

Sistema automático para ensayos de ciclo de vida de relés ferroviarios de seguridad

Adrian Laiuppa
CONICET - GICSAFe
Departamento de Electrónica
UTN-FRBB
Bahía Blanca, Argentina
alaiuppa@frbb.utn.edu.ar

Facundo Larosa
CONICET - GICSAFe
Departamento de Electrónica
UTN-FRH
Haedo, Argentina
flarosa@frh.utn.edu.ar

Sergio H. Gallina
CONICET-GICSAFe
Departamento de Electrónica
FTyCA - UNCA
Catamarca - Argentina
sgallina@tecno.unca.edu.ar

Martín Amado
CONICET - GICSAFe
Departamento de Electrónica
UTN-FRBB
Bahía Blanca, Argentina
martinamado@frbb.utn.edu.ar

Emanuel Irrazabal
CONICET - GICSAFe
Departamento de Informática
FACENA UNNE
Ciudad de Corrientes, Argentina
eirrazabal@exa.unne.edu.ar

Maria de los Angeles Gomez Lopez
CONICET - GICSAFe
Departamento de Electricidad,
Electrónica y Computación - UNT
Tucuman, Argentina
mgomezlopez@herrera.unt.edu.ar

Juan Manuel Cruz
CONICET - GICSAFe
Laboratorio Sistemas Embebidos
Facultad de Ingeniería - UBA
Buenos Aires - Argentina
lse@fi.uba.ar

Ivan Sambrana
CONICET - GICSAFe
Departamento de Informática
FACENA UNNE
Ciudad de Corrientes, Argentina
isambrana@exa.unne.edu.ar

Ariel Lutenberg
CONICET - GICSAFe
Laboratorio Sistemas Embebidos
Facultad de Ingeniería - UBA
Buenos Aires - Argentina
lse@fi.uba.ar

Abstract—En la República Argentina la mayor parte del funcionamiento del sistema ferroviario es controlado en forma electromecánica mediante relés. Estos relés son considerados elementos críticos, al punto que en la jerga se denominan “relés vitales”, ya que su falla puede ocasionar graves accidentes. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema automático para validar el ciclo de vida de relés ferroviarios de seguridad. Este sistema debe ser capaz de realizar con un adecuado nivel de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad el ensayo del ciclo de vida de los relés. Esto implica energizar y desenergizar en forma fiable millones de veces el relé bajo ensayo y registrar su comportamiento durante todo el ciclo, para lo que se requiere un elevado nivel de disponibilidad del sistema.

En el presente trabajo además se muestra cómo el diseño del hardware y firmware del sistema mejoraron notablemente al utilizar normas internacionales, que en este caso fueron la IPC 7351 y la UNE-EN 50128, respectivamente.

Keywords—relés ferroviarios, ensayo de ciclo de vida, proyecto CIAA.

I. INTRODUCCIÓN

En la República Argentina la mayor parte del funcionamiento del sistema ferroviario es controlado en forma electromecánica mediante relés. Esto incluye por ejemplo el accionamiento automático de las barreras en los pasos a nivel o los sistemas de cambio de vía. En Argentina hay alrededor de 1.000 pasos a nivel con control automático de barreras, y cada uno de estos pasos a nivel cuenta según sus características particulares con entre 10 y 50 de estos relés. Si se considera que cada relé tiene un precio de mercado de alrededor de 1.500 dólares y que la mayor parte de los relés instalados en Argentina ya ha cumplido su

tiempo de vida, estimado en veinte años, se comprende la relevancia del problema, más aún si se considera que en muchos otros sistemas ferroviarios se utiliza este mismo tipo de relés, lo que eleva la cuenta total significativamente.

Es importante mencionar que si bien en la actualidad los sistemas electrónicos en muchos casos han reemplazado a los relés [1], en otros casos se siguen utilizando relés para el control y la seguridad de los sistemas ferroviarios. Por ejemplo, el subterráneo de la ciudad de Nueva York, uno de los más importantes del mundo, basa su funcionamiento casi exclusivamente en relés ferroviarios de seguridad [2,3]. En parte esto se debe a que los sistemas basados en relés son simples de reparar incluso por operarios con conocimientos moderados, para lo cual sólo deben contar con herramientas básicas y un número acotado de modelos de relés. Esto implica un elevado nivel de mantenibilidad y disponibilidad. Por otra parte los relés se siguen utilizando porque presentan un nivel de seguridad muy elevado, avalado por decenas de años de uso en los que no han presentado fallas significativas [4]. Esto indica elevado rendimiento en términos de fiabilidad, disponibilidad y seguridad. En consecuencia las buenas prácticas ferroviarias y el sentido común indican que deben existir razones de peso para reemplazar los relés por sistemas electrónicos.

Para poder ser utilizados en aplicaciones ferroviarias los relés deben ser certificados de acuerdo con determinadas normas. En particular Trenes Argentinos Sociedad del Estado solicitó en 2017 a nuestro Grupo de Investigación en Calidad y Seguridad de las Aplicaciones Ferroviarias (GICSAFe) dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) el

desarrollo de un sistema electrónico para realizar el ensayo que permita validar que un relé es capaz de alcanzar la vida útil mecánica mínima de diez millones de ciclos sin carga de acuerdo a lo indicado en el apartado 5.5.3 de la norma UNE-EN 50578, “Aplicaciones ferroviarias. Relés de señalización de corriente continua”:

5.5.3. Funcionamiento durante servicio:

Durante la duración de la vida útil mecánica mínima (10×10^6 movimientos sin carga de los contactos), se pueden aceptar las siguientes variaciones en relación al valor inicial:

- un aumento máximo del 10% de la corriente de excitación
- una disminución máxima del 15% de la corriente de caída;
- una disminución máxima del 20% del factor K.

La medición de la corriente de caída se efectúa después de la magnetización de los relés con una corriente equivalente a 2,5 veces la corriente nominal. Además, cuando se alimenta un relé con una corriente equivalente a 2,5 veces la corriente nominal y se mide la corriente de excitación inversa, ésta no debe sobrepasar el 110% del valor de la corriente de excitación.

En la sección II del presente artículo se presenta el diseño del sistema realizado por nuestro grupo. En la sección III se discute el resultado de mejoras introducidas al diseño del hardware y firmware mediante la aplicación de las normas internacionales IPC 7351 y UNE-EN 50128. Finalmente en la sección IV se presentan las conclusiones.

II. DISEÑO DEL SISTEMA

Para cumplir con los requerimientos es necesario generar millones de activaciones y desactivaciones del relé bajo ensayo y registrar su comportamiento durante todo el ciclo. A su vez la norma no indica qué ocurre en caso de que se interrumpa el ensayo. Esto es crítico, ya que un ciclo típico de activación y desactivación de un relé es del orden de tres segundos, por lo que un ensayo de diez millones de ciclos demora aproximadamente un año. Durante todo ese periodo el sistema debe funcionar en forma continua, a pesar de que existan cortes de luz o fallas de sus componentes, ya que en caso contrario el ensayo podría tener que repetirse desde el inicio, utilizando un nuevo relé. Además se debe tener la certeza de que los resultados son registrados adecuadamente, sin omitir ni duplicar ningún dato. Para lograr todo esto es necesario que el sistema de ensayo automático de los relés cuente con un adecuado nivel de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

En la Fig. 1 se presenta un diagrama de la arquitectura propuesta para el sistema. La misma está compuesta por un nivel de excitación y registro, y un nivel de monitoreo remoto. El nivel de excitación y registro se compone de un subsistema dedicado a la excitación del relé, que se implementa mediante electrónica no programable, y una parte dedicada al registro de las variables en memoria SD, que se implementa mediante una computadora industrial, en ambos casos con triple redundancia. El nivel de monitoreo está compuesto por un subsistema asociado al monitoreo

local y un subsistema asociado al monitoreo remoto. A continuación se describen cada uno de estos subsistemas.

A. Excitación del relé mediante electrónica no programable

A los fines de alcanzar los valores requeridos de fiabilidad, disponibilidad, seguridad y mantenibilidad se optó por implementar este subsistema en base a electrónica no programable. En la Fig. 2 se presenta a modo de ejemplo cómo se genera una señal biestable con esta tecnología. Por razones de confidencialidad no es posible presentar el diagrama esquemático completo del sistema. Sin embargo, respecto al circuito de la Fig. 2 es posible apreciar que mediante componentes elementales se obtiene una señal cuadrada con un periodo de tres segundos que no sufre alteraciones significativas aún ante variaciones en la temperatura, la tensión de alimentación o el envejecimiento de los componentes. Más importante aún es remarcar que al utilizar este tipo de tecnología para generar la señal se obtiene un sistema cuyo funcionamiento es fácilmente validable mediante simulaciones o incluso mediante simple inspección. Esta característica es muy conveniente a los fines de alcanzar y sobre todo demostrar un adecuado nivel de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Por ejemplo, una señal similar se puede generar internamente en un microcontrolador, pero entonces es más complejo demostrar los niveles de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

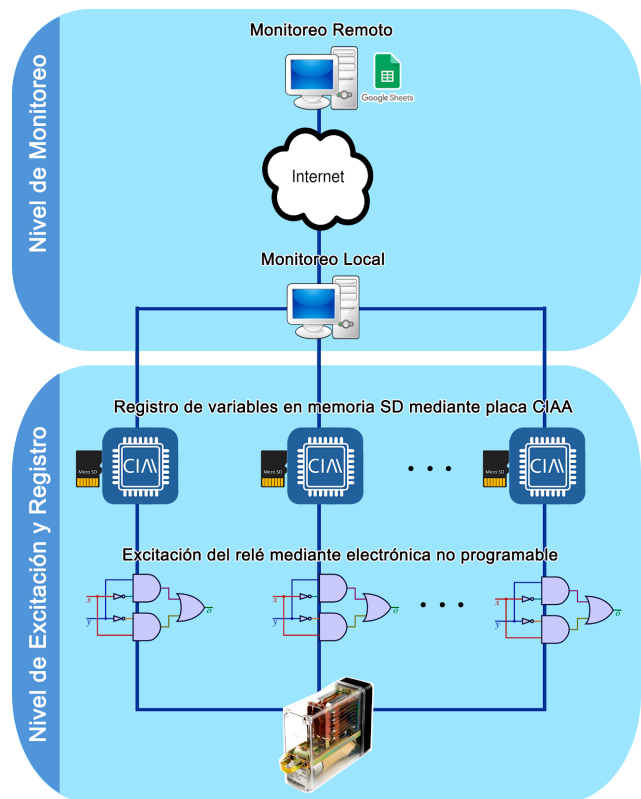


Fig. 1. Diagrama de la arquitectura propuesta para el sistema

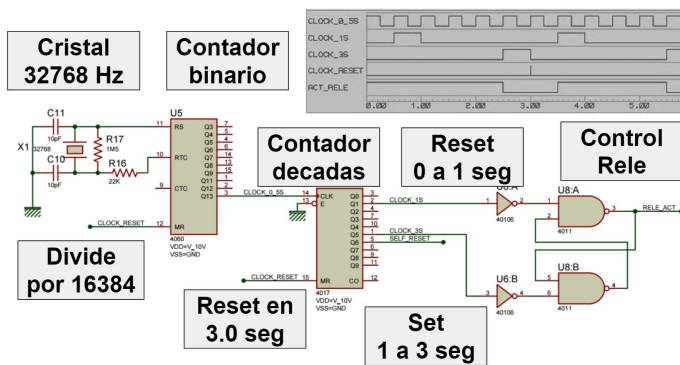


Fig. 2. Subcircuito para generar la señal periódica de tres segundos a partir de la cual mediante una etapa de potencia se activa al relé.

A modo de referencia se indica que el subsistema de excitación del relé implementado mediante electrónica no programable cuenta entre otras con las siguientes funciones:

- Generar la señal de activación del relé (incluyendo los transistores de potencia y circuitos de activación correspondientes).
- Realizar la sincronización automática de las señales de activación del relé generadas por tres placas independientes entre sí.
- Detectar cuando una de las tres placas falla y en ese caso desconectarla del relé en forma automática.
- Realizar la medición con una resolución de 16 bits de quince señales asociadas al funcionamiento del relé (usualmente se utilizan relés con hasta seis contactos normal cerrado y normal abierto independientes)
- Brindar mediante LEDs una serie de indicaciones luminosas relativas al estado del sistema.

Para el subsistema de excitación del relé se diseñó un circuito impreso que se presenta en la Fig. 3 (lado *top*) y en la Fig. 4 (lado *bottom*). El diseño está pensado para ser montado sobre la computadora industrial CIAA-NXP [5], que es la plataforma mediante la cual se realiza el registro de las variables en memoria SD y se implementa la comunicación con el nivel de monitoreo local, según se explica en la sección II.B de este artículo.

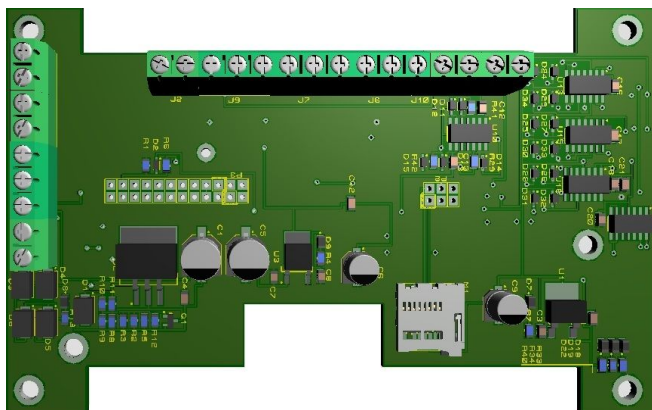


Fig. 3. Subsistema de excitación del relé (lado *top*)

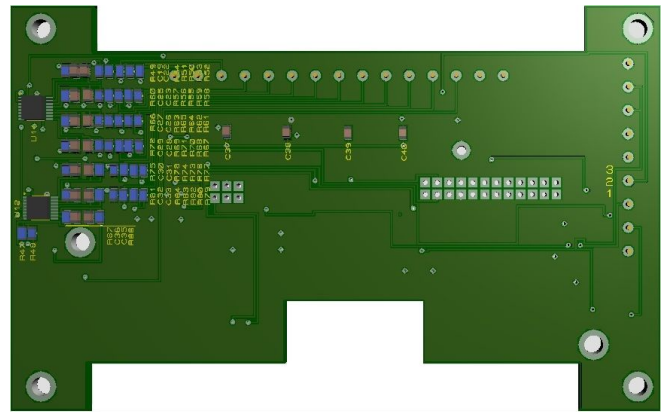


Fig. 4. Subsistema de excitación del relé (lado *bottom*)

B. Registro de las variables en memoria SD

El subsistema de registro de las variables en la memoria SD está basado en la computadora industrial CIAA-NXP. Esta plataforma es parte del Proyecto CIAA, Computadora Industrial Abierta Argentina [5]. En la Fig. 5 se presenta una fotografía de la CIAA-NXP y en la Fig. 6 un diagrama en bloques de la misma. La unidad central de procesamiento de esta computadora es un microcontrolador LPC4337, dual core Cortex M4F/M0, que puede funcionar a 208 MHz.

En el diagrama de la Fig. 1 se observa que el subsistema de registro de las variables en memoria SD está triplicado. Eso implica que en la implementación del sistema existen tres CIAA-NXP funcionando en paralelo, y cada una de ellas realiza el registro de las variables en una memoria SD independiente, lo que aumenta la fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema.

En la Fig. 6 se observa que la CIAA-NXP posee distintas interfaces. La interfaz SPI se utiliza para registrar los datos en la memoria SD que va colocada en la placa que se presentó en las Fig. 3 y Fig. 4. Por otra parte, mediante la interfaz Ethernet se realiza la comunicación con el subsistema de monitoreo local que se presenta a continuación en la sección II.C.



Fig. 5. Computadora industrial CIAA-NXP

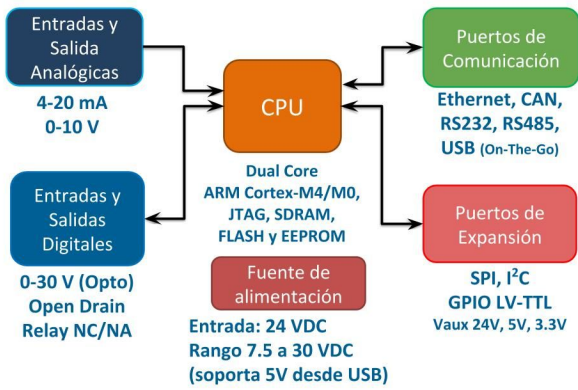


Fig. 6. Diagrama en bloques de la computadora industrial CIAA-NXP

C. Subsistema de monitoreo local

En la Fig. 7 se presenta una captura de pantalla del software implementado para realizar el monitoreo local del ensayo. Se observan las variaciones de las señales de los seis contactos normal cerrado y normal abierto del relé. Para cada una de las doce señales se presenta la medición realizada por cada una de las tres placas implementadas en el nivel de excitación, de acuerdo al diseño con triple redundancia que fuera presentado en la Fig. 1.

Como se mencionó al comienzo de la sección II, un ensayo de diez millones de ciclos demora aproximadamente un año en realizarse. En consecuencia este software está diseñado no sólo para visualizar en forma local los valores de la señal, sino además para detectar distintos tipos de anomalías y enviar alarmas a través de distintos medios, como por ejemplo correo electrónico.

En la Fig. 8 se presenta el diagrama de la arquitectura del software para monitoreo local implementado. Se observa que existe un grupo de funciones destinadas a configurar la detección de anomalías y otro grupo destinado a enviar alarmas indicando las anomalías detectadas. Además hay otro grupo de funciones dedicadas a presentar las señales en tiempo real en la pantalla de la computadora local en la cual corre este software. Por último otro grupo de tareas realiza el registro de los datos en un servidor remoto, como se discute en la sección II.D.

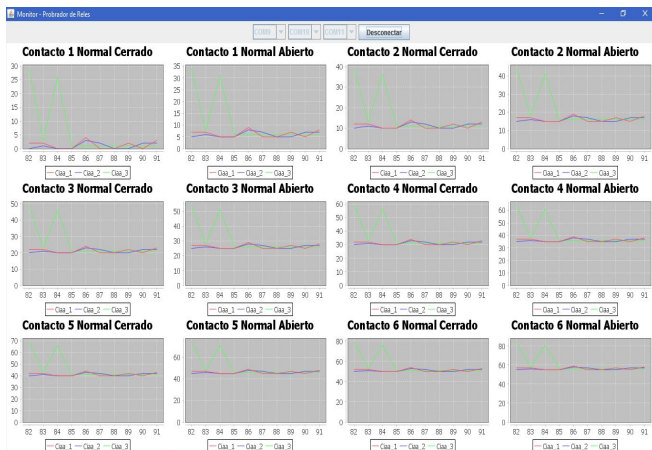


Fig. 7. Captura de pantalla del software para monitoreo local

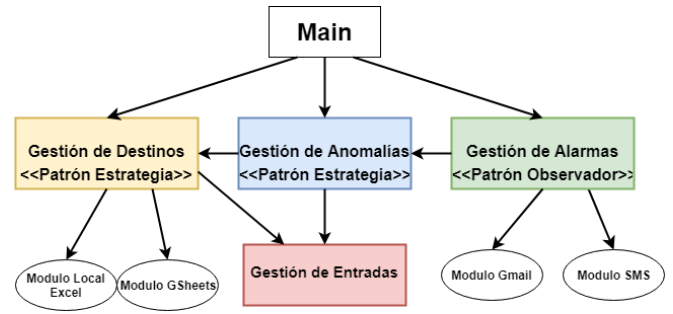


Fig. 8. Diagrama de la arquitectura del software para monitoreo local

D. Subsistema de monitoreo remoto

Debido a la duración prolongada que pueden tener los ensayos es muy conveniente que los valores presentes y actuales de las señales puedan ser visualizados en forma remota. Para eso el software implementado almacena en tiempo real las señales de los relés en Google Drive. De esta manera los usuarios habilitados pueden acceder a los datos desde su computadora e incluso desde su teléfono móvil.

III. MEJORAS OBTENIDAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE NORMAS PARA EL DISEÑO DE HARDWARE Y FIRMWARE

El presente sistema se inscribe en un marco más general, en el que desde el grupo CONICET-GICSAFe se realizan distintos proyectos para la empresa Trenes Argentinos. En el contexto de esas actividades se siguen distintas normas. En particular las más importantes son las normas ferroviarias de la serie UNE-EN 5012X, pero además se siguen normas de otras series, como las ISO 9000 y las normas IPC referidas al diseño de hardware. En la sección III.A se presentan las mejoras que resultan en el diseño del hardware al aplicar la norma IPC 7351 y en la sección III.D las mejoras en el software al aplicar la norma UNE-EN 50128.

A. Mejora en el diseño de hardware

La norma IPC7351 se refiere a los requerimientos generales para el diseño de circuitos impresos con componentes de montaje superficial. En la Fig. 9 se presenta el resultado de aplicar esta norma al diseño presentado en la Fig. 3 y la Fig. 4. En este caso sólo se presenta el lado *top*, porque todos los componentes pudieron ser ubicados allí.

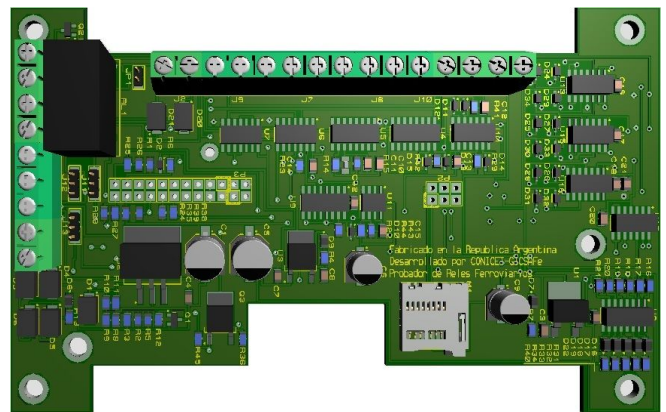


Fig. 9. Subsistema de excitación del relé (lado *top*) luego de aplicar los lineamientos de la norma IPC 7351.

En la Fig. 9 se observa que todos los componentes están ubicados con la misma alineación. Esto es muy importante para reducir la probabilidad de errores en el proceso de soldadura automática de los componentes. Los componentes se hallan agrupados en bloques funcionales. Es decir, los componentes asociados a una dada función están todos ubicados dentro de un área rectangular. Esto por supuesto no es posible apreciarlo mediante la simple observación de la Fig. 9, sin embargo vale decir que ese es el resultado obtenido y permite reusar con mayor facilidad las partes del circuito impreso.

B. Mejora en el diseño del software de monitoreo local

En la Fig. 10 se presenta el ecosistema de herramientas implementado para el desarrollo de firmware y software por el grupo CONICET-GICSAFe a los fines de cumplir los lineamientos indicados por la norma UNE-EN 50128:2012, *Aplicaciones ferroviarias Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Software para sistemas de control y protección del ferrocarril*. Este conjunto de herramientas permite gestionar requerimientos, ensayos y tareas, así como hacer control de versiones, análisis estático, análisis de cobertura e integración continua.

Por ejemplo, se configuró SonarQube para que detecte en forma automática código que degrade la fiabilidad, mantenibilidad o seguridad del código fuente del software implementado por no cumplir con un conjunto de buenas prácticas establecidas (MISRA-C, CERT y CWE). En la Fig. 11 se presenta el resultado obtenido. Se observa que al inicio

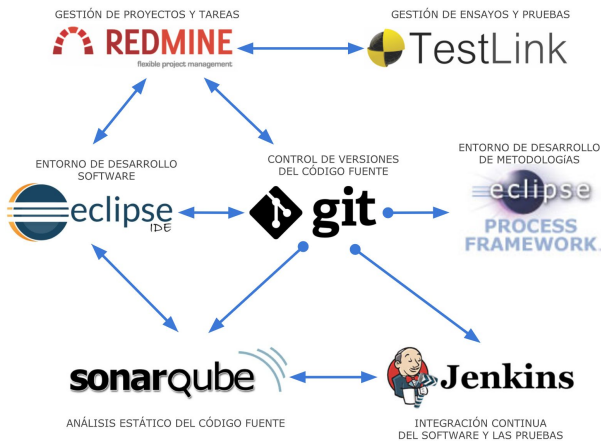


Fig. 10. Diagrama del ecosistema de desarrollo utilizado para el desarrollo de firmware y software en el CONICET-GICSAFe.



Fig. 11. Análisis del software de monitoreo local mediante SonarQube

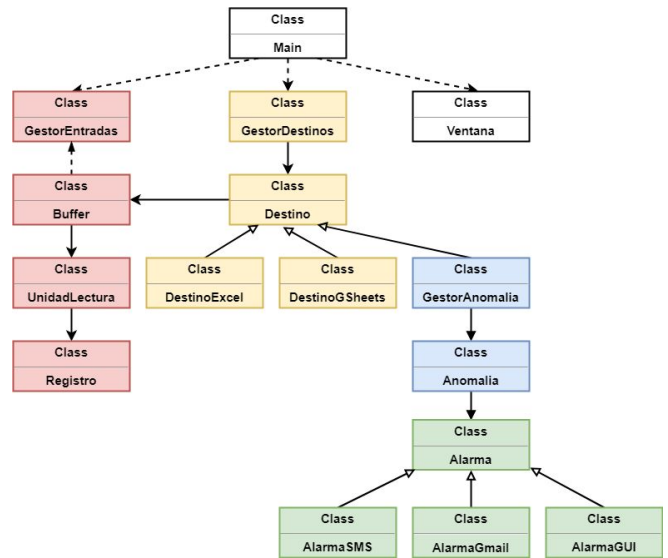


Fig. 12. Diagrama de la nueva arquitectura del software para monitoreo local luego de aplicar los lineamientos de la norma UNE-EN 50128.

SonarQube indicó 4 *bugs* (defectos críticos) y 54 *code smells* (síntomas). En función de este resultado se modificó la arquitectura del código fuente de acuerdo a lo indicado en la Fig. 12. Comparando con la Fig. 8 se observa que este diseño es más modular, lo que permite realizar mejoras que impactan en métricas como la complejidad ciclomática y la complejidad cognitiva a nivel de módulo, sin alterar las métricas en los demás módulos, favoreciendo así la mantenibilidad del código fuente. En la Fig. 11 se observa que al aplicar estos cambios se obtuvieron 0 *bugs* y 4 *code smells*, lo que indica una mejora muy significativa. Luego se hicieron cambios adicionales y SonarQube detectó nuevos *code smells*, pero al corregirlos se logró bajar finalmente a sólo 4 los *code smells* residuales en el código.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un sistema automático para ensayos de ciclo de vida de relés ferroviarios de seguridad. Se describe la solución desarrollada a los fines de alcanzar adecuados niveles de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Luego se revisa el diseño realizado en primera instancia a partir de lo indicado en normas de desarrollo de hardware y firmware, a partir de lo cual que se concluye que el diseño mejora notablemente mediante la aplicación de normas de desarrollo de hardware y software.

REFERENCIAS

- [1] (2018) Japanese Railway Signals and Signaling. [Online]. Disponible: <http://www.sumidacrossing.org/Prototype/JapanSignaling/>
- [2] E. G. Fitzsimmons. (2017) Key to Improving Subway Service in New York? Modern Signals. [Online]. Disponible: <https://www.nytimes.com/2017/05/01/nyregion/new-york-subway-signals.html>
- [3] (2017) List of metro systems. [Online]. Disponible: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_metro_systems
- [4] (2018) Type B Relays - General Information. [Online]. Disponible: http://www.rsignalpix.com/pdf/Handbook_18_sec.pdf
- [5] (2018) Proyecto CIAA. [Online]. Disponible: http://www.proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=desarrollo:hardware:ciaa_nxp:ciaa_nxp_inicio