

SISTEMA DE REGISTRO PARA PEQUEÑOS AEROGENERADORES: ASPECTOS TÉCNICOS DEL FIRMWARE Y VINCULACIÓN A INTERNET

Rafael Oliva⁽¹⁾, José F. Gonzalez⁽²⁾, Nestor Cortez⁽¹⁾, Jorge Lescano⁽¹⁾, Patricio Triñanes⁽¹⁾,
Sergio Cabrera⁽²⁾, Néstor Garzón⁽²⁾

Área Energías Alternativas (AEA)

Universidad Nacional de la Patagonia Austral – Instituto de Tecnología Aplicada - Unidad
Académica Río Gallegos⁽¹⁾, Unidad Académica San Julián⁽²⁾

<https://www.energiasalternativas-unpa.net> (54) (2966) 438151 / 442238.

e-mail roliva@uarg.unpa.edu.ar

RESUMEN: Se presentan en el presente trabajo los principios de funcionamiento, aspectos técnicos internos y modificaciones requeridas para acceso vía internet de un sistema de registro para Pequeñas Turbinas Eólicas (PTEs) y sistemas que además incorporan fuentes fotovoltaicas y backup térmico o de red. El sistema base ha estado en operación desde 2015 en conexión con el suministro eléctrico para un invernadero educativo, en zona periurbana de Puerto San Julián. Si bien se han publicado sus resultados y mediciones, no se había mostrado su estructura interna. La presente propuesta avanza sobre estos aspectos haciendo foco en la posible replicabilidad de este tipo de sistemas para aplicaciones similares. A tal efecto se presentan además de los componentes del hardware los trabajos de “*refactoring*” y modularización que permiten mejorar la mantenibilidad del programa residente o *firmware*, así como el agregado de un módulo externo que permite combinar la configuración tradicional por puerto serie cableado con una interfaz inalámbrica. Esto permite construir una interfaz más amigable para el usuario y reducir el tiempo de aprendizaje para los operadores. El crecimiento de la disponibilidad de conexiones confiables a internet y dispositivos con WiFi incluso en entornos rurales o periurbanos hace relevante el agregado de este tipo de capacidades a sistemas existentes. Las modificaciones responden a una arquitectura particular pero el concepto sin embargo es aplicable a un número importante de sistemas similares en la zona patagónica austral.

Palabras clave: energía eólica, sistemas de medición y registro, pequeñas turbinas eólicas, firmware de sistemas embebidos.

INTRODUCCIÓN

Es reconocido el recurso eólico en la región Patagónica Austral, en la que se dan simultáneamente condiciones climáticas severas y zonas extensas sin electrificar. Ha habido un notorio crecimiento (CMMESA, 2022) de proyectos de alta potencia (aerogeneradores en red) a la vez que se ha regulado legalmente la generación distribuida con energías renovables (Ley 27424, 2018) y expandido para el suministro eléctrico en sitios aislados. Sobre todo, para estos últimos la provisión de eléctrica reviste una importancia creciente desde los puntos de vista demográfico, social y geopolítico y se recurre habitualmente a sistemas híbridos. Los mismos suelen integrar pequeñas turbinas eólicas (PTEs) con equipos fotovoltaicos y generadores térmicos o conexión a redes aisladas en potencias nominales que raramente exceden la decena de kW.

Puerto San Julián es una región privilegiada que abarca un corredor de fuertes vientos con densidad de potencia superior a los 2000 W/m² a 50m de altura, ya identificado a partir de 1986 por el Dr. Vicente Barros en su Atlas Eólico del Sur Argentino (Barros, 1986). Se han presentado trabajos comparativos (González et al., 2016) entre relevamientos del recurso eólico a gran altura para equipos en conexión a red, y compendios de mediciones a altura reducida realizados con el equipamiento SISMED/24SJ objeto del presente trabajo. Asimismo, se ha buscado el constante mejoramiento de las PTEs de fabricación local a través de iniciativas como las del INTI en su campo de pruebas de Cutral-Có, Neuquén (Zappa et al., 2013), que, según (Oliva, 2012), utilizan variantes específicas del equipo mencionado. Los resultados han permitido adquirir una importante experiencia y caudal de datos sobre equipos operando en la zona. El conocimiento del régimen climático, la confiabilidad de los sistemas de medición y un adecuado tratamiento estadístico de los registros eléctricos y ambientales resultan de suma importancia para dimensionar adecuadamente estos sistemas en la zona. El agregado de accesibilidad remota vía Internet facilita asimismo las tareas de mantenimiento de los equipos.

El sistema eólico de baja potencia (Eolux, 1kW y 24 V) se instaló en junio de 2013 en la Chacra educativa UNPA-UASJ y posteriormente un refugio, el cableado y sensores para el sistema de medición SISMED/SJ24 asociado. En el mes de noviembre de 2014 se concluyó con la obra del refugio y la construcción del galpón donde va instalado el banco de baterías, el inversor y el sistema de medición y a fines de ese año se concluyó la puesta en servicio de dicho sistema eólico. (Figuras 1 y 2)



Figura 1: Instalación del boom con sensores de viento instalados e invernadero UNPA de fondo



Figura 2: SISMED/SJ24 y tablero instalados 11-2014 con sensores, Inversor QMax y rectificador

El sistema de medición SISMED/SJ24 fue desarrollado por el Área Energías Alternativas (AEA, 2016) y L&R Ingeniería (LyR, 2016), y cuenta con un módulo externo METEO para registros ambientales (METEO, 2022), cuyos sensores permiten medir velocidad y dirección de viento, y temperatura exterior. Dicho módulo se ubica al pie de la torre (Figura 4, der.) y se comunica a través de una interfaz RS485 con el módulo central del SISMED/SJ24. Los muestreos se realizan cada 1 segundo, y los promedios de 1 minuto de viento, temperatura, potencia y tensión de banco son almacenados en una tarjeta SD en formato .CSV, legible a través de planillas de cálculo. El banco de baterías original de 24 V / 200 Ah presentó fallas tempranas y debió ser reemplazado por uno más

robusto (4 x Trojan L-390 de 6V, 390 Ah – Figura 3 / izq.) en 2017, y se agregaron componentes adicionales detallados más adelante. En (González et al., 2016) se mostraron registros de viento que, extrapolados a mayor altura, resultaron concordantes con los de la estación NRG (NRG Systems, 2022) de 60m de altura instalada a 8 km de distancia, y se registraron corrientes del aerogenerador que llegaron a superar los 36 A en algunos casos, por lo cual también en el reemplazo del banco de baterías se seleccionaron elementos de mayor capacidad. Posteriormente, se realizó una actualización del firmware del SISMED_SJ24 para soportar medida y estadísticas de RPM, y tensión / corriente de línea (Vac, Iac RMS) producida por el Inversor QMax instalado. En 2017 se agregó también un banco de paneles fotovoltaicos de 200 Wp que contribuyen a sostener la carga del banco de baterías, y se sustituyó el regulador original por uno de mayor corriente tipo Tristar TS-60 (Figura 5). Para las situaciones de emergencia invernal o falla de algún componente, se agregó en 2018 un cargador Enertik de 24 V / 15 A que puede operar desde la red de 220 VCA. Un diagrama eléctrico completo del sistema con indicación de sus componentes puede verse en la Figura 5.

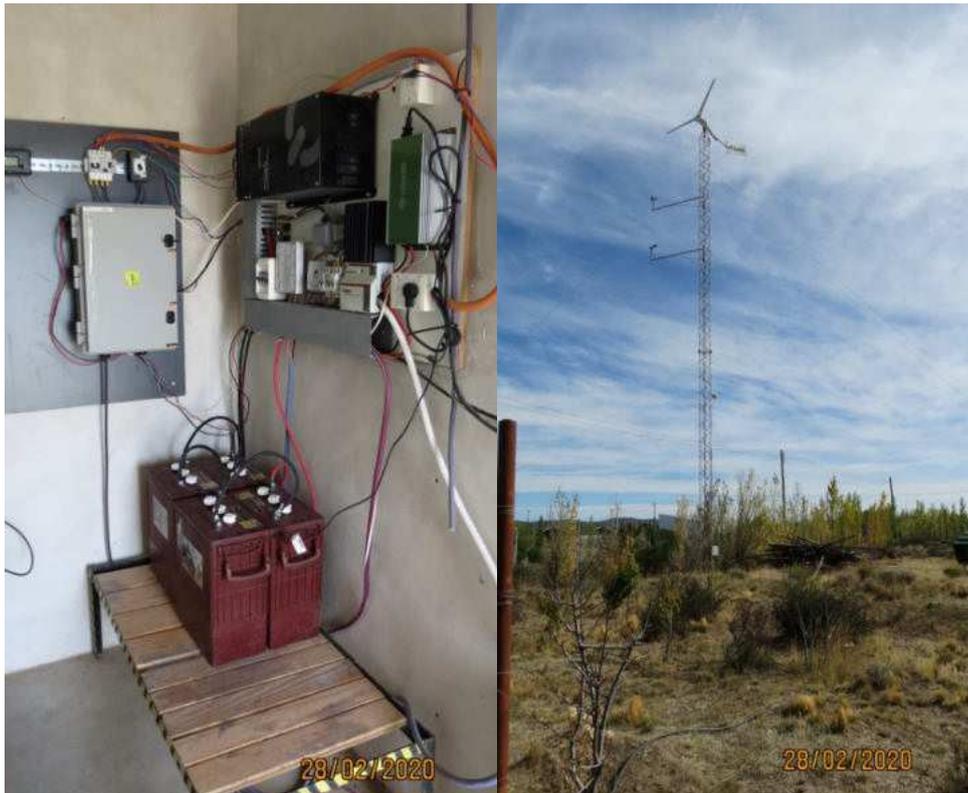


Figura 3: (izq) Nuevo banco de baterías, regulador y cargador, (der) control del funcionamiento de aerogenerador y sensores ambientales en 2020.



Figura 4: (izq) Banco de paneles solares (200 Wp) agregado en 2017 y control del módulo METEO externo en instalación inicial del sistema de medición.



Figura 5: Detalle del regulador solar Solartec, módulo de medición VIN_IAE, regulador Tristar TS60 (en configuración desvío de carga) y cargador de emergencia EnerTik 15A.

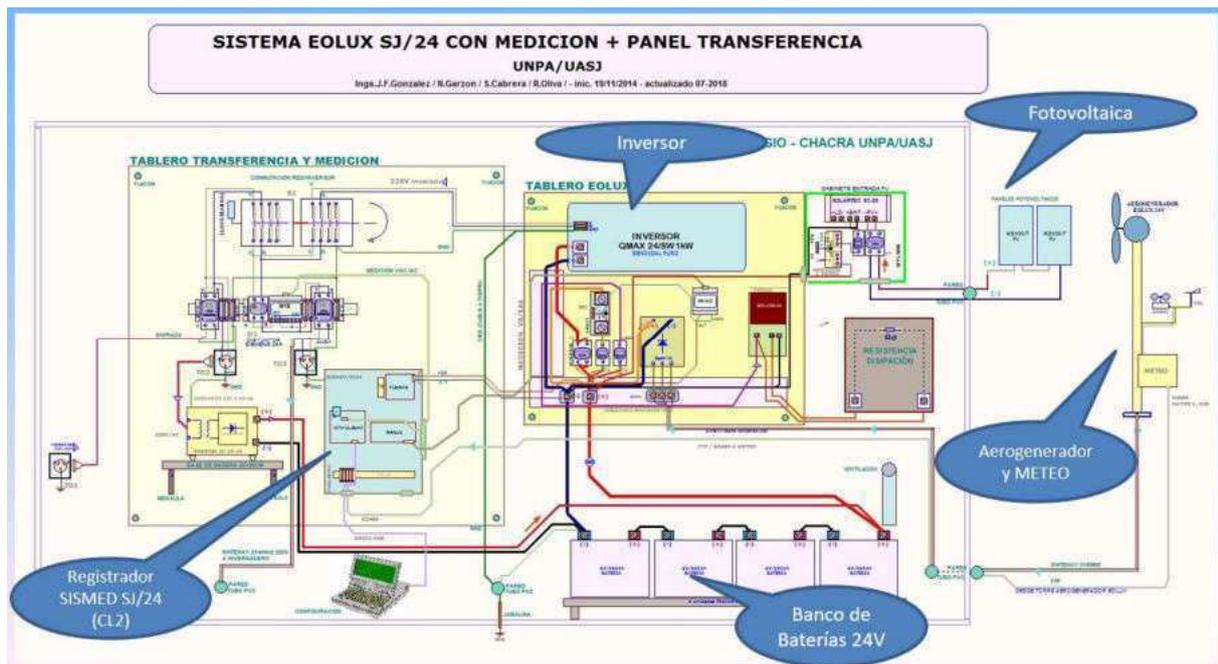


Figura 6: Diagrama eléctrico del Sistema SJ/24 con sus componentes, incluyendo el registrador SISMED/SJ24.

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Objetivos del trabajo: Se ha buscado presentar las características internas del equipo SISMED/SJ24 como una forma de hacer accesible y replicable el concepto inicial presentado en (Oliva, 2012) que sólo había sido descrito a grandes rasgos en trabajos anteriores. Esto requiere por un lado la presentación de la base de hardware y módulos necesarios para la operación del equipo. Por otro lado, aunque el firmware original cumplía los requerimientos operativos, el estudio de buenas prácticas y estado del arte llevaron a revisar sus limitaciones iniciales en cuanto a mantenibilidad y modularidad, algo especialmente necesario cuando se busca exponer una herramienta que pueda ser útil a las actividades de otros grupos de investigación. Finalmente, el reconocimiento de la dificultad en la curva de aprendizaje para los operadores de los sistemas instalados y el aspecto a veces críptico de la interfaz vía terminal, junto con la reciente disponibilidad a bajo costo de módulos que no sólo permitían una conexión clásica (modo *Station*) a una red local WiFi basada en un router inalámbrico con vinculación a Internet, sino en caso de necesidad actuar como router autónomo (modo *Soft Access Point*), estableciendo una vinculación directa con el usuario a través de un navegador o *browser* convencional, hicieron que se desarrollara la denominada Interfaz Web para el SISMED/SJ24.

Metodología: El desarrollo del trabajo propone inicialmente una división de su estructura en bloques a nivel sistema, en el cual se discuten los **aspectos internos** con énfasis en el hardware y referencias a los módulos requeridos y los links a sus diagramas detallados (esquemáticos). En esta parte, dada la fuerte integración entre los elementos físicos y el *firmware* hay alguna superposición entre ambos, por ejemplo cuando se discute la incorporación de un módulo *bootloader* que facilita justamente las actualizaciones de dicho software residente. Además, debido a que las mejoras fueron incrementales a lo largo de los años se muestran los agregados como una secuencia cronológica. En una segunda parte dedicada al **diagrama, distribución del software y refactorizado** se describe la estructura inicial del firmware que corre sobre la placa CL2bm1 (Oliva, 2022), su operatividad mayormente ininterrumpida a lo largo de los años pero también las falencias y faltas de adhesión a buenas prácticas que llevaron a su reestructuración. Dada la gran flexibilidad del lenguaje C utilizado para la construcción del firmware, la evolución de los estándares que lo rigen (C-WG14, 2022) y la permanente búsqueda de mayor confiabilidad en los sistemas embebidos de acuerdo a cada aplicación, la industria ha ido construyendo una serie de buenas prácticas. Con ese objetivo se han hecho públicos un resumen de reglas internas de codificación en C (IHCR, 2022) basado en múltiples referencias, y un conjunto de ejemplos de programación sobre la placa CL2bm1 que adhieren a dichas reglas. Por último, se describe en una tercera parte el **agregado de software para acceso WiFi** que busca mejorar la interfaz con el usuario y mejorar la curva de aprendizaje requerida para los operadores, además de facilitar el diagnóstico y accesibilidad remota de los datos.

ASPECTOS INTERNOS DEL SISTEMA REGISTRADOR

Diagramas del sistema: El equipo SISMED/SJ24 al momento de su instalación tenía una estructura de bloques como se muestra en la Figura 7. La unidad central de procesamiento es la placa CL2bm1 (Oliva, 2022) cuyas características, diagrama esquemático y ejemplos de programación están disponibles en (CL2bm1 CPU Board, 2022).

A la unidad METEEO original se le agregó posteriormente un canal de temperatura externa, a través de un sensor NRG 110S. Asimismo, la implementación mostrada no contaba en ese momento con el módulo fotovoltaico cuya corriente (hasta un máximo de 20 A) ingresa por un canal adicional del módulo M4/E (M4-E, 2016). Este último agregado se indica como (1) en la Figura 8.

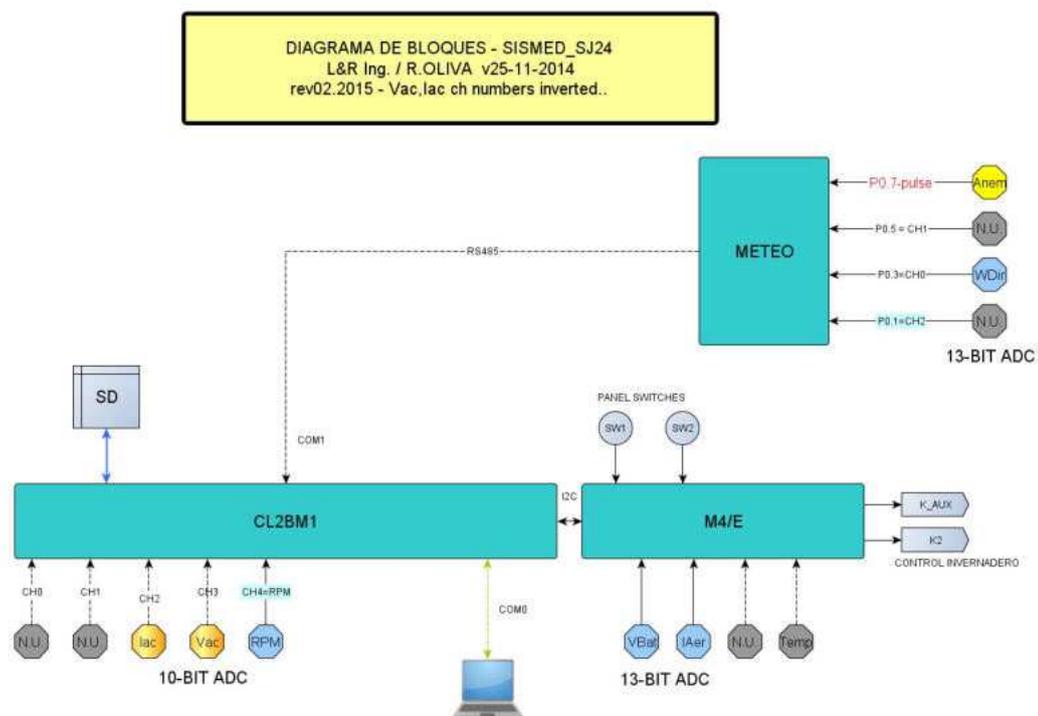


Figura 7: Estructura original de señales en SISMED/SJ24

Desde el punto de vista de las conexiones al módulo principal, el sistema original tenía la distribución indicada en la Figura 8, en la que se han agregado elementos más recientes señalados como (1) sensor de corriente Fotovoltaica, (2) Programa Bootloader y (3) módulo ESP-Conv1 para WiFi. Se aprecia que las señales de distintas fuentes de señal requieren módulos especiales. En la Figura 5 se observa (caja DIN color gris) el módulo VIN_IAE que contiene divisores resistivos de precisión (0.1%) y una interfaz a los sensores Allegro ACS75x. En el caso de SISMED/SJ24 se trata de una unidad ACS755U-050 de 50 A de tipo unidireccional (Allegro, 2022).

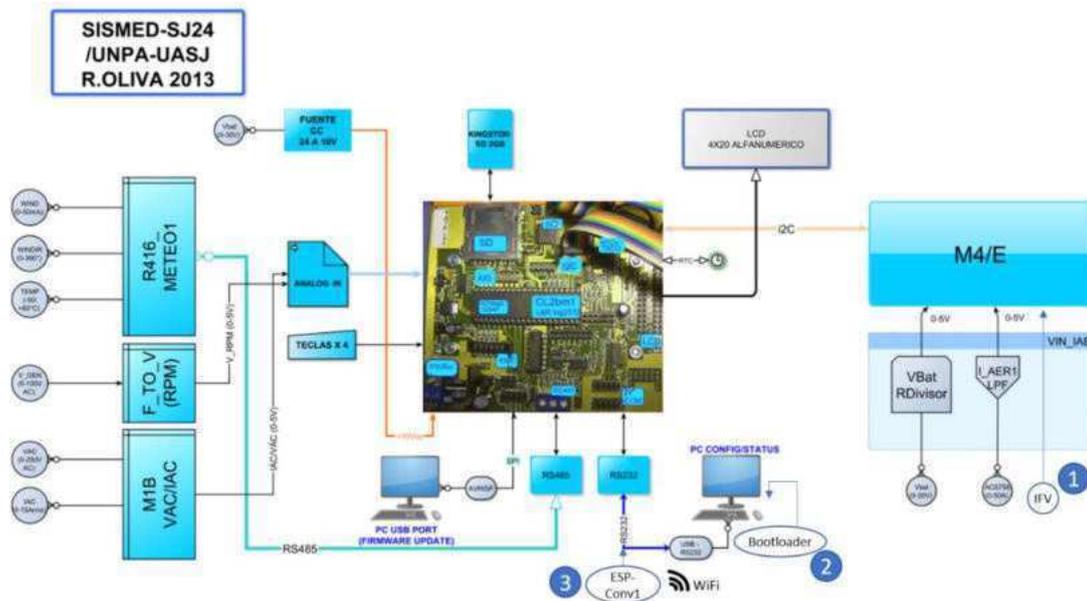


Figura 8: Bloques de conexión en SISMED/SJ24

Para la conversión de RPM a partir de la salida de dos de las tres fases del generador de imán permanente de la PTE a una señal analógica de 0 a 3.5 V (V_RPM) se utiliza un módulo f2V (F_TO_V) de L&R Ing, que incorpora internamente un transformador para lograr una aislación galvánica adecuada. Algo similar ocurre con el módulo M1-B que proporciona aislación galvánica interna utilizando sensores LEM y Allegro para medir tensión y corriente RMS de salida (VAC, IAC) del inversor QMax Senoidal de 1 kW. Finalmente, el módulo (2) *Bootloader* en la Figura 9 es un componente del firmware que se aloja en un sector especial de la memoria flash del Microcontrolador (en el caso de la unidad CL2b es un ATmega1284P), que es leída en el momento del arranque y permite, con el código adecuado y una conexión serial activa a una PC corriendo un programa compatible, actualizar el firmware completo del microcontrolador. Dicho componente, agregado en 2021 es un módulo en lenguaje C de código abierto conocido como Optiboot, y trabaja del lado PC con un programa también abierto denominado Avrdude.



Figura 9: Ensayos luego de la incorporación del Bootloader al SISMED/SJ24 en 2021 (sin sensor de voltaje conectado). Debajo del panel a la izquierda se aprecia la placa CL2, a la derecha la M4/E.

DIAGRAMA, DISTRIBUCIÓN DEL SOFTWARE Y TAREAS DE REFACTORIZADO

El software interno o firmware del equipo SISMED/SJ24 ha ido teniendo múltiples modificaciones desde su primera versión en 2013. En la Figura 10 se puede observar un diagrama de componentes de dicho firmware y en la Figura 11 su diagrama de flujo, ambas en sus versiones iniciales.

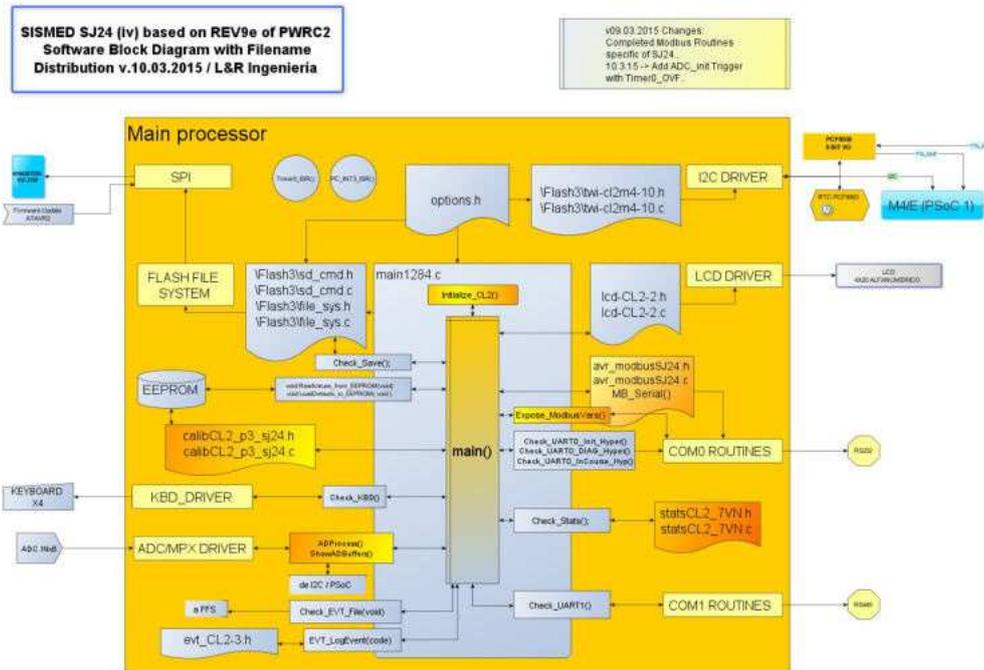


Figura 10: Firmware del SISMED/SJ24 y componentes principales – rev. 2015.

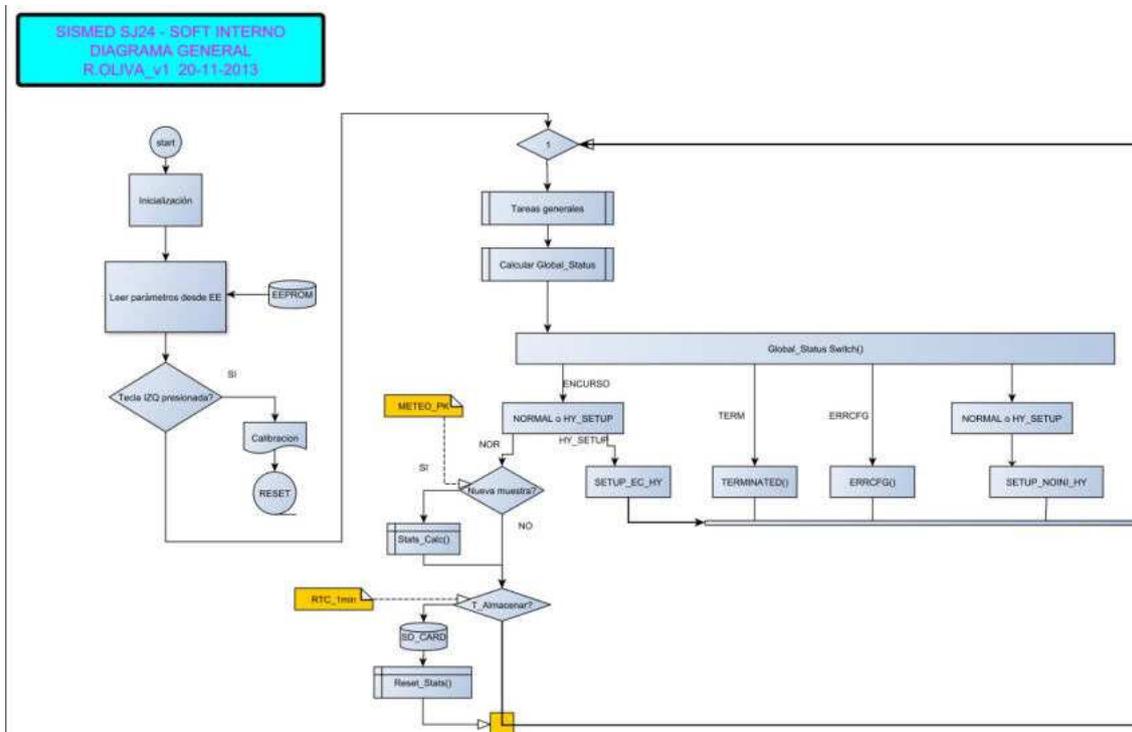


Figura 11: Diagrama de flujo del Firmware del SISMED/SJ24

Si bien el aspecto de la Figura 10 da una idea de modularidad, y su funcionamiento fue altamente confiable a lo largo de casi 7 años, existían grandes falencias en lo relativo al exceso de variables globales, la separación de archivos de acuerdo a funcionalidad y la sobrecarga del archivo principal del código fuente. Esto hacía enormemente dificultoso el mantenimiento del firmware y el agregado

de nuevos componentes. Una idea de los problemas hallados se aprecia en la Figura 12, en que se analizaba durante 2021 la modificación de las rutinas de los conversores A/D del sistema.

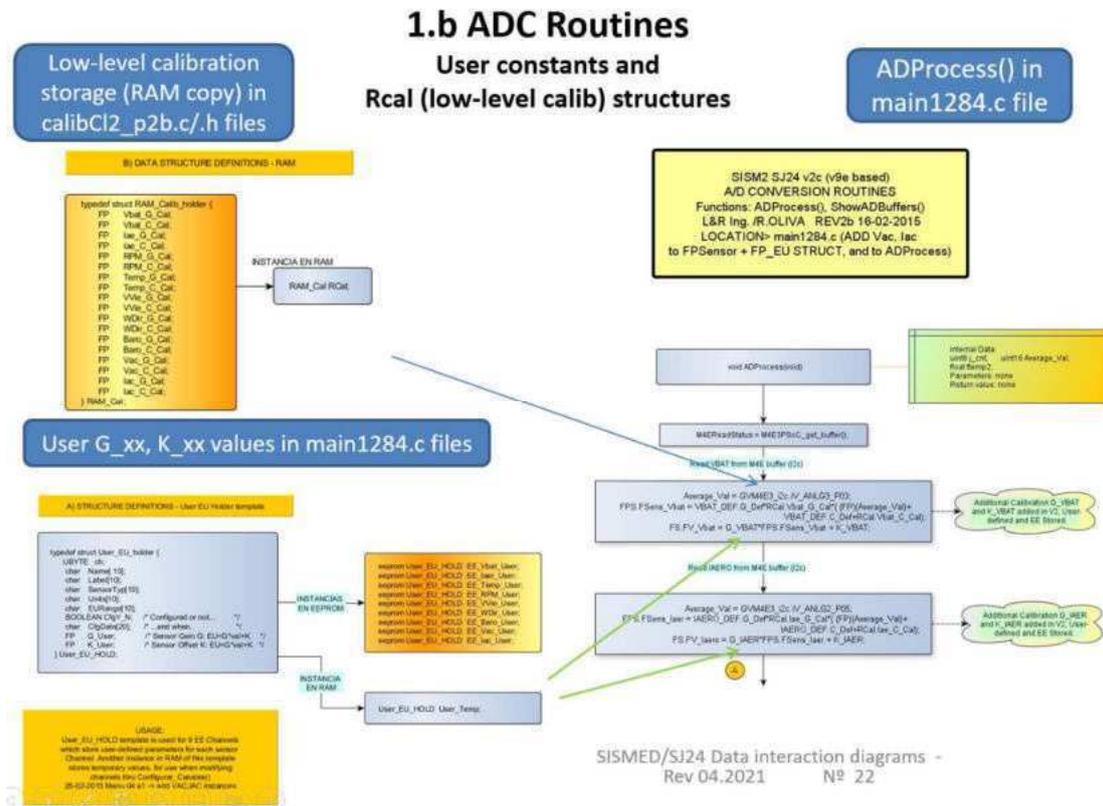


Figura 12: Análisis de las rutinas ADC en el Firmware del SISMED/SJ24, revisión 2021.

En dicha figura las rutinas de calibración de bajo nivel residen en los módulos calibCL2p2b.c/.h mientras que las variables para las constantes de calibración (User G_xx, K_xx) y la rutina ADProcess() residía en el archivo principal main1284.c que contenía igualmente partes dispersas de múltiples componentes del firmware. Por tanto, se requirió una reescritura o “refactoring” de la estructura de módulos y la aplicación de una serie de normas internas en cuanto al uso de tipos normalizados y consistencia de nombres agrupadas en un documento denominado IHCR (*In-House Coding Rules*) que se ha hecho accesible en (IHCR, 2022). Los diagramas y detalles del proceso de refactoring se encuentran en actualización y disponibles en (SISMED-SJ24, 2022).

AGREGADO DE SOFTWARE PARA ACCESO WiFi

El firmware del equipo SISMED/SJ24 se encuentra como se indicó en proceso de revisión. Además de las dificultades señaladas en el punto anterior, una de las razones por las cuales se ha debido encarar esta tarea es la incorporación de un módulo ESP-Conv1 señalado como (3) en la Figura 8, y cuya funcionalidad se aprecia en la Figura 13. Se trata de un módulo que permite trabajar en forma convencional (con RS232 cableada), o vía un módulo ESP-12 (Espressif, 2022) basado en el controlador ESP8266, que integra una interfaz wi-fi y una serie de funcionalidades a un costo muy reducido. Dicho módulo permite el acceso remoto vía internet y a la vez facilita las operaciones al ofrecer una interfaz de usuario gráfica vía un navegador convencional, además de una emulación de terminal.

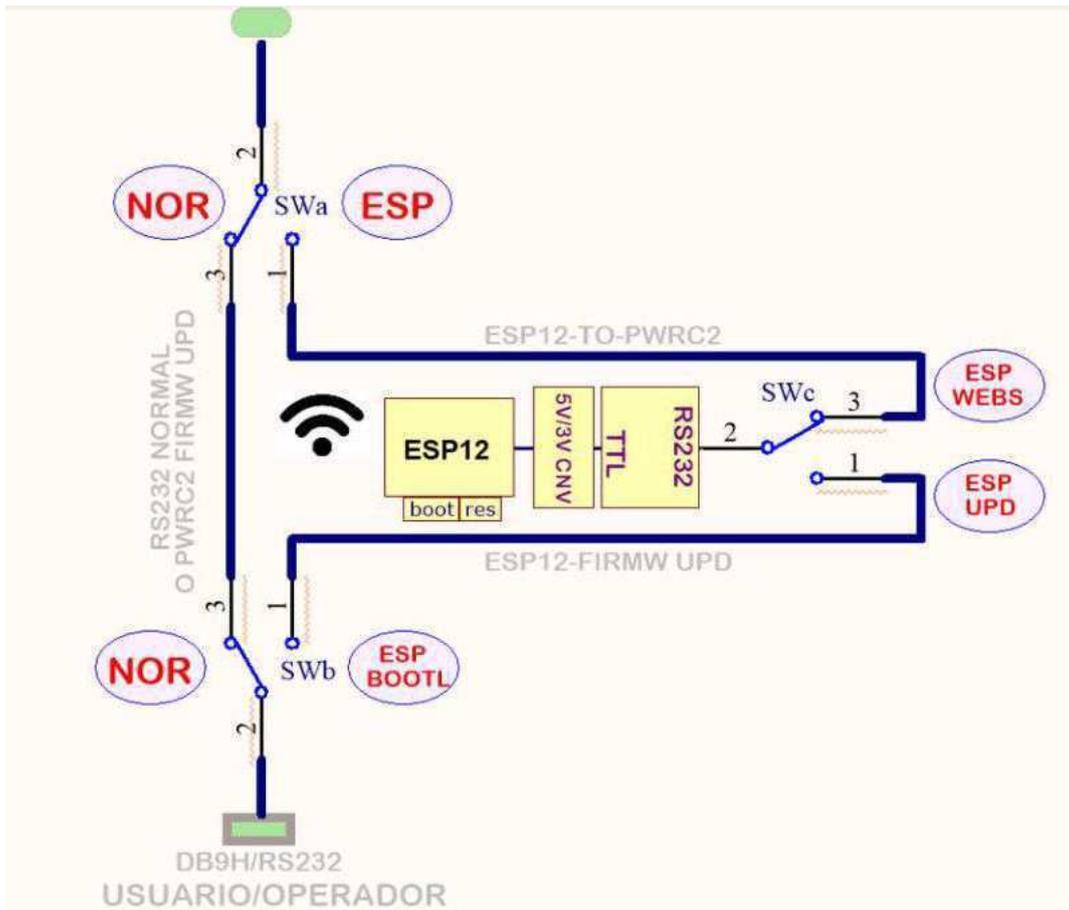


Figura 13: Funcionalidad del módulo ESP-Conv1 con 3 modos de funcionamiento: Normal, ESP-Web y ESP-Bootloader (update del software del módulo ESP).

En la Figura 14 se muestra una foto del prototipo de ESP-Conv1 en riel DIN que ya se ha implementado en equipos similares para el INTI y que se espera poder incorporar a la brevedad al SISMED/SJ24. Aunque el citado prototipo utiliza un conversor auxiliar RS485 / RS232 / TTLSerial (RS485, 2022) el modelo en preparación para el SJ24 buscará lograr un sistema más sencillo.

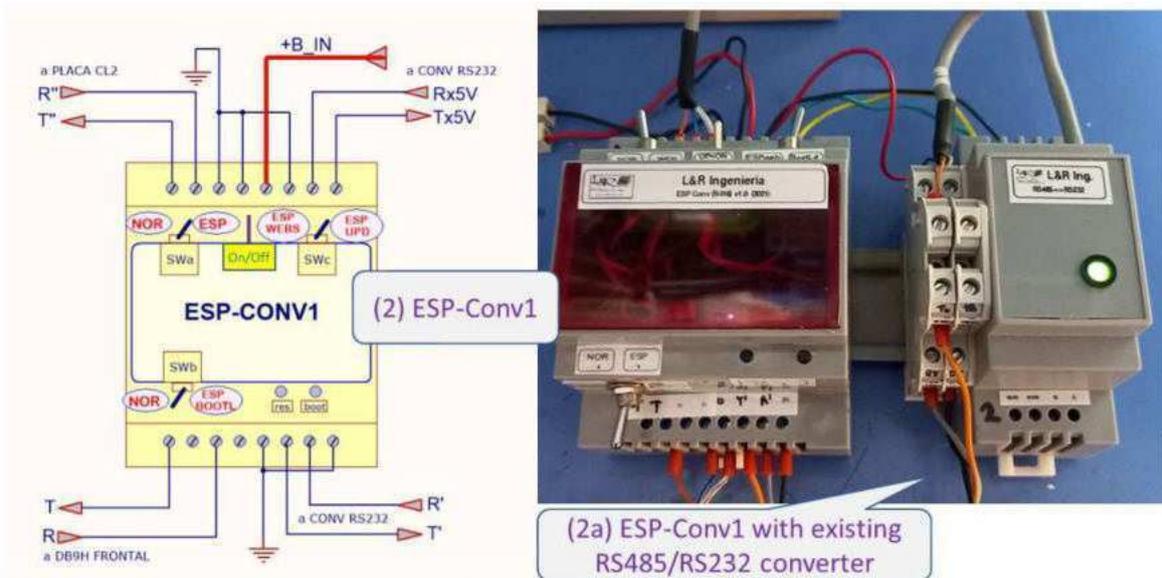


Figura 14: Vista del módulo ESP-Conv1 con la posibilidad de cambiar vía llaves accesibles al usuario los 3 modos de funcionamiento: Normal, ESP-Web y ESP-Bootloader

CONCLUSIONES

Se han podido presentar algunos aspectos relevantes de la estructura y el software interno del equipo SISMED/SJ24, la reestructuración en curso y los componentes que se encuentran en proceso de agregado para su conexión a una red Wi-Fi y a Internet. Se ha buscado hacer accesibles detalles constructivos del sistema, con vistas a su replicabilidad y/o acceso como ejemplo para sistemas similares. Estos detalles cubren aspectos estructurales, del hardware y módulos utilizados, y trabajos en curso sobre el firmware para introducir un sistema ampliable, y con mejoras en su mantenibilidad. Asimismo, se introduce una primera versión del acceso WiFi que facilita la interfaz para los operadores y habilita el acceso remoto vía Internet. Es de esperar que el conocimiento de dichos sistemas contribuya a continuar su expansión y estudio de aplicabilidad local y regional de este tipo de sistemas.

REFERENCIAS

- CAMMESA (2022) (online) <https://cammesaweb.cammesa.com/generacion-real/>
- Ley 27424 (2018) (online) <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/generacion-distribuida>
- Gonzalez J, Oliva R, Cárdenas G, Cortez N (2016) Mediciones de intensidad y dirección de viento en dos emplazamientos de Puerto San Julian, Acta de la XXXIX Reunión de ASADES Vol. 4, pp. 06.127-06.138, 2016 ISBN 978-987-29873-0-5
- Zappa A, Oliva R, Duzdevich J, Martín G. (2013) Evaluación de curva de potencia en plataforma de ensayo para aerogeneradores de baja potencia, Actas de Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente - Vol. 1, pp. 06.89-06.98, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5
- IEC61400 (2021) Wind Turbine Standards <https://webstore.ansi.org/industry/energy/wind-turbine>
- IEC61400-1 v4 (2019) Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements. International Electrotechnical Commission, Geneva, Suiza. - <https://webstore.iec.ch/publication/26423>
- IEC61400-2 (2013) Wind turbines - Part 2: Small Wind turbines. International Electrotechnical Commission - <https://webstore.iec.ch/publication/5433>
- IEC61400-12-1 (2017). Wind Turbines –Part 12-1 Power Performance Measurements of electricity producing wind turbines –Ed.2 – International Standard 61400-12-1, IEC (International Electrotechnical Commission). -<https://webstore.iec.ch/publication/26603>
- UNE-EN 61400-12-1 (2018) Aerogeneradores. Parte 12-1: Medida de la curva de potencia de aerogeneradores productores de electricidad. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060188>
- Oliva, R. (2012) Estación Meteorológica de Construcción Modular Orientada a la Prospección Eólica en Argentina, Tesis - Maestría en ER, Un. Nac. de Salta (defensa 10-2014).
- NRG Systems (2022) <https://www.nrgsystems.com/products/towers/detail/60m-xhd-talltower/>
- L&R Ingenieria (2016) <https://www.lyringenieria.com.ar>
- AEA - UNPA (2016) <https://www.energiasalternativas-unpa.net/sistemasembebidos>
- Oliva, R. (2022) "Hardware and firmware design and implementation of twin 8-bit and 32-bit microcontroller boards for research and educational applications," in IEEE Embedded Systems Letters, 2022, doi: 10.1109/LES.2022.3189877 - <https://ieeexplore.ieee.org/document/9826356>
- CL2bm1 CPU Board (2022) online: <https://github.com/LyRIng/CL2bm1>
- RS485 Modules (2022) online: <https://www.lyringenieria.com.ar/productos/rs485-brd-placa-y-o-modulo-rs-485-rs-232-ttl/>
- Espressif (2022) Módulos WiFi ESP: <https://espressif.com/en/products/modules/esp8266>
- METEO (2022) METEO Módulo Meteorológico Met. Module: <https://github.com/LyRIng/METEO>
- IHCR (2022) In-House C-Coding Rules / L&R Ing. <https://github.com/LyRIng/InHouseCCodingRules>
- C-WG14 (2022) Resumen y evolución de estándares en lenguaje C – ISO/IEC <https://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg14/www/projects>
- M4-E (2016) Módulo de E/S programable: <https://github.com/LyRIng/PlacaM4-E>
- SISMED-SJ24 (2022) Repositorio Proyecto: <https://github.com/rafaeloliva/SismedSJ24.git>
- Allegro (2022) Current Sensor ICs <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/fifty-to-two-hundred-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs758>

ABSTRACT: This work presents the internal structure, connections and the firmware evolution of a data-acquisition system specifically developed for SWT (Small Wind Turbine) and hybrid isolated systems. These hybrid units usually add photovoltaic panels and either Diesel or grid backup. The basic system has been operating since 2015, to assess the electrical supply via renewable energy of an educational greenhouse installed at a university location in Puerto San Julián (Argentina). Previous results and measurements have been published although no technical details were supplied. This proposal is coincident with the need to perform a refactoring and modularization of the firmware, to ease maintenance issues and to add wifi and internet connectivity while maintaining the traditional terminal-based cabled serial port connection. The fact that reliable and low cost internet connections are becoming widespread even in periurban or rural regions has made this addition a useful feature for an important number of similar systems in the south Patagonia region.

Keywords: wind energy, data acquisition, small wind turbines, embedded systems firmware.