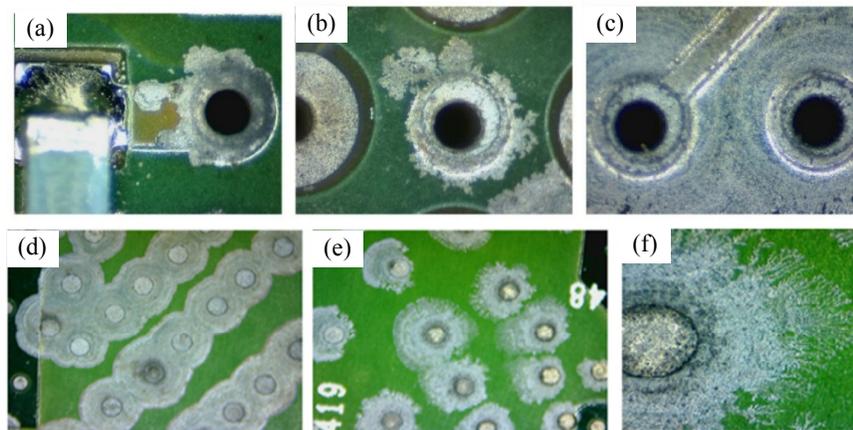


Fig. 1. Detalle de diferentes PTHs ((a) a (c)) y *pads* ((d)-(f)) de la placa analizada, donde pueden observarse los efectos de la corrosión.

Inspección por Espectroscopia

Luego de la inspección visual, se presumió que el mecanismo de falla asociado a los PCBs resultaba ser la migración electroquímica de los productos de corrosión. Sin embargo, no se contaba con información suficiente que permitiese determinar qué componentes químicos fueron los que provocaron o promovieron el proceso corrosivo. Para completar dicho análisis, se utilizó un equipamiento especializado que permite obtener información cualitativa sobre los compuestos químicos participantes en el proceso de falla. La espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX) [8], es una técnica analítica utilizada para la caracterización química de una muestra. Se basa en la interacción de una fuente de excitación de rayos X con una muestra, y luego detectar los picos de emisión característicos de la muestra, los cuales dependen de los compuestos químicos de la misma. Finalmente, la técnica permite detectar elementos químicos fundamentales, por ejemplo, Azufre (S), Hidrógeno (H) y Plata (Ag); pero no es posible que detecte los compuestos que podrían estar formando estos elementos, como ser Sulfuro de Plata (Ag_2S) Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) u otra combinación.

En las Figuras 2(a)-(c) se muestran distintas fotografías del PCB obtenidas por un microscopio electrónico de barrido, SEM, en las cuales se seleccionaron tres áreas específicas para analizar por EDX. Las Figuras 2(d)-(f) muestran los espectrogramas correspondientes a las tres regiones indicadas previamente contó con la correspondiente concentración de elementos químicos detectados. Como puede observarse en

todas las figuras se tiene presencia de Ag y Cu, dado que se trata de la superficie del acabado superficial que cubre el PTH, o de estos materiales que migraron a otras regiones. Sin embargo, las imágenes también muestran la presencia de Azufre (S), Bario (Ba), Oxígeno (O) y Silicio (Si). Las visualizaciones de los resultados encontrados en el espectrograma permiten inferir que dichos componentes corresponden al producto de corrosión por arrastre. La presencia de Ba y Si fueron atribuidas a la máscara antisoldante y al sustrato del PCB. En cambio, los elementos S y O sugieren la presencia de óxidos de Plata, Cobre o Azufre o bien sulfuros de plata o cobre.

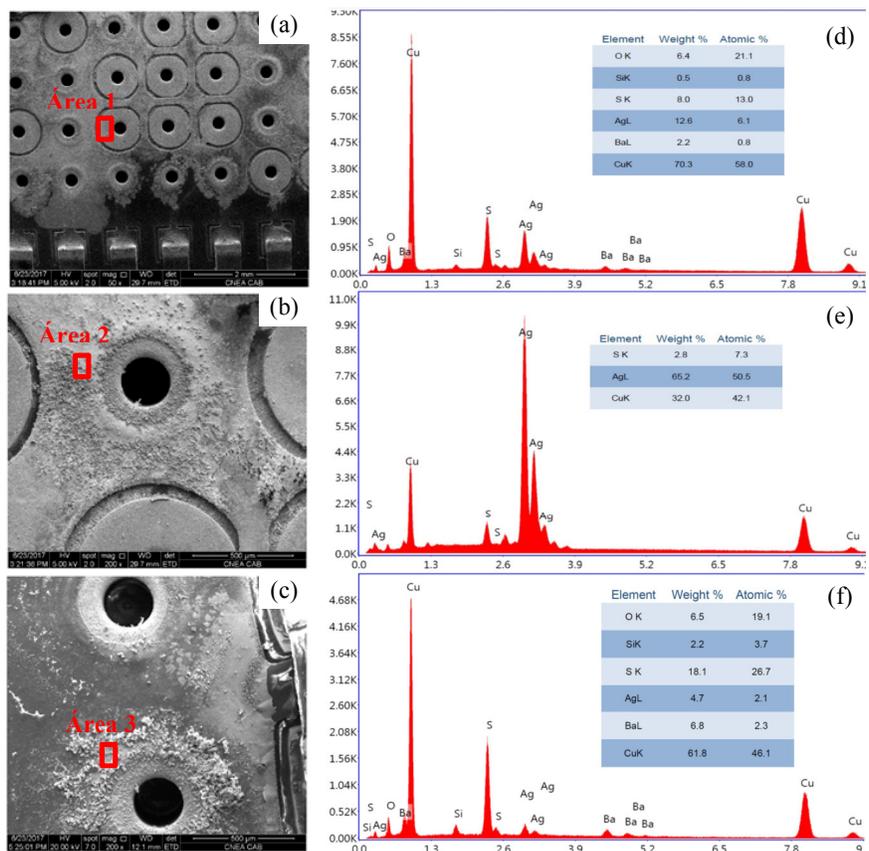


Fig. 2. (a)-(c) Imágenes de SEM de las zonas analizadas y áreas específicas donde se realizó la espectroscopía EDX (d)-(f), con las respectivas concentraciones de elementos.

Como conclusión del trabajo de inspección se considera que la causa del proceso corrosivo en principio no se deben a fallas de diseño o fabricación del PCB, sino en gran medida a las condiciones ambientales a las que las placas han sido expuestas dentro de los *shelters* de comunicaciones. A su vez, considerando el comportamiento

8

de la corrosión observado, que logró sobrepasar el espaciado entre los *pads*, PTHs y la máscara antisoldante, puede inferirse que se debió a la presencia de vapor de agua condensado sobre la superficie de la placa.

3 Definición de la arquitectura de la plataforma y especificaciones técnicas

En la Figura 3 puede observarse un esquema general de la arquitectura propuesta en donde puede destacarse que la plataforma se comunicará con el usuario mediante el protocolo TCP/IP sobre Ethernet, de manera de tener acceso en tiempo real tanto a la información recolectada por los sensores como la propia plataforma para su configuración y control. Se dispondrá de una unidad de procesamiento central, basada en un sistema embebido, que disponga de los periféricos necesarios para dar soporte a un número adecuado de entradas y salidas, requerido para controlar y comunicar los sensores necesarios para la caracterización del ambiente.

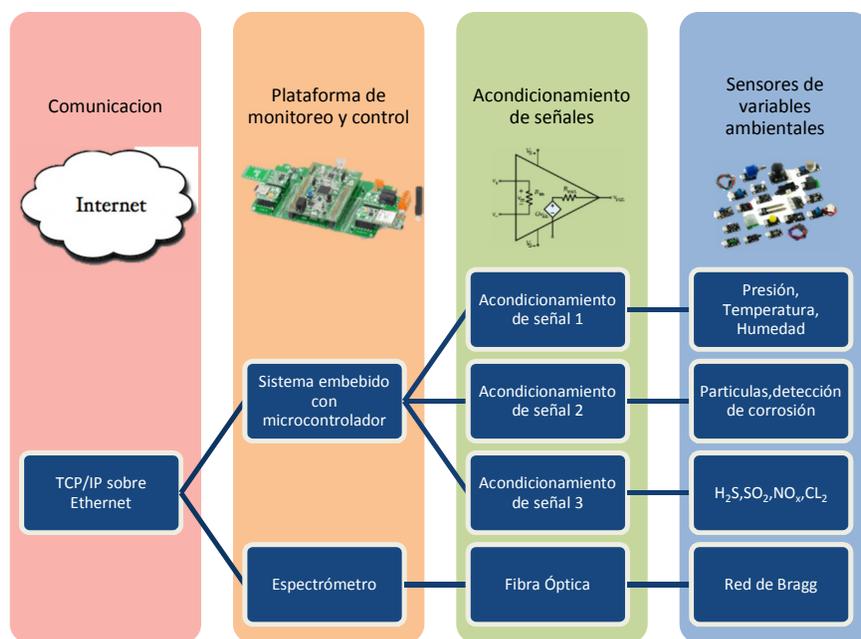


Fig. 3. Esquema de la plataforma de monitoreo incluyendo etapas, bloques, componentes y sensores.

Se consideraron tres grupos de sensores: en primer lugar, aquellos sensores de variables climáticas como la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica; en segundo lugar, se consideraron los sensores de partículas ambientales aerotranspor-

tadas; y en tercer lugar, se consideraron los sensores para la detección de determinados gases. Cada una de estas variables y mediciones obtenidas de los sensores, puede utilizarse para definir la característica del ambiente donde opera el equipamiento de telecomunicaciones, y por ende, el grado de corrosividad del mismo.

Finalmente, para disponer de redundancia en el sensado de algunas variables se consideró la implementación de un sistema de monitoreo utilizando tecnología fotónica basada en fibra óptica y redes de Bragg grabadas en fibra [9,10].

3.1 Especificaciones técnicas de la estación de monitoreo

La estación debe ser capaz de monitorear las variables ambientales como temperatura, presión, humedad, partículas de polvo y calidad de aire que hay dentro del recinto donde se ubique la misma. Debe poseer una pantalla (*display*) para la visualización de las variables medidas *in situ*, como así también la capacidad de monitorear las mismas accediendo a un servidor mediante una conexión a Internet. Además, la estación debe registrar localmente las variables ambientales medidas para su posterior análisis. Incluir un módulo de reloj de tiempo real para almacenar las fechas de los registros y un sistema de almacenamiento de información en formato de tarjeta de memoria micro SD. Finalmente, contar con un conector con entradas/salidas digitales y analógicas adicionales para futuras ampliaciones de la estación.

En base a los requerimientos se adoptaron los siguientes componentes (Tabla 1):

Tabla 1. Componentes y características.

SUBSISTEMA	CARACTERÍSTICAS
Microprocesador	El STM32F0DISCOVERY es un kit de desarrollo de bajo costo y fácil de usar para iniciar rápidamente el desarrollo de un proyecto basado en el microcontrolador de la serie STM32 CORTEX M0 (modelo STM32F051R8T6).
Periféricos	ADC de 12-bit (hasta 16 canales); 11 Temporizadores; Calendario RTC (real time clock); Interfaces de comunicación (dos I2C, dos USART, dos SPIs); Reloj en tiempo real y Módulo μ SD; Módulo Ethernet (ENC28J60); Display LCD.
Sensor de Temperatura y Humedad	Modelo: DHT22. Rango de operación: Humedad 0~100% HR y Temperatura 40~80°C. Precisión Humedad $\pm 2\%$ HR (máx $\pm 5\%$ HR) y Temperatura $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
Sensor de Temperatura, Humedad y Presión	Modelo: Bosch BME280. <i>Sensor de Humedad:</i> Rango de operación: 0...100 % HR. Tolerancia: $\pm 3\%$ HR. Resolución: 0,008 %HR. <i>Sensor de presión:</i> Rango de operación: 300...1100 hPa. Precisión en presión absoluta / relativa $\pm 1,0$ hPa / $\pm 0,12$ hPa. Resolución de presión en los datos de salida 0,18 Pa. <i>Sensor de Temperatura:</i> Rango de operación: -40...+85 °C Precisión en temperatura absoluta: ± 1 °C. Resolución de salida 0,01 °C.
Sensor de Calidad	Modelo: TP-401A. Gases detectados: Humo de producción secun-

10

de Aire	daria, humo generado por quema de madera y papel, volátiles de vino (alcohol) y cosméticos, amoníaco, sulfuro de hidrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, propano, metano, estireno, propilenglicol, fenol, acetona, diluyente, insecticida, fluido de corrección, benceno, formaldehído, otros. Respuesta a 20 ppm de CO a 25°C da variación de tensión de 0,25 ~0,6 V.
Sensor de partículas de polvo	Modelo: Sharp GP2Y1010AU0F. Sensibilidad típica: 0,5 V/(0,1mg/m3).

4 Resultados experimentales

La plataforma desarrollada puede verse en la Figura 4, donde cada uno de los bloques y subsistemas definidos en la Sección 3 fueron implementados.



Fig. 4. Plataforma de monitoreo construida incluyendo cada uno de los subsistemas definidos.

Una vez construida, la plataforma fue ensayada en tres ambientes diferentes de manera de verificar su desempeño en varias condiciones. Los ambientes utilizados se describen a continuación:

- **Ambiente completamente controlado:** Este ambiente corresponde a una sala limpia empleada para microfabricación. El ambiente ensayado cuenta con control tanto de temperatura y humedad relativa como de partículas, pues posee un sistema de filtrado que garantiza la cantidad de partículas por volumen de aire. La sala utilizada está catalogada Clase 10000 (es decir, posee menos de 10000 partículas/ π^3).
- **Ambiente no controlado:** Corresponde a una oficina con circulación limitada de personas, sin ningún tipo de control, y con ventilación natural a través de una ventana.
- **Ambiente parcialmente controlado:** Sala dedicada para la locación de equipamiento de redes de datos y conectividad (*routers*, *hubs*, etc), en cual se cuenta con un control de temperatura basado en un equipo de aire acondicionado. Este ambiente, puede considerarse similar al de un *shelter* de comunicaciones como el utilizado en los nodos de las redes de transporte.

La Figura 5 muestra los resultados experimentales obtenidos en cada uno de los ambientes, en los cuales se registraron durante 12000 segundos (algo más de 3 horas) las mediciones de los sensores. En la columna de la izquierda (figuras (a)-(d)), los correspondientes al ambiente completamente controlado; en la columna central (figuras (e)-(h)), los correspondientes al ambiente no controlado; y en la derecha (figuras (i)-(l)), los correspondientes al ambiente parcialmente controlado. Por otro lado, en cada una de las filas se presentan los resultados correspondientes a cada sensor: fila uno (figuras (a), (e) e (i)) muestra la temperatura y HR medida por ambos sensores DHT22 y BME280; fila dos (figuras (b), (f) y (j)), muestra la presión atmosférica medida por el sensor BME280; fila tres (figuras (c), (g) y (k)), muestra la calidad del aire medida por el sensor TP-401A; y la fila cuatro (figuras (d), (h) y (l)) muestra la concentración de partículas y polvo medida con el sensor GP2Y1010AU0F.

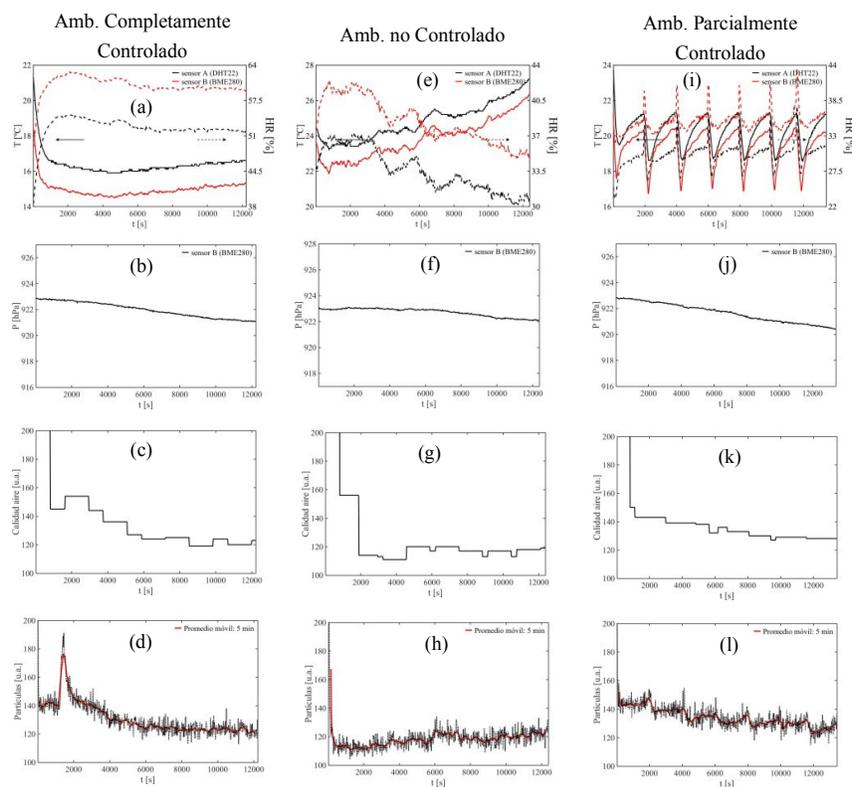


Fig. 5. Esquema de la plataforma de monitoreo incluyendo etapas, bloques, componentes y sensores.

Vale la pena mencionar que las mediciones entre los distintos ambientes no deben ser comparadas en esta instancia, dado que los sensores no fueron previamente cali-

brados. No obstante, lo que sí resulta apropiado analizar son las mediciones relativas durante el período registrado, para cada uno de los ambientes. De esta manera, con el objetivo de verificar el funcionamiento del sistema de monitoreo en un ambiente similar al de un *Shelter* utilizado en las redes de comunicaciones, se eligió el ambiente parcialmente controlado, que sólo cuenta con control de temperatura. En particular, se ubicó la plataforma en una posición próxima a un *rack* con *routers* y *hubs*, dentro de una sala de equipamiento de redes de comunicaciones que se encuentra cerrada, sin habitación o circulación de personas.

La Figura 5(i) presenta los valores registrados de temperatura (T) (línea continua) y humedad relativa (HR) (línea a trazos) que fueron obtenidos con los sensores DHT22 y BME280. Se puede apreciar el marcado cambio cíclico de la temperatura con una excursión máxima de aprox. 3°C y 3.5°C, dependiendo del sensor. Se puede identificar claramente los tiempos de encendido y apagado del sistema de refrigeración. Cuando las curvas de temperatura llegan a un máximo, se enciende el acondicionador de aire, la temperatura desciende rápidamente (~5 min.) hasta un mínimo, y luego el sistema de refrigeración detiene su funcionamiento. En ese momento, puede considerarse que aparece un incremento relativamente brusco del calor suministrado y la respuesta del ambiente (volumen de aire de la sala de equipamiento de redes de comunicaciones) es un crecimiento de la temperatura siguiendo una curva exponencial durante alrededor de 30 min.; cuando se alcanza nuevamente el máximo de temperatura el ciclo vuelve a comenzar. Es importante resaltar que, en el inicio del encendido del equipo acondicionador de aire, si bien la temperatura empieza a descender, se produce un incremento abrupto de la humedad relativa de $\Delta HR \sim 4.5\%$. Este hecho, debe tenerse presente pues en ambientes en los que la humedad relativa posee valores cercanos al 50%, un incremento de dicha magnitud propicia la generación de ambientes que favorecen los procesos de corrosión. La Figura 5(j) presenta el valor de presión atmosférica registrado, el cual disminuye de 923 a 921 hPa en las tres horas que se registraron las mediciones. En las Figura 5(k) y (l) se muestran el estado del aire registrado por el sensor de presencia de gases TP-401A, y la concentración de partículas registrado mediante el sensor GP2Y1010AU0F, respectivamente. Puede determinarse de ambos sensores que una vez superado el tiempo de establecimiento del sensor, las mediciones tienden a valores que representan cualitativamente una calidad del aire buena, como es de esperarse en la sala de equipos comunicaciones como la monitoreada. No obstante, si se filtra (promedia) apropiadamente los valores registrados por el sensor de partículas se puede apreciar cierta cadencia similar a la que presenta la temperatura.

Con el fin de investigar el comportamiento mencionado anteriormente, en la Figura 6 se muestran la temperatura y el conteo de partículas promediado. Se puede observar que la variación periódica de ambas variables posee cierta coincidencia. Si bien, la cantidad de partículas disminuye, en promedio a lo largo de todo el registro, cuando se enciende el sistema de refrigeración se aprecia una disminución abrupta del conteo de partículas, mientras que cuando el equipo acondicionador de aire se detiene, se observa un crecimiento leve que acompaña al crecimiento de la temperatura. Este efecto se debe a que los equipos de comunicaciones que se encuentran dentro del *rack* frente al cual se ubicó la estación de monitoreo, poseen sistemas de ventilación forza-

da para propiciar la convección del calor generado por los mismos y así reducir la temperatura de los circuitos integrados presentes en sus placas. En esta forma, cuando el sistema de refrigeración reduce la temperatura ambiente, los sistemas de ventilación forzada de los equipos de comunicaciones reducen su velocidad, de manera que se reduce la circulación de partículas. A partir de este hecho queda clara la necesidad de tener sistemas de refrigeración con un control más continuo y con una histéresis reducida de forma de minimizar los cambios abruptos de temperatura, y como consecuencia de la humedad relativa. Además, queda en evidencia que esto repercute en el funcionamiento de los sistemas de ventilación forzada que poseen típicamente los equipos de comunicaciones, y en la circulación de partículas en suspensión que pueden favorecer los procesos corrosivos.

De esta manera, se pudo demostrar el funcionamiento del prototipo de la estación de monitoreo remoto en diferentes ambientes de trabajo.

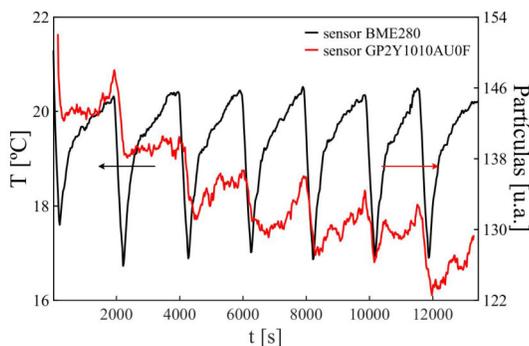


Fig. 6. Comparación del comportamiento de la medición de temperatura y de la concentración de partículas medidas por los sensores BME280 y GP2Y1010AU0F, respectivamente.

5 Conclusiones

A partir del marco teórico y la motivación del trabajo, se plantearon las especificaciones técnicas y requerimientos de la estación de monitoreo remoto. Inicialmente, se desarrolló un prototipo de la estación de monitoreo basado en sensores comerciales, y luego, se comenzó con el estudio y desarrollo de nuevos sensores basados en tecnología electrónica y fotónica, con capacidad de fabricarse en el laboratorio.

La estación de monitoreo desarrollada y fabricada cuenta con los siguientes subsistemas: Unidad de control, Periféricos, y Sensores (temperatura, humedad, presión atmosférica, calidad del aire y concentración de partículas).

Se llevaron a cabo ensayos de monitoreo de variables ambientales en tres escenarios característicos con el fin de verificar el funcionamiento de la plataforma, además de contrastar y depurar la operación de la misma. Los ensayos se realizaron en un Ambiente completamente controlado (sala limpia clase 10000), Ambiente no controlado (oficina de trabajo con computadoras y limitada circulación de personas) y Ambiente parcialmente controlado (sala de equipamiento de redes de comunicaciones).

cerrada y sin circulación de personal, que cuenta con un sistema acondicionador de la temperatura de aire, el cual posee muchas similitudes con un *shelter* de comunicaciones).

Los resultados obtenidos fueron muy alentadores dado que en 6 meses se desarrolló y validó en el laboratorio un prototipo de la plataforma. También fue posible investigar y desarrollar tecnología de sensores electrónicos, basados en circuitos de microtira, y fotónicos, basados en fibra óptica y redes de Bragg, los cuales resultan ser potencialmente muy importantes de cara al futuro, considerando la plataforma con la incorporación de tecnología nacional.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Paula Troyón para la obtención de imágenes SEM en la CNEA y la constante asistencia de Cintia Callamullo de la Fundación Sadosky para la ejecución del proyecto.

References

1. Winzer P. J., Neilson D.T., and Chraplyvy A.R.: "Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [Invited]," *Opt. Express* 26, 24190-24239 (2018).
2. Gerstel O., Jinno M.: *Optical Fiber Telecommunications VIB: Chapter 14. Elastic Optical Networking*, Edited by Kaminow I., Li T., and Willner A, 6th edn. Academic Press (2013).
3. Directive 2002/95/EC (RoHS 1), Directive 2011/65/EU (RoHS 2) and 2015/863 (RoHS 2 amendment), of the European Parliament and of the Council. [Eur-lex.europa.eu](http://eur-lex.europa.eu).
4. <https://www.arsat.com.ar/red-federal-de-fibra-optica>
5. ANSI/ISA-71.04-2013 Environmental Conditions for Process Measurement and Control Systems: Airborne Contaminants.
6. <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/2016/10/13/la-corrosion-de-los-metales/>
7. Sebastián Feliu Matas; María del Carmen Andrade, *Corrosión y protección metálicas*, Consejo S. Investig. Científicas, 2011. ISBN-10: 8400071409.
8. Joseph Goldstein (Editor), *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: 3rd Edition*, Springer (2003).
9. Fernández M.P., Bulus Rossini L.A., Cruz J.L., Andrés M.V., Costanzo Caso P.A.: "High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters" *Optics Express* 27 (25), 36815-36823 (2019).
10. S. J. Mihailov: "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments", *Sensors* 12, 1898-1918 (2012).