

# “Verificación de la integración del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de la Inyección de Boro de Atucha II”

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumno: Ing. Daniel Sebastián Estryk  
Director: Ing. Claudio Verrastro

Noviembre 2013



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

# Índice

<b>Resumen.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Objetivo.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Antecedentes.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Descripción del Sistema a Verificar .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Introducción .....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Sistema de Protección de Reactor (SPR).....	7
2.1.2 Sistemas de Parada de CNAII.....	7
2.1.3 Criterios de diseño para el SIA.....	7
<b>2.2 Arquitectura.....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Sensores.....	9
2.2.2 Módulos y Trenes de Instrumentación.....	9
<b>2.3 Generalidades de la Implementación .....</b>	<b>12</b>
2.3.1 Alimentación.....	12
2.3.2 Señales Analógicas.....	12
2.3.3 Señales Digitales.....	13
2.3.4 Señales de Actuación.....	13
2.3.5 Señales serie LVC 3.3V/Óptico .....	13
2.3.6 Verificación de inserción de los módulos.....	14
2.3.7 Indicaciones del Frente del Módulo .....	14
2.3.8 Generación de Fallas .....	14
2.3.9 Tiempos de respuesta.....	15
<b>2.4 Descripción de los módulos del sistema .....</b>	<b>15</b>
2.4.1 Módulo Acondicionador De Señales.....	15
2.4.2 Módulo De Comparación Y Disparo .....	16
2.4.3 Módulos Transmisor Y Receptor De Fibra Óptica.....	19
2.4.4 Módulo De Votación .....	19
2.4.5 Módulo Driver De Potencia.....	20
2.4.6 Concentrador Del Tren.....	21
2.4.7 Módulo Comparador De Sensores .....	22
2.4.8 Módulo Registrador de Datos .....	22
2.4.9 Módulo Adaptador de Entrada/Salida.....	23
2.4.10 Sustituto de Acondicionador de Entradas.....	24
<b>2.5 Trenes de Medición.....</b>	<b>24</b>
2.5.1 Conformación de las 3 variantes de Trenes de Medición.Placa de Interconexionado .....	25
<b>2.6 Tren de Registro.....</b>	<b>26</b>
<b>2.7 Sistema Integrado .....</b>	<b>26</b>
<b>3. Desarrollo .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Introducción .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Equipamiento Utilizado.....</b>	<b>27</b>
3.2.1 National Instruments NI CompactDAQ .....	27
3.2.2 Emulador de Sensores.....	27

3.2.3	Contactores.....	34
3.2.4	Fuentes de Alimentación.....	34
3.2.5	Computadora.....	35
3.2.6	UPS.....	35
3.2.7	Cables de Fibra Óptica.....	35
<b>3.3</b>	<b>Montaje.....</b>	<b>35</b>
3.3.1	Rack y accesorios.....	38
3.3.2	Distribución de los componentes en el rack.....	38
<b>3.4</b>	<b>Software de Verificación.....</b>	<b>39</b>
3.4.1	Estructura del software.....	40
3.4.2	Interfaz de Usuario.....	40
3.4.3	Archivo de Configuración Inicial.....	47
<b>3.5</b>	<b>Ensayos realizados, resultados y hallazgos encontrados durante el proceso de Verificación.....</b>	<b>47</b>
3.5.1	Reset de los trenes.....	48
3.5.2	Prueba de Lámparas y Medición de consumo.....	49
3.5.3	Test de Disparo de Tren.....	49
3.5.4	Fuera de rango de los sensores.....	50
3.5.5	Ejecución continua con valores constantes y verificación del rango de alimentación.....	51
3.5.6	Simulación de escalones de presión y medición de tiempos de respuesta....	51
3.5.7	Disparos individuales por escalón.....	53
3.5.8	Simulación de rampas negativas y estimación del tiempo de respuesta del sistema.....	53
3.5.9	Simulación de rampas máximas que no deben producir disparo.....	55
3.5.10	Simulación de rampas abruptas con excursiones pequeñas que no deben producir disparo.....	56
3.5.11	Señales constantes con ruido.....	57
3.5.12	Simulación de rampas máximas que no deben producir disparo con ruido....	57
3.5.13	Simulación de eventos iniciantes tipo Rotura 0.1A y 2A en la rama fría del circuito primario.....	57
3.5.14	Detección de fallas de comunicación entre los comparadores y los votadores.....	59
3.5.15	Detección de desconexión de módulos.....	59
3.5.16	Otros hallazgos realizados durante el periodo de Verificación.....	60
<b>3.6</b>	<b>Discusión y futuros trabajos.....</b>	<b>62</b>
<b>4.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>63</b>
<b>5.</b>	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>64</b>
<b>6.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>65</b>

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es la verificación funcional en fábrica de la integración del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro de Atucha II (SIA), de acuerdo a normativa internacional.

La función del SIA es detectar una caída de presión anómala en el circuito primario del reactor y generar una señal de disparo del sistema de inyección de boro.

Este sistema consta de 4 trenes redundantes que miden señales provenientes de 6 sensores de presión colocados en ambos loops del circuito primario de CNAII.

De acuerdo a los procedimientos de desarrollo certificados ISO 9001 del sector de Instrumentación y Control, se realizó la verificación funcional del sistema integrado en fábrica (factory acceptance tests) siguiendo los lineamientos de las normas IEC 61513 y IAEA NS-G-1.3 para sistemas de seguridad para centrales nucleares.

Dentro del conjunto de elementos necesarios para realizar el proceso de verificación se destaca el desarrollo de un módulo con la capacidad de generar 6 señales de corriente que emulan los sensores de presión. Además, se utilizó un equipo National Instruments NI CompactDAQ que tiene la capacidad de controlar 32 salidas y de leer 64 entradas digitales de 24V mediante las cuales se controlan y adquieren todas las señales digitales que intercambia el SIA con la instrumentación de planta. Tanto el equipo NI CompactDAQ como el módulo emulador de sensores pueden ser controlados mediante conexión USB desde una PC.

Se desarrolló un software que controla ambos equipos en forma conjunta, de manera de estimular al SIA emulando situaciones similares a las de planta. El software presenta una interfaz de usuario que permite la interacción centralizada de ejecución de ensayos y visualización de la respuesta del sistema.

Se diseñaron y ejecutaron un conjunto de ensayos para realizar la verificación de los requerimientos del SIA, emulando las señales de presión según perfiles predefinidos. Se priorizó la verificación de los componentes del sistema que intervienen en el accionamiento de la señal protectora, por lo que la mayor parte de los ensayos son tendientes a probar la efectividad del disparo en condiciones en que deba darse, la detección de disparos espurios en situaciones extremas en que el sistema no deba disparar y verificar la detección de fallas.

Durante los últimos 8 meses se contabilizaron al menos 6 meses de ensayos efectivos ejercitando al sistema, sin errores significativos de diseño ni fallas de componentes electrónicos de los módulos, por lo que se estima que no presentará problemas significativos al ser instalado en planta ni durante el proceso de validación final.

La experiencia obtenida en el proceso de verificación y la depuración de algunos problemas de implementación, se utilizarán en el desarrollo de los Sistemas de Protección de Reactor para los proyectos CAREM, RA10 y Loop del RA10.

# 1. Introducción

A principios del año 2011 el sector de Instrumentación de la CNAII contrata al sector de I&C de CNEA, para el desarrollo de un sistema de instrumentación alternativo ad-hoc, que realice mediciones de presión del circuito primario y ante una caída abrupta de la misma, tenga la capacidad de disparar rápidamente el Sistema de Inyección de Boro en forma paralela y redundante al SPR original de la central.

Este requerimiento surge a partir de cambios en los conceptos de seguridad referentes a los accidentes de pérdida de líquido refrigerante (LOCA) y el intento de cubrir roturas mayores a 0.1A, que no estaban incluidas en los Accidentes Base de Diseño (DBA) de la central [1][2].

Este nuevo sistema opera en paralelo al sistema Teleperm C existente, sin ninguna relación de prioridad entre ellos. Ambos sistemas de instrumentación convergen en los módulos denominados Unidades Encajonables, ya presentes en la central.

Otro factor que asegura la independencia entre el SPR y el nuevo sistema de instrumentación es la utilización de sensores de presión exclusivos para cada uno. El nuevo sistema monitorea la presión de ambos loops del circuito primario con 6 sensores propios y produce un disparo cuando detecta una caída anómala en la presión.

En la sección 2 se describe el nuevo sistema, llamado Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro de Atucha II (SIA). Si bien la implementación del sistema no es parte del objetivo de este trabajo y es anterior al mismo, se agrega esta sección para su mejor comprensión.

En el marco del desarrollo del SIA se encuentra la necesidad de realizar la verificación del sistema integrado en fábrica (factory acceptance tests). Los mismos son sugeridos en las normas IEC 61513 [3] y IAEA NS-G-1.3 [4] como una buena práctica para minimizar los ensayos necesarios en planta durante la instalación definitiva del sistema. En la sección 3 se describe el desarrollo de la verificación, objetivo de este trabajo.

## 1.1 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es la verificación de la integración del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro (SIA) con ensayos del tipo caja negra. Se pueden puntualizar las siguientes tareas necesarias para cumplir con este objetivo:

- Desarrollo de un Módulo Emulador de Sensores
- Montaje del SIA y el equipamiento para la verificación del mismo en un rack
- Desarrollo de software interfaz de usuario para el comando de los dispositivos que estimulan al sistema bajo prueba emulando las situaciones de planta
- Desarrollo y ejecución de un conjunto de pruebas para la verificación de requerimientos

## **1.2 Antecedentes**

No hay antecedentes actuales (en los últimos 20 años) de integraciones de sistemas de la envergadura del SIA dentro del Departamento de I&C de la Gerencia de Área Energía Nuclear (GAEN) de CNEA.

En cuanto a la verificación de equipos de menor envergadura pertenecientes a *sistemas de protección de reactor* se puede mencionar los siguientes antecedentes de I&C:

- La verificación exhaustiva de la Lógica de Scram del RA1. Tanto el desarrollo del equipo como su verificación estuvieron a cargo del autor [5].
- Verificación del Impulsímetro Digital para Canal de Arranque [6] utilizando el Generador de Pulsos para la Emulación de un Sistema de Detección Neutrónica [7].

En cuanto a antecedentes externos al Departamento de I&C se puede mencionar a la empresa ucraniana Radiy que desarrolla SPR y actualizó la mayor parte de los SPRs de las centrales nucleares ucranianas. Esta empresa realiza verificaciones con metodologías similares a las planteadas en este trabajo [8], generando emuladores para las señales de entrada y teniendo plataformas de verificación en fábrica, para que todo equipo fabricado tenga la mayor cantidad de horas de funcionamiento en fábrica previo a su instalación. Esto pudo observarse durante la visita realizada a sus instalaciones en el contexto de 2nd International Workshop on “The Applications of Field-programmable Gate Arrays in Nuclear Power Plants” al que el autor tuvo la oportunidad de asistir.

## 2. Descripción del Sistema a Verificar

### 2.1 Introducción

En este capítulo se describe el Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro de Atucha II (SIA). El mismo es un resumen de varios documentos, fundamentalmente de los Requerimientos [9] y de la Ingeniería de Detalle del SIA [10].

Este sistema fue realizado por la Subgerencia de I&C de la Gerencia de Área Energía Nuclear (GAEN) de CNEA.

#### 2.1.1 Sistema de Protección de Reactor (SPR)

El SPR es el sistema que tiene como objetivo principal asegurar en todo momento el cumplimiento de las funciones de seguridad en una central nuclear [3]. Las funciones de seguridad principales son:

- 1) Control de la reactividad
- 2) Control de inventario del circuito primario y el adecuado transporte de calor hacia la fuente fría final
- 3) Adecuado confinamiento para evitar la liberación de material radioactivo

Para ello, el SPR dispone de un conjunto de componentes que inicia de manera automática los sistemas frontales de seguridad de modo de garantizar que no se excedan los límites especificados de diseño de la central. El SPR siempre tiene prioridad sobre las acciones del sistema de control de la planta.

Entre los sistemas del SPR se encuentran los Sistemas de Instrumentación, encargados de monitorear un conjunto de variables, denominadas variables de seguridad y de iniciar acciones de protección cuando dichas variables excedan los límites preestablecidos. Dichas variables corresponden a magnitudes termohidráulicas, nucleares y radiológicas.

#### 2.1.2 Sistemas de Parada de CNAII

Para cumplir con la función de seguridad de control de reactividad, el SPR dispone de dos Sistemas de Parada del Reactor (SER) independientes y diversos. El Primer Sistema de Parada de Reactor (PSPR) corresponde al Sistema de Caída de Barras Absorbentes de Neutrones; el segundo (SSPR) es el Sistema de Inyección Rápida de Veneno Neutrónico Líquido. En el caso de la CNAII el veneno líquido está compuesto por una solución de ácido bórico en agua pesada.

#### 2.1.3 Criterios de diseño para el SIA

Los criterios tomados en cuenta en el diseño del SIA son los siguientes:

- **Diseño Conservativo.** Para su implementación se utilizarán tecnologías y criterios de diseño lo suficientemente probados.
- **Redundancia.** De modo de cumplir con la tolerancia a la falla única y poder alcanzar los criterios de confiabilidad y disponibilidad acordes a los criterios de seguridad requeridos para el sistema. El SIA cuenta con 4 trenes redundantes de manera equivalente al SPR de la central.

- **Diversidad.** Las funciones del sistema alternativo serán implementadas utilizando diseños y tecnologías diferentes en su implementación. Este concepto es importante para evitar las fallas de modo común. Además se utiliza este criterio internamente en el diseño del SIA en los módulos más complejos, como se detallará más adelante.
- **Independencia.** Cada redundancia tendrá la capacidad de cumplir con su función sin ser afectada por la falla de otra redundancia.
- **Tolerancia a falla simple.** Una única falla en el sistema no deberá impedir que se disparen las acciones de protección cuando sean solicitadas.

Una característica importante del SIA es que contará con tecnología digital basada en dispositivos de lógica configurable FPGA/CPLD. Estos dispositivos son actualmente utilizados en aplicaciones críticas de la industria nuclear y aeroespacial, ya que brindan flexibilidad de implementación, conservando máximos requerimientos de confiabilidad siguiendo los lineamientos de las normas para su aplicación en sistemas de seguridad para centrales nucleares [11].

## 2.2 Arquitectura

En la Figura 1 se presenta el esquema general del SIA. Este nuevo sistema monitorea el valor de la presión de los dos loops que componen el circuito primario del reactor utilizando sensores triple-redundados. Las mediciones luego ingresan a 4 trenes de instrumentación siguiendo la estructura mostrada en la figura. Cada tren genera señales de disparo que hacen actuar las válvulas piloto, encargadas finalmente de comandar las válvulas neumáticas principales que presurizan los tanques de boro y provocan la inyección del veneno neutrónico.

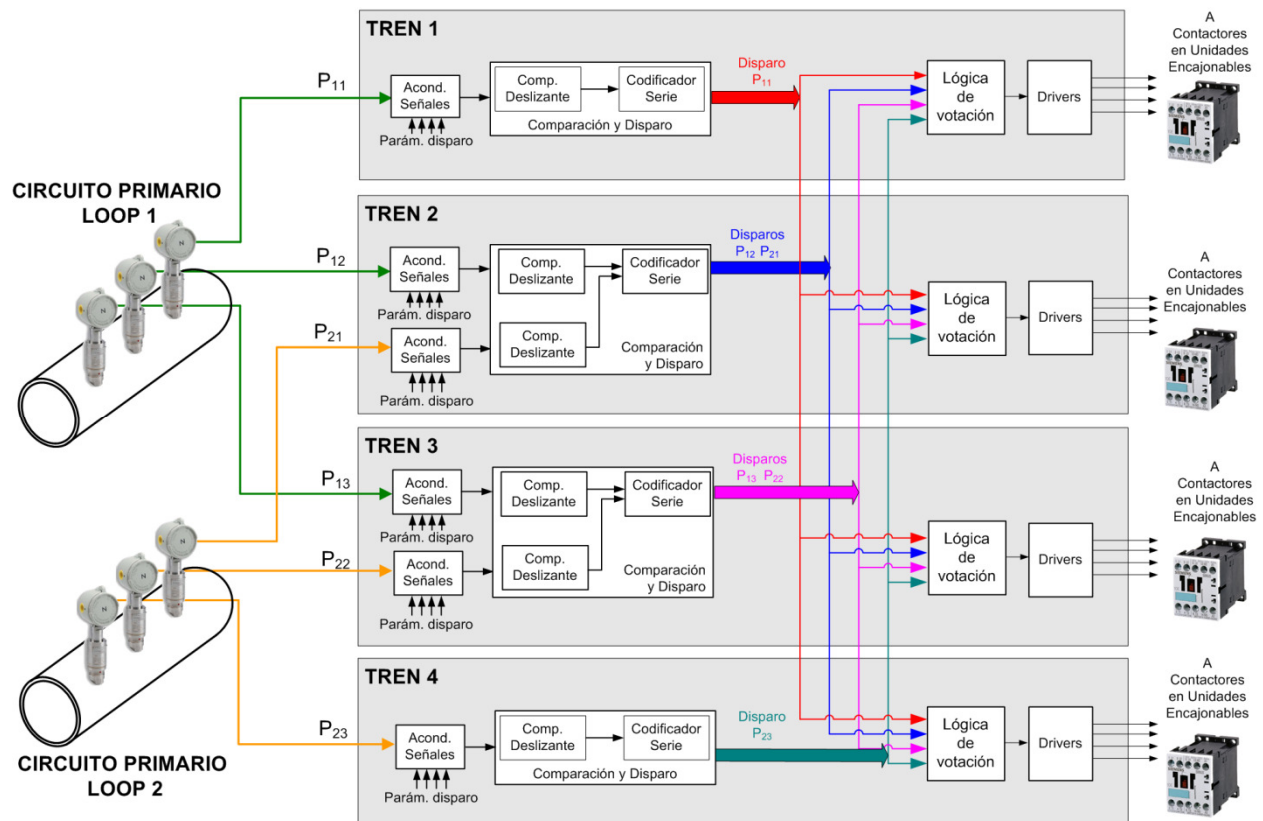


Figura 1. Arquitectura del SIA, esquema general.

### 2.2.1 Sensores

Los sensores de presión son provistos por la CNAII y están especificados en el documento de requerimientos del SIA [9]. Tienen un rango de trabajo de **0 – 150 bar**, correspondiente al **rango eléctrico de 4 – 20mA**. Además, a partir de las especificaciones provistas por CNAII se asume que los sensores tienen un **tiempo de respuesta de 7ms**, correspondiente al tiempo de establecimiento al generarse un salto de presión de rango completo.

### 2.2.2 Módulos y Trenes de Instrumentación

Tal como se observa en la Figura 1, los trenes 1 y 4 reciben señal de un sensor, mientras que los trenes 2 y 3 lo hacen de 2 sensores. Esta asimetría proviene del hecho que existen 6 sensores y 4 trenes de instrumentación.

Las señales de presión proveniente de los sensores ingresan a los módulos **Acondicionadores de Señales**, donde se realiza la *transformación corriente-tensión*. Dicho módulo también se utiliza para establecer los *parámetros de disparo de la señal* de presión. Existen tantos módulos acondicionadores como señales de presión ingresan al tren.

En el siguiente módulo denominado **Comparación y Disparo** se digitalizan las señales analógicas y por cada una de las señales de presión recibidas se calcula su velocidad de caída. De este modo, en función de los valores límites establecidos en el módulo acondicionador, se genera una señal de disparo cuando dichos límites son sobrepasados. El algoritmo digital que realiza esta función se encuentra descrito en 2.4.2.1 y más detalladamente en [15]; su diseño se realizó en función del sistema analógico original de Siemens [14]. Finalmente, este módulo codifica la condición de disparo de cada señal de presión en una trama serie y la envía al siguiente módulo denominado **Módulo de Votación**. Dicha trama se transmite tanto al módulo de votación del propio tren como a los módulos de votación de los demás trenes.

La información de un Módulo de Comparación y Disparo se envía a los Módulos de Votación de los otros trenes a través de interfaces galvánicamente aisladas utilizando los módulos **Transmisor/Receptor Fibra Óptica**.

El **Módulo de Votación** realiza la votación de las señales de disparo que provienen de los trenes y del propio tren, y genera la señal *disparo de tren*. Dicha señal se transmite al **Módulo Driver de Potencia** y éste finalmente comanda a los contactores que accionan las válvulas piloto.

Muchos de los módulos nombrados se comunican con la central a través de señales digitales. Para ello existe el **Módulo Adaptador Entrada/Salida**, encargado de adaptar los valores de tensión.

Todos los módulos pertenecientes al mismo tren están dispuestos en un subrack Eurocard tipo ES902 de 19" de altura simple 3U (5.25" = 133.35mm).

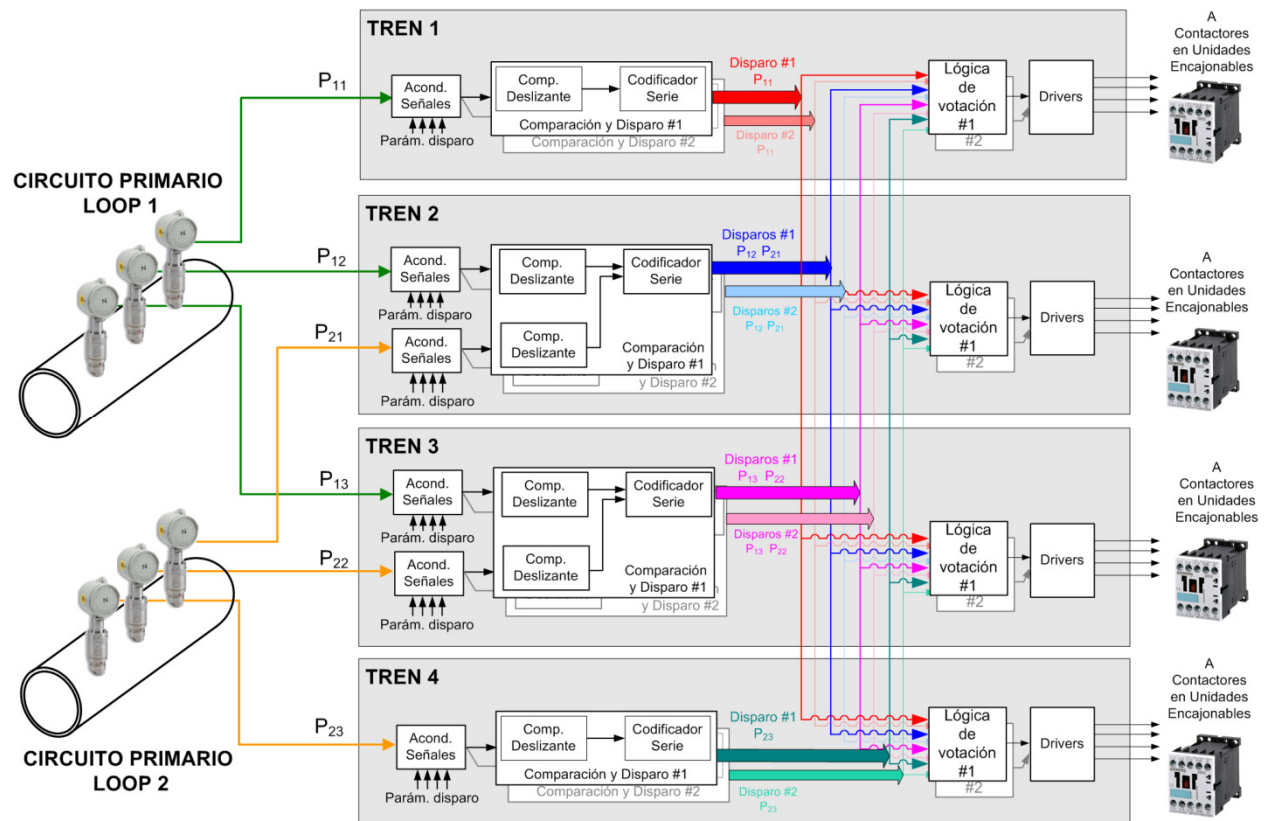
#### 2.2.2.1 Diversidad

Una característica de este diseño es la introducción del concepto de diversidad en cada uno de los trenes de instrumentación. Esto implica que varios de los módulos electrónicos se encuentran implementados dos veces, utilizando diferentes tecnologías y distintos equipos de desarrollo. De esta forma, cada par de módulos diversos homólogos funcionan en paralelo en el mismo tren y realizan exactamente la misma función, a pesar de que cada uno de ellos tenga una implementación interna diferente.

En la Figura 2 se pueden distinguir los elementos que se encuentran diversificados en los trenes de instrumentación, éstos son:

- Módulo de Comparación y Disparo
- Módulo de Votación

Los módulos diversos homólogos están conectados entre sí con el objetivo de poder realizar un chequeo cruzado de sus resultados, generando una señal de falla cuando se detectan discrepancias.



**Figura 2.** Arquitectura del SIA. Esquema donde se observa la implementación diversa de algunos módulos.

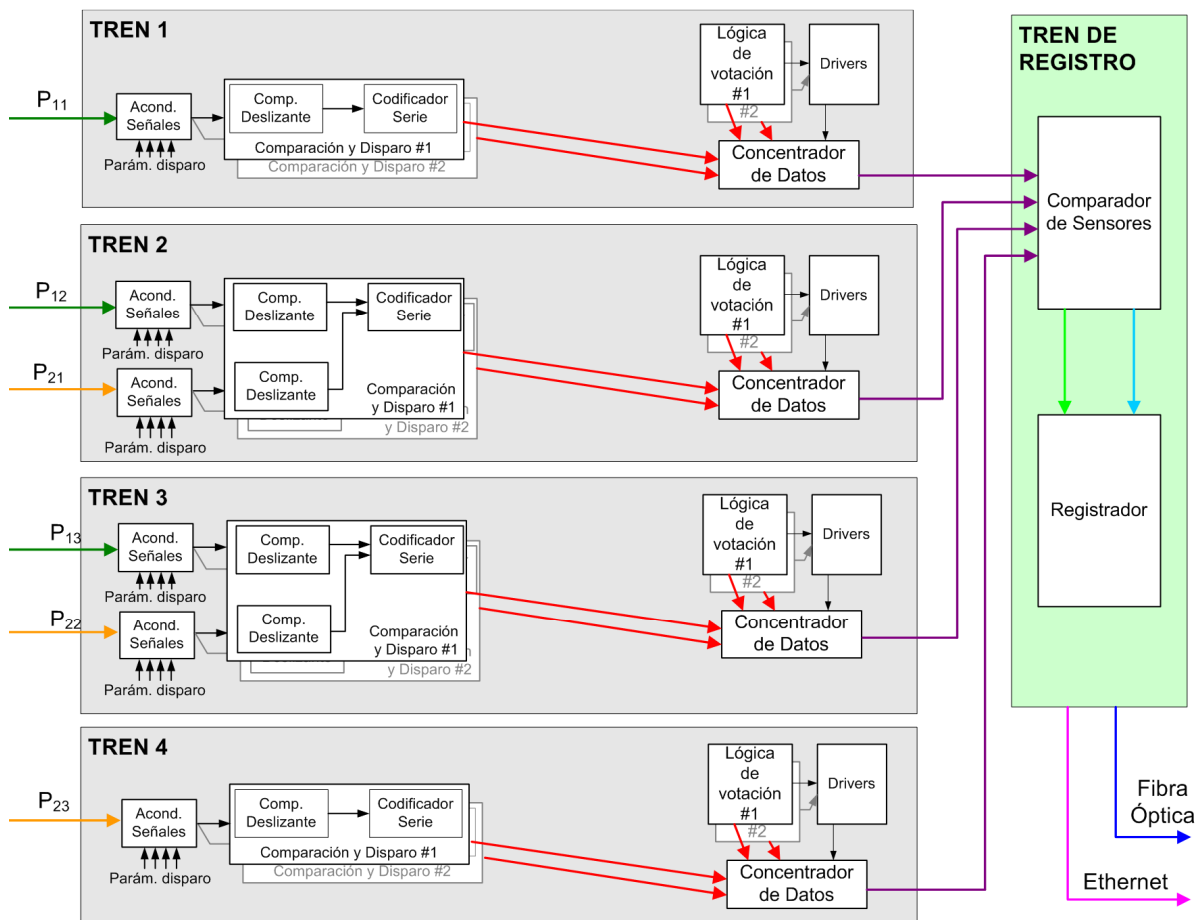
Una característica importante del concepto de diversidad es que no existe ningún tipo de prioridad entre módulos diversos homólogos. Esto difiere de la arquitectura tradicional encontrada en otros sistemas de seguridad, en que un módulo de alta confiabilidad se encuentra realizando una función determinada y, por otro lado, otro módulo de menor jerarquía realiza tareas de supervisión. Allí, el módulo de supervisión no cumple la función de seguridad y se limita a producir señales de alarma cuando detecta algún tipo de error.

La ausencia de prioridad entre los módulos diversos hace que en algún punto dicha diversidad se necesite "resolver" de modo de generar una única señal de disparo de tren. El encargado de resolver la diversidad es el módulo de drivers, que genera un único disparo mediante una lógica 1 de 2 entre los disparos de las dos unidades de votación.

### 2.2.2.2 Comparación de Sensores y Registro de Datos

Además de los módulos ya nombrados, cada tren cuenta con un módulo **Concentrador de Tren**, encargado de reunir la información del estado interno generada por las 2 diversidades de Comparación y Disparo y de Votación. Estos datos, junto a otras señales del tren, son codificados en una trama serie y enviados por fibra óptica a un módulo de **Comparador de Sensores**, único en el SIA. Éste tiene como función detectar derivas tanto en las lecturas de presión de los sensores como en la configuración de los parámetros de disparo del tren.

Junto al módulo Comparador de Sensores se encuentra el módulo **Registrador de Datos**, también único en el sistema, cuyas funciones principales son, por un lado, realizar un almacenamiento histórico de los datos del SIA en una memoria no volátil y, por otro, permitir el acceso remoto a toda esta información vía una conexión Ethernet.

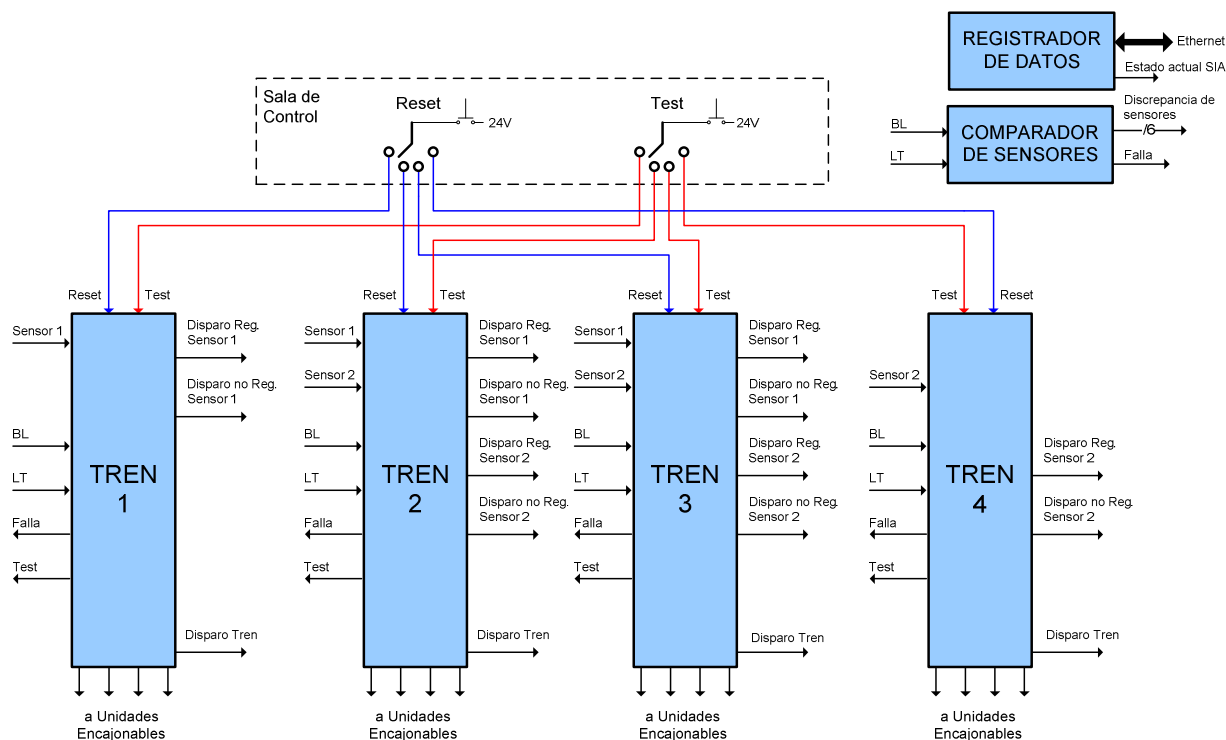


**Figura 3.** Arquitectura del SIA. Esquema donde se observa la confluencia de los datos internos del sistema.

Los módulos Comparador de Sensores y Registrador de Datos se encuentran instalados en uno de los 4 trenes de instrumentación, en un subrack exclusivo llamado **Tren de Registro**. Dicho subrack también dispone de módulos Entrada/Salida para la comunicación con la central.

### 2.2.2.3 Señales de los Trenes

La Figura 4 muestra un esquema de los 4 trenes de instrumentación del SIA y el conjunto de señales que se intercambian con la central. Se aclara que en este esquema no están presentes las señales de entrecruzamiento entre trenes, internas al SIA.



**Figura 4.** Señales intercambiadas entre el SIA y la instrumentación de la central. No se incluyen en este esquema las señales de entrecruzamiento de trenes.

## 2.3 Generalidades de la Implementación

En esta sección se describen los tipos y características de las señales del SIA, y las intercambiadas entre el SIA y la central.

### 2.3.1 Alimentación

La alimentación de los módulos se ajusta a del sistema Teleperm C de Siemens. En dicho sistema los pines **L+** y **L-** proveen a los módulos de +24V (20 a 30V) y -24V (-20 a -30V) respectivamente. El pin **M** corresponde al retorno de 0V (masa) de alimentación. **PM** provee una tensión de +24V cuya función es alimentar las etapas de salida de los componentes de señalización.

La información detallada de la alimentación provista a los sistemas Teleperm C se puede encontrar en la Sección Modules de [12].

### 2.3.2 Señales Analógicas

Las señales analógicas provenientes de los sensores son señales de corriente de 4-20mA. La alimentación de estos sensores es provista por el SIA. La conexión con ellos se hace a través de dos hilos.

Las señales analógicas internas de los trenes son señales de tensión de rango 2-10V. El sesgo de 2V permite a los módulos detectar una situación de desconexión. El rango máximo permitido de estas señales es de 0-12V.

### 2.3.3 Señales Digitales

#### 2.3.3.1 Interfaz con la central

La interfaz con la central se realiza a través de señales de rango 0-24V con los niveles lógicos TELEPERM C, los mismos están definidos en [12].

Las señales provenientes de la central son todas activas en alto y el módulo Adaptador de Entradas/Salidas que las recibe tiene una resistencia pull-down sobre cada una, que asegura un cero lógico en el caso de desconexión. Por otra parte, todas las salidas a la central son adaptadas también por este módulo y son activas en bajo,

Las únicas señales digitales que difieren de esta norma son las señales de inserción. Las mismas presentan tensiones de 24V a través de una resistencia de 4.7KΩ al estar todos los módulos insertados, mientras que al desconectar cualquier módulo del subrack, la señal respectiva quedará flotante.

#### 2.3.3.2 Interfaz entre trenes

Las señales entre cadenas están galvánicamente aisladas y son señales dinámicas. La interfaz se implementó mediante fibras ópticas.

#### 2.3.3.3 Interfaz entre módulos

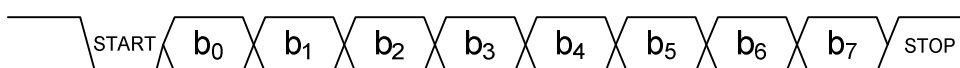
Las señales digitales entre módulos son de tipo LVC 3.3V [13], protegidas contra cortocircuito a través de resistores. Además, todas las entradas tienen una resistencia pull-down que asegura un cero lógico en el caso de desconexión del módulo que genere la señal.

### 2.3.4 Señales de Actuación

El SIA genera por cada cadena 4 señales de 24V con capacidad de 500mA cada una, protegidas contra cortocircuitos y picos de cargas inductivas. Estas señales comandan contactores, cuyos contactos de actuación se colocan en serie a los preexistentes en las unidades encajonables, se manera que tanto el SIA como el SPR disporen las válvulas pilotos en forma independiente.

### 2.3.5 Señales serie LVC 3.3V/Óptico

Todas las señales de comunicación serie son de tipo asincrónica, de parámetros 921600/8-N-1: 8 bits de datos (1 byte), sin bits de paridad, 1 bit de stop. La tasa de transferencia es de 921600 bits/seg. Los bits de datos son precedidos por un bit de start y están ordenados de manera de enviar primero el bit menos significativo  $b_0$ :



**Figura 5.** Formato de transmisión asincrónico serie utilizado en el SIA.

De este modo, el tiempo de transferencia de cada byte  $b_7..b_0$  es  $T_{\text{BYTE}}=10.85\mu\text{seg}$ , ya que por cada byte se requieren 10 bits (start +  $b_7..b_0$  + stop).

En el SIA la información no es transmitida en forma de bytes aislados, sino agrupados formando **tramas**.

En las señales de transmisión serie de tipo LVC 3.3V, el '1' lógico se corresponde al nivel alto eléctrico y viceversa; en las transmisiones vía canal óptico, el '1' lógico coincide con la presencia de luz en el canal.

### 2.3.5.1 Algoritmos de Chequeo de Trama

Para el chequeo de tramas serie recibidas por los módulos se utiliza el algoritmo CRC. Para las tramas cortas (hasta 2 bytes de longitud) se utiliza un CRC-5, y para las demás tramas el CRC-14.

### 2.3.6 Verificación de inserción de los módulos

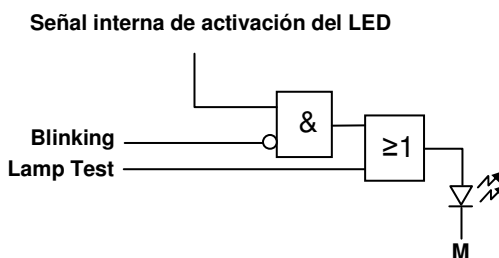
Se realiza la verificación de inserción de los módulos de la misma manera que la implementa Teleperm C.

La placa de interconexionado hila una señal digital de 24V suministrada en uno de los extremos de esta placa, y dentro de cada módulo se conecta el par de pines correspondiente de manera de darle continuidad a la señal y obtener los 24V del otro extremo si todos los módulos están correctamente conectados.

### 2.3.7 Indicaciones del Frente del Módulo

Todos los módulos que poseen LEDs de indicación en el frente, implementan la lógica que se observa en la Figura 6. La señal de *Blinking* permite sincronizar el parpadeo de todos los LEDs mientras que *Lamp Test* se utiliza para verificar que los LEDs funcionen correctamente.

En operación normal todos los LEDs se encuentran apagados, siguiendo con el mismo criterio de funcionamiento de la instrumentación de la central.



**Figura 6.** Lógica de LEDs de indicación de los frentes de módulo.

### 2.3.8 Generación de Fallas

Las señales de falla presentes en el sistema tienen las siguientes características en común:

- Son del tipo activo por bajo.
- Son *no registradas*, por lo que dejan de estar activas cuando desaparece la condición de falla.

- Tienen una duración mínima de **100ms** (por lo que si la condición de falla tiene duración menor a 100ms, la señal de falla permanecerá activa hasta cumplir con dicho tiempo). La duración mínima de 100ms también está asegurada en el caso que la señal de falla se transmita por una trama serie.
- No existe relación alguna entre las señales de falla y la señal **reset** (las fallas no son reseteadas por dicha señal).
- Todos los módulos que generan fallas disponen de uno o varios LEDs de anuncio de fallas en el frente del módulo. Estos LEDs también son afectados por las señales *Blinking* y *Lamp Test*, mencionadas en la Sección 2.3.7.

### 2.3.9 Tiempos de respuesta

Los requerimientos mínimos de tiempo de respuesta del sistema se detallan en la Tabla 1.

Tiempo parcial	Tiempo
Tiempo de respuesta del sensor de presión	10 ms
Tiempo de respuesta de la unidad de comparación	2 ms
Tiempo de respuesta de la unidad de votación	1 ms
Tiempo de respuesta de la unidad de driver	0.3 ms
Tiempo de respuesta de la unidad encajonable	15 ms
Tiempo de extinción de la corriente de la válvula piloto	3 ms
Tiempo de respuesta total	31.3 ms

**Tabla 1.** Tabla de tiempos de respuesta requeridos del sistema.

## 2.4 Descripción de los módulos del sistema

Para implementar el sistema se diseñaron un conjunto de módulos, lo cuales se describen brevemente a continuación

### 2.4.1 Módulo Acondicionador De Señales

Este módulo realiza cuatro funciones:

- Alimentar un transmisor de corriente 4 – 20mA, tomar su señal y convertirla a una señal de tensión 2V – 10V.
- Generar 4 señales de tensión de 2V – 10V de los parámetros del algoritmo de detección “A”, “B”, “LA” y “CPA” que se describen más adelante. Los mismos son variables desde el frente del módulo a través de potenciómetros a tornillo que no sobresalen del frente del módulo.
- Generar una señal de corriente de 4 – 20mA copia de la señal de entrada aislada galvánicamente.
- Generar dos salidas serie LVC 3.3V que corresponden a las señales de test y reset para los módulos de Comparación y Disparo. La señal test está normalmente en ‘1’ lógico y se pone en cero cuando se cortocircuita el jumper TEST; mientras que la señal reset esta normalmente en ‘0’ y se pone en ‘1’ cuando se presiona el pulsador de RESET. Ambos accionamientos están presentes en el frente del módulo.

El módulo genera 6 señales de salidas analógicas cuyos rangos se detallan a continuación:

Parámetro	Descripción	Rango (Volt)	Rango magnitud original
<b>P</b>	Señal de presión, proveniente del sensor y convertida a voltaje por el módulo acondicionador	2.0 - 10.0	0 - 150 bar
<b>A</b>	Máxima pendiente negativa permitida	2.0 - 10.0	0 – 50 bar/s
<b>B</b>	Máxima pendiente positiva permitida	2.0 - 10.0	0 – 50 bar/s
<b>CPA</b>	Máxima discrepancia aceptada entre la presión actual y la presión con limitación de pendiente, sin que el algoritmo genere disparo.	2.0 - 10.0	0 – 150 bar
<b>LA</b>	Mínimo valor de presión por debajo del cual el algoritmo no produce disparos.	2.0 - 10.0	0 – 150 bar
<b>Ref</b>	Voltaje de referencia de módulo acondicionador.	10.0	10V

**Tabla 2.** Señales analógicas generadas por el Módulo Acondicionador de Señales.

La conversión que corriente-tensión que realiza este módulo para la señal de entrada de presión P es:

$$V_P = 0.5 \frac{V}{mA} I_P$$

#### 2.4.2 Módulo De Comparación Y Disparo

La función principal de este módulo es procesar las señales de entrada y los parámetros provenientes del módulo Acondicionador de Señales, de modo de generar la señal de disparo de cada sensor. Este módulo está diseñado para ingresar *dos conjuntos* de señales de presión y sus parámetros asociados.

Cabe aclarar que la señal de disparo de cada sensor no genera por sí sola la actuación del sistema de extinción, pues ella se conecta a los módulos de votación 2 de 3 (módulos que sí pueden hacer actuar las válvulas piloto cuando se den las condiciones de disparo).

Para cumplir con los requerimientos de *diversidad*, existen dos implementaciones del módulo de Comparación y Disparo, cada uno utilizando tecnologías diferentes.

El módulo también posee funciones de auto-verificación y verificación cruzada; ésta última encargada de comparar su funcionamiento con el del módulo diverso, presente en el mismo tren.

##### 2.4.2.1 Algoritmo de Detección de Caída Abrupta de la Presión

El algoritmo implementado en el módulo corresponde a una versión digital del sistema analógico Siemens [14], cuyo principio de funcionamiento se analizó en [15].

Por cada loop ingresan al módulo las siguientes señales analógicas:

**P:** valor de presión proveniente del sensor

**LA:** valor de limitación de la presión

**CPA:** margen de disparo

**A:** máxima derivada negativa aceptable

**B:** mínima derivada positiva aceptable

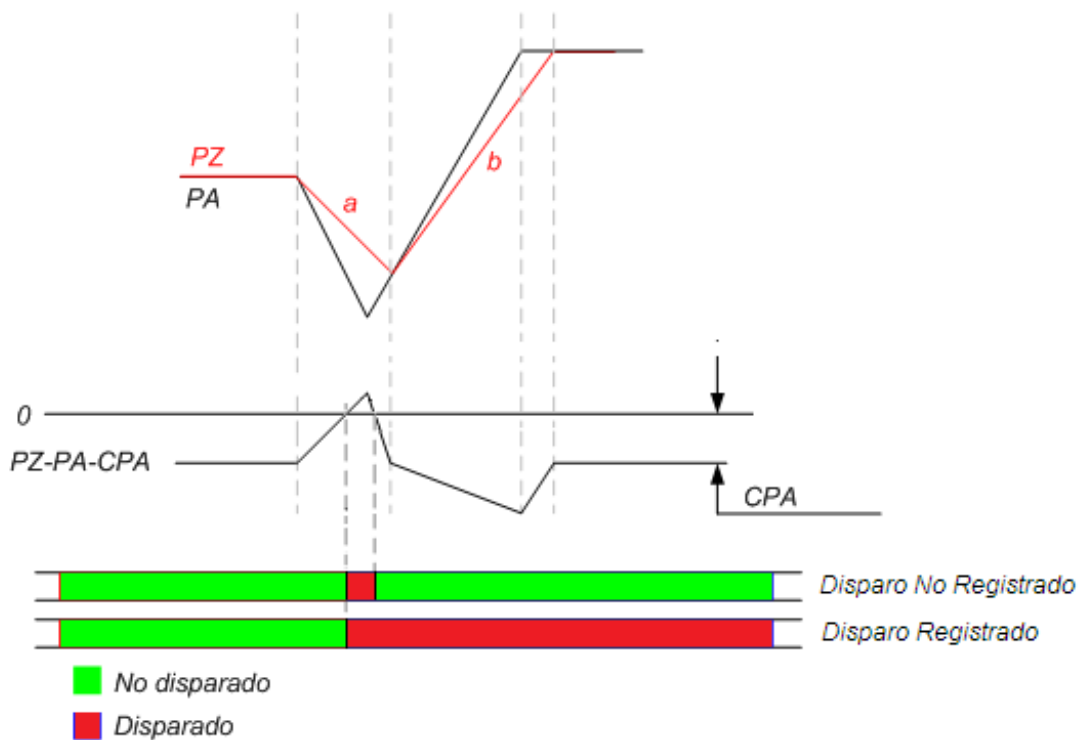
La función del algoritmo es detectar una caída de presión y generar una señal de disparo. La señal de presión  $P$  se compara con el valor de  $LA$ , obteniéndose  $PA$  como el máximo entre ambos:  $PA = \max(P, LA)$ . De esta forma, se establece un límite inferior de modo que el algoritmo no produzca disparo para valores de presiones por debajo de  $LA$ .

Luego, a partir de  $PA$ ,  $A$  y  $B$  se calcula  $PZ$  como una versión limitada en derivada de  $PA$ , es decir que  $PZ$  seguirá a  $PA$  teniendo en cuenta los máximos gradientes  $A$  y  $B$ .

El algoritmo producirá un disparo cuando  $PZ-PA$  sea superior al margen de disparo  $CPA$ , es decir:  $PZ-PA-CPA > 0 \rightarrow$  **disparo**. Un ejemplo de esto puede observarse en la Figura 7.

Se puede ver también en esta figura que se generan dos señales, una de Disparo Registrado y otra de No Registrado. La reposición de la primera se realiza a través de la señal *reset* enviada desde sala de control y acondicionada en el Módulo de Entradas/Salida. La detección de un pulso de *reset* excesivamente largo produce falla, para exponer un posible error de cableado.

La reposición a través de la señal *reset* se hace efectiva sólo si la señal de Disparo No Registrado está a la condición de No disparado



**Figura 7.** Ejemplo de la Evolución del Algoritmo de Detección de Caída Abrupta de la Presión.

Al Módulo de Votación es enviada la señal de Disparo Registrado a través de una trama corta de dos bytes de manera serializada (señal *result*). Esta trama contiene la información de los Disparos Registrados de los dos loops.

### 2.4.2.2 Discrepancia entre diversidades

El módulo Comparación y Disparo cuenta con una unidad de verificación cruzada, cuyo propósito es detectar disparidades en el funcionamiento de las 2 diversidades presentes en el tren. Esta unidad se encuentra presente en ambas diversidades y la comunicación entre ellas es vía transmisión serie (mediante dos líneas serie unidireccionales). La información que se envía en estas líneas series es idéntica al que se envía a los Módulos de Votación (señal *result*).

La detección de discrepancias produce señalización de falla y disparo del sensor en cuestión.

### 2.4.2.3 Señal *result*

La información de los disparos es transmitida a los módulos de votación de todos los trenes a través de la señal *result*. Por ella se envía de manera serializada la condición de Disparo Registrado de cada una de las dos señales de presión procesadas por el módulo (DISP\_REG\_C1 y DISP\_REG\_C2).

Por *result* también se envía el número de tren (NRO\_TREN) en el que se encuentra el módulo (configurado por llaves selectoras), el número de diversidad (NRO\_DIVER), el pedido de Test ingresado a través del pin t\_Tren\_3V3 (TEST\_TREN) y finalmente un campo de chequeo de trama (CHK\_RESULT). La trama consta de 2 bytes y su conformación se puede ver en la Figura 8.

Byte 0					Byte 1			
7	6-5	4	3-2	1-0	7	6	5	4-0
B7	NRO_TREN	NRO_DIVER	DISP_REG_C1	DISP_REG_C2	B7	B6	TEST_TREN	CHK_RESULT

**Figura 8.** Información de la trama de la señal serie *result*.

### 2.4.2.4 Señal *estado* del Módulo de Comparación y Disparo

A través de la señal *estado* se transmite de modo serializado la información correspondiente al estado interno del módulo. La trama serie consta de 25 bytes, tal como se detalla en la Figura 9.

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3
CÓDIGO INICIO DE TRAMA	CÓDIGO ÚNICO DE MÓDULO	VERSIÓN DE FIRMWARE	#TREN   # DIVERSIDAD   CÓD DISP REG C1 & C2
Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
DISP NO REG C1 & C2   TESTS C1 & C2 & TREN	PRESIÓN C1	PZ C1	LA C1
Byte 8	Byte 9	Byte 10	Byte 11
CPA C1	A C1	B C1	Vref C1
Byte 12	Byte 13	Byte 14	Byte 15
PRESIÓN C2	PZ C2	LA C2	CPA C2
Byte 16	Byte 17	Byte 18	Byte 19
A C2	B C2	Vref C2	RESET   FALLAS
Byte 20	Byte 21	Byte 22	Byte 23
TRAMAS FALTANTES EN SEÑAL <i>checkIn</i>	DEBUG	DEBUG	CRC14 [6-0]
Byte 24			
CRC14 [13-7]			

**Figura 9.** Información de la trama estado del Módulo de Comparación y Disparo.

Se puede observar que por esta vía se transmite el valor medido de las señales cada una de las presiones (resaltado en la Figura 9). Esta información es utilizada durante el proceso de verificación del sistema, la cual es leída a través del Módulo Registrador donde confluye la información de todas las señales de estado del sistema.

#### 2.4.2.5 Codificación digital de señales analógicas para las tramas de estado

Las señales analógicas tienen su rango definido en la Tabla 2. Una vez codificadas, estas señales se transmiten en 8 bits según la siguiente regla:

$$Valor\ Codificado = \begin{cases} 0 & , V_{Medida} < 2V \\ \lfloor (V_{Medida} - 2V) \cdot 25 \frac{cuentas}{V} \rfloor & , 2V \leq V_{Medida} < 10,20V \\ 254 & , V_{Medida} > 10,20V \end{cases}$$

#### 2.4.3 Módulos Transmisor Y Receptor De Fibra Óptica

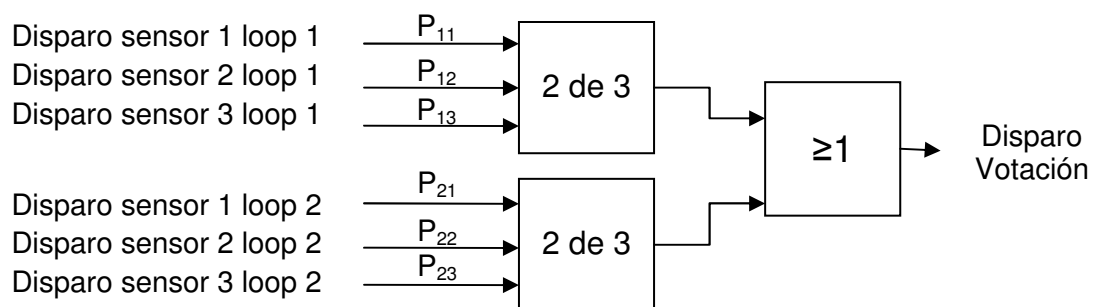
Los módulos de Transmisión y Recepción de Fibra Óptica cumplen la función de interconectar todos los trenes entre sí. La velocidad máxima del par transmisor - receptor es de 1Mbit/s. Cada módulo consta de cuatro canales independientes. La distancia del tramo de fibra óptica entre un transmisor y un receptor puede variar entre 0 y 1000m con una tasa de error (BER) menor a  $10^{-9}$  para fibra óptica 62.5/125 $\mu$ m multimodo de vidrio (no plástico).

#### 2.4.4 Módulo De Votación

El módulo votador recibe cuatro tramas, cada una correspondiente a un tren, con la información de los disparos de las señales que se monitorean en cada tren, calculados por el módulo Comparación y Disparo del mismo tipo de diversidad.

Al igual que el módulo de Comparación y Disparo, el Módulo de Votación también cuenta con 2 diversidades que utilizan tecnologías diferentes.

La función principal del módulo es hacer la votación 2 de 3 con los disparos correspondientes a la misma variable de presión, y generar una señal *Disparo Votación*, si en al menos una de las variables se da esa condición. El disparo es registrado y se repone mediante la señal *reset* enviada desde sala de control. En la Figura 10 se esquematiza la función lógica.



**Figura 10.** Función Principal del Modulo de Votación.

El módulo recibe cuatro tramas *result* provenientes de los cuatro trenes, que se generaron en módulos de Comparación y Disparo de la misma diversidad que la del Módulo de Votador en cuestión. En caso de no corresponder a la misma diversidad, se genera una falla.

Además el módulo envía su estado interno a través de la trama *estado del Módulo de Votación* en forma serializada al módulo Concentrador del tren.

Entre las diversidades de los Módulos de Votación se intercambian tramas series de 2 bytes con la información del resultado de la lógica, el número de tren configurado y la diversidad. Si cualquiera de los dos primeros difiere o si la diversidad es la misma, el módulo genera una señal de falla que se indica en el LED Falla 1.

También se genera señal de falla en los casos de:

- Desconexión de cualquiera de las entradas de *result*, para la detección de problemas del interconexión de fibra óptica y/o los módulos transductores.
- Recepción desde un tren distinto al esperado en alguna entrada, o por recibir de un tipo de diversidad distinta a la del módulo, para la detección de una configuración incorrecta del interconexión entre trenes.
- Error de autochequeo, mediante el cual se verifica dinámicamente el correcto funcionamiento de la señal de Disparo Votación.
- Detección de un pulso de *reset* excesivamente largo, para la detección de problemas de cableado de planta u operación errónea de este comando.
- La detección de pedidos de Test de Tren simultáneos en varios trenes.

Este segundo grupo de fallas se indican en el LED Falla 2.

#### 2.4.5 Módulo Driver De Potencia

Las funciones de este módulo son:

- Resolver las dos diversidades mediante lógica *1 de 2* entre los disparos de las unidades de votación de modo de generar la señal de *Disparo de tren*.
- Comandar 4 contactores que accionan a su vez las válvulas piloto.
- Obtener las señales de retroaviso de cada contactor y realizar una lógica de detección de fallas.
- Proveer de aislación galvánica módulo-contactor y contactor-contactor.

La resolución de las señales provenientes de los votadores diversos se realiza con electrónica de lógica discreta, la cual comanda 4 relés de estado sólidos aislados ópticamente, con una capacidad de corriente de 1A.

A su vez, por cada salida de comando a contactor existe una unidad para leer una señal de *retroaviso* de 24V, también aislado ópticamente de las señales locales al módulo. Dicha señal es utilizada para detectar una posible falla del contactor y generar una lógica de fallas. Esta lógica de fallas está implementada por un Dispositivo Lógico Configurable tipo CPLD. Este tiene además la capacidad de verificar el correcto funcionamiento de la lógica discreta 1 de 2 que resuelve las señales provenientes de las diversidades.

La indicación de falla y el estado de disparo se envían al Módulo Concentrador del Tren como señales digitales binarias, de modo que éste las incorpore a las tramas de estado.

## 2.4.6 Concentrador Del Tren

Cada tren del SIA cuenta con 4 módulos que dan información de su estado interno a través de una línea de comunicación serie. Éstos son: los dos módulos diversos de Comparación y Disparo y los dos módulos diversos de Votación. El Concentrador del Tren toma la información contenida en estas 4 líneas y genera una única salida serie con todos los datos.

Además, este módulo tiene la función de detectar discrepancias de los valores analógicos digitalizados por ambas diversidades de los módulos de Comparación y Disparo.

A la trama de salida se le agrega la información interna de este módulo, resultado de las detecciones de discrepancia entre diversidades, y el estado de algunas variables del tren, como ser el disparo final de los Drivers de Salida, la falla del módulo de Drivers, las fallas de los módulos Acondicionadores de Señales y la falla de los módulos de Entrada-Salida

La línea de salida serie envía a los módulos de Transmisión por Fibra Óptica, para que la información del tren sea transmitida vía fibra óptica al módulo Registrador de Datos.

### 2.4.6.1 Señal de Transmisión de Estado Global del Tren

A través de la trama *Estado Global del Tren* se transmite de modo serializado hacia el Comparador de Sensores y el Registrador de Datos la información correspondiente al estado interno del tren. Los datos transmitidos son los siguientes:

La trama serie consta de 86 bytes, tal como se detalla en la Figura 11.

Byte 0	Bytes 1 – 22		
COMIENZO DE TRAMA (FFh)	ESTADO INTERNO DEL MÓDULO COMPARACIÓN Y DISPARO DIVERSIDAD #1		
Bytes 23 – 44			
ESTADO INTERNO DEL MÓDULO COMPARACIÓN Y DISPARO DIVERSIDAD #2			
Bytes 45 - 58		Bytes 59 - 72	
ESTADO INTERNO DEL MÓDULO VOTACIÓN DIVERSIDAD #1		ESTADO INTERNO DEL MÓDULO VOTACIÓN DIVERSIDAD #2	
Byte 73	Byte 74	Byte 75	Byte 76
CÓDIGO ÚNICO DE MÓDULO	VER. FIRMWARE CONCENTRADOR TREN	SEÑALES DIGITALES VARIAS	N_TRAMAS_FALTANTES_CyD1
Byte 77	Byte 78	Byte 79	Byte 80
N_TRAMAS_FALTANTES_CyD2	N_TRAMAS_FALTANTES_VOT1	N_TRAMAS_FALTANTES_VOT2	FALLA #0   SUBTIPOS DE FALLA #1
Byte 81	Byte 82	Byte 83	Byte 84
SUBTIPOS DE FALLA #2	SUBTIPOS DE FALLA #3	DEBUG	CRC-14 [6-0]
Byte 85			
CRC-14 [13-7]			

**Figura 11.** Información de la trama Estado Global del Tren.

La descripción completa de todos los campos se encuentra en [10]. Aquí solo se observará que los campos resaltados tienen la información proveniente de los Módulos Comparación y Disparo (cuyo detalle se puede ver en la Figura 9), los cuales se usarán en el proceso de Verificación.

#### 2.4.7 Módulo Comparador De Sensores

El Módulo Comparador de Sensores está situado en el Tren de Registro habiendo solo uno para todo el sistema. Éste tiene por función recibir los datos de cada uno de los Módulos Concentrador del Tren de los cuatro trenes de medición, sincronizarlos y reenviar esa información al Módulo Registrador de Datos

También tiene como función la comparación de los valores de los parámetros y de las presiones que obtuvo cada Tren de Medición, y verificar que tengan una diferencia menor a un valor dado por configuración a través de interruptores disponibles en el módulo. Las comparaciones se realizan entre parámetros y señales de presión de un mismo loop.

El módulo genera a partir de las tramas que recibe, dos tramas que representan el estado del sistema. Una de estas tramas, llamada *estadoSPR1*, se genera cada 1 ms y contiene los valores de todas las mediciones de presión. La segunda trama, llamada *estadoSPR2*, es más completa; pero debido a su longitud se genera cada 40 ms. Esta segunda trama está conformada por las tramas de los concentradores de los cuatro trenes de manera consecutiva, más el resultado de las comparaciones realizadas en este módulo.

En la Figura 12 se observa el formato de la trama generada en *estadoSPR2*, transmitida hacia el Registrador de Datos cada **40ms**, donde se pueden ver resaltados los campos que se utilizarán en el proceso de Verificación.

Byte 0	Bytes 1 – 86	Bytes 87 – 173	Bytes 174 – 260
<b>COMIENZO DE TRAMA (255)</b>	<b>DATOS CONCENTRADOR TREN 1</b>	<b>DATOS CONCENTRADOR TREN 2</b>	<b>DATOS CONCENTRADOR TREN 3</b>
Bytes 261 – 347	Byte 348	Byte 349	Byte 350
<b>DATOS CONCENTRADOR TREN 4</b>	<b>INDICADOR DE DATOS VÁLIDOS (0-15)</b>	<b>VALOR DE DERIVA CONFIGURADO (1 - 17)</b>	<b>DERIVA ALCANZADA EN P (0 - 127)</b>
Byte 351	Byte 352	Byte 353	Byte 354
<b>DERIVA ALCANZADA EN A (0 - 127)</b>	<b>DERIVA ALCANZADA EN B (0 - 127)</b>	<b>DERIVA ALCANZADA EN LA (0 - 127)</b>	<b>DERIVA ALCANZADA EN CPA (0 - 127)</b>
Byte 355	Byte 356	Byte 357	Byte 358 - 381
<b>FALLAS (0 – 5)</b>	<b>CRC-14[6..0] (0 - 127)</b>	<b>CRC-14[13..7] (0 - 127)</b>	<b>CONTADOR DE TRAMA (64BITS EN 10 BYTES)</b>

**Figura 12.** Formato de la trama completa de estado del SPR (*estadoSPR2*).

Después del CRC, se agregó un contador de tramas enviadas a modo de marca de tiempo, ya que cada incremento de éste significa 40ms. Esta necesidad surgió durante el proceso de Verificación de la Integración del Sistema, debido a que este módulo tiene mejor precisión temporal que el Módulo Registrador y que la PC que lee los datos a través del puerto Ethernet.

#### 2.4.8 Módulo Registrador de Datos

El módulo Registrador de Datos tiene la función de guardar los datos de todo el sistema. El mismo está colocado en el Tren de Registro y recibe dos tramas del Módulo Comparador de Sensores con la recopilación de datos de las 4 tramas de estado que envía cada Tren de Medición. El Módulo Registrador de Datos guarda los datos de ambas tramas en memoria no volátil tipo SD y retransmite la trama *estadoSPR2*, la cual contiene toda la información del sistema. Esta señal se envía a una placa de Transmisión de Fibra Óptica para que de esta manera llegue a la instrumentación de la central aislada galvánicamente.

Además, el módulo tiene un puerto Ethernet y uno USB en el frente del mismo, mediante los cuales se pueden extraer los datos guardados.

#### 2.4.8.1 Almacenamiento de Datos

Mediante la utilización de una memoria no volátil SD de 8GB se guardan las tramas recibidas (que sean distintas a la última guardada) por las dos señales serie de entrada en forma circular. De esta manera se mantendrán registrados los datos completos que llegan a este módulo al menos 180 días.

#### 2.4.8.2 Interfaz Ethernet

El frente del módulo tiene disponible un conector Ethernet el cual tiene 2 funciones principales. La primera es la presentación de una página web con todos los datos actuales y la posibilidad de bajar los registros desde la memoria SD. La segunda es la retransmisión de las tramas de *estadoSPR2* a través del protocolo UDP.

Para acceder a la página web se utiliza un explorador estándar al puerto 80 de la IP que haya quedado configurada el Módulo Registrador de Datos.

Para leer las tramas retransmitidas por UDP es necesario primero conectarse al registrador por TCP al puerto 4000. Luego de eso el registrador enviará las tramas por UDP al puerto 4001 de la IP que inició la conexión TCP.

#### 2.4.8.3 Interfaz USB

Al colocar un dispositivo PenDrive en el conector USB del frente del módulo, se copiarán automáticamente todos los registros disponibles en la memoria SD.

#### 2.4.9 Módulo Adaptador de Entrada/Salida

La función del módulo es adaptar las señales de 24V que entrega la central a 3.3V para su distribución a los módulos que las requieran, y a su vez adaptar las señales de 3.3V generadas por éstos a niveles de tensión y corriente aceptables para su interfaz con la central.

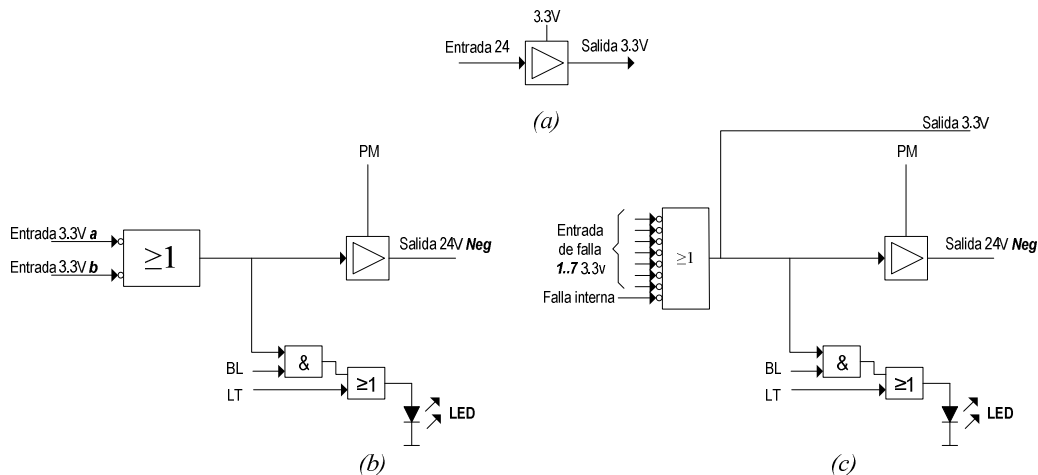
El módulo realiza 3 funciones principales

- a) Convertir señales de 24V a 3.3V para ser leídas por los módulos del tren, (ver Figura 13a). El módulo dispone de 4 de estos adaptadores de nivel, dos de cuales tienen la tarea de adaptar los niveles de las señales de *Blinking* y *Lamp Test* de modo de generar sus versiones de 3.3V y distribuir las a los demás módulos del tren que posean LEDs en sus frentes.
- b) Resolver las señales de disparo provenientes de los módulos diversos, generando una señal de 24V activa en bajo cuando se produce el disparo de cualquiera de ellos. Esta función enciende además un LED en el frente del módulo.

Cada módulo posee 7 conjuntos como los mostrados en la Figura 13b. Cada uno recibe 2 señales estáticas de tipo *activo en bajo*. Cuando cualquiera de ellas se activa (es decir, pasa de '1' a '0'), se activa entonces la señal de salida de 24V *activa en bajo*.

- c) Resumir las señales de fallas de 3.3V, provenientes de todos los módulos del tren que generan fallas, generando una única señal de falla. El módulo posee 7 señales de entrada de falla de 3.3V y también genera una falla propia en el caso que se dé la condición. Todas estas señales son activas en bajo. La señal resumida de falla de 3.3V está disponible a la salida del módulo, también activa en bajo, lo que permite encadenar las señales de falla en múltiples módulos de Entrada/Salida.

El módulo genera la versión en 24V de la señal de resumen de falla, encendiendo además un LED en el frente del módulo.



**Figura 13.** Funciones principales del Módulo Adaptador de Entrada/Salida.

Todas las entradas, tanto las de 24V como las de 3.3V, tienen una resistencia de pull-down para asegurar un cero lógico en caso de desconexión.

#### 2.4.10 Sustituto de Acondicionador de Entradas

Debido a que los Trenes de Medición 1 y 4 tienen un único sensor, y por lo tanto necesitan sólo un Módulo Acondicionador de Señales, fue necesario colocar un módulo sustituto para que no se genere señal de falla por la ausencia del mismo.

### 2.5 Trenes de Medición

Se generaron 3 variantes de Tren de Medición dependiendo de los sensores que ingresan a cada uno. Éstos se resumen en la 2.5.1.

La unidad HP que se menciona en la tabla, se refiere a *Horizontal Pitch* de la norma Eurocard y equivale a  $0.2'' = 5.08\text{mm}$ . Un subrack Eurocard estándar de  $19''$  contiene 84HP de espacio útil interno.

En el Anexo 1 se muestra una vista de frente del Tren de Medición Variante B.

Ubicación en Subrack [HP]	Denom. Ubicación	Tren de Medición Variante A	Tren de Medición Variante B	Tren de Medición Variante C
1-4	M01	Frente Ciego Eurocard 4HP		
5-8	M02	Frente Ciego Eurocard 4HP		
9-12	M03	Adaptadora de E/S		
13-18	M04	Acondicionador de señales 1	Acondicionador de señales 1	Sustituto Acondicionador de Señales
19-24	M05	Sustituto Acondicionador de Señales	Acondicionador de señales 2	Acondicionador de señales 2
25-28	M06	Comparación y Disparo Diversidad #1		
29-32	M07	Comparación y Disparo Diversidad #2		
33-36	M08	Transmisor de Fibra Óptica 1		
37-40	M09	Transmisor de Fibra Óptica 2		
41-44	M10	Receptor de Fibra Óptica 1		
45-48	M11	Receptor de Fibra Óptica 2		
49-52	M12	Votador Diversidad #1		
53-56	M13	Votador Diversidad #2		
57-60	M14	Concentrador de Datos		
61-66	M15	Driver de Potencia		
67-72	M16	Frente Ciego Eurocard 6HP		
73-78	M17	Frente Ciego Eurocard 6HP		
79-84	M18	Frente Ciego Eurocard 6HP		

### 2.5.1 Conformación de las 3 variantes de Trenes de Medición. Placa de Interconexión

Se desarrolló una placa de interconexión que resuelve todo el entrecruzamiento de señales entre módulos de un mismo tren. Esta placa sirve para las 3 variantes de trenes mencionadas en el punto anterior.

Además de respetar los conectores para cada uno de los módulos con sus posiciones predefinidas, la placa de interconexión tiene:

- 2 conectores Eurocard extras que sirven para conectar las señales hacia fuera del tren de medición:
  - El primero está ubicado en la posición M01 y contiene todas las señales de 24V digital y las señales de entrada de presión 4-20mA. Éste es un conector Eurocard con pines pasantes Wire Rap, con doble funcionalidad ya que se le puede conectar un Módulo Bornera desde el frente o se puede conectar mediante Wire Rap por detrás de la placa de interconexión. La primera funcionalidad da prestaciones durante la puesta en marcha y verificaciones del equipo, dado que es enchufable; mientras que la segunda fue solicitada por requerimiento de CNAII ya que es la manera estándar que cablean los subracks Eurocard.

- El segundo, que está en la posición M16, tiene las señales de potencia de salida de los drivers y los retroavisos de los contactores. A priori este conector no se utiliza en el sistema instalado, pero el mismo sirve para alimentar módulos extras en el proceso de verificación como se verá más adelante (Módulo Emulador de Sensores, Sección 3.2.2)
- Bornera enchufable de 4 contactos Phoenix Contact línea Combicon para la alimentación del subrack
- 4 Borneras enchufables de 3 contactos Phoenix Contact línea Combicon para las salidas de potencia que comandan los contactores y retroavisos de los mismos.

## 2.6 Tren de Registro

Como se comentó en la sección 0 el sistema contiene un 5to subrack no redundado que se ubicará en algún de los trenes de instrumentación de la central. La conformación de este subrack se detalla en la siguiente tabla.

Ubicación en Subrack [HP]	Denominación Ubicación	Módulo
1-4	M01	Frente Ciego Eurocard 4HP
5-8	M02	Frente Ciego Eurocard 4HP
9-12	M03	Adaptadora de E/S
13-16	M04	Transmisor de fibra óptica
17-20	M05	Receptor de fibra óptica
21-24	M06	Comparador de Sensores
25-32	M07	Registrado de Datos
33-36	M08	Frente Ciego Eurocard 4HP
37-60	M09	Frente Ciego Eurocard 24HP
61-84	M10	Frente Ciego Eurocard 24HP

**Tabla 3.** Conformación del Tren de Registro.

## 2.7 Sistema Integrado

El SIA queda conformado por 4 Trenes de Medición, un Tren de Registro y el interconexiónado de fibra óptica que entrecruza las señales entre los distintos trenes [16].

## 3. Desarrollo

### 3.1 Introducción

Dentro del conjunto de elementos necesarios para realizar el proceso de verificación se destaca el desarrollo de un módulo con la capacidad de generar 6 señales de corriente que emulan los sensores de presión. Además, se utilizó un equipo National Instruments NI CompactDAQ que tiene la capacidad de controlar 32 salidas y de leer 64 entradas digitales de 24V mediante las cuales se controlan y adquieren todas las señales digitales que intercambia el SIA con la instrumentación de planta. Tanto el equipo NI CompactDAQ como el módulo emulador de sensores pueden ser controlados mediante conexión USB desde una PC.

Todo esto se montó en conjunto con los 5 racks que componen el SIA y 16 contactores similares a los que se utilizarán en la planta.

Se desarrolló un software que controla ambos equipos en forma conjunta, de manera que generen las señales necesarias para hacer funcionar al SIA como si estuviera instalado en la planta, de manera de someter al sistema a condiciones extremas de operación, verificando su correcto funcionamiento

En la sección 3.2 se describe el equipamiento utilizado para realizar la verificación; en la 3.3 se describe el montaje de estos elementos en conjunto con el SIA. En la sección 3.4 se describe el software desarrollado como interfaz de la PC para la comunicación centralizada con los dispositivos y las capacidades del mismo.

Por último, en la sección 3.5 se detallan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos.

### 3.2 Equipamiento Utilizado

#### 3.2.1 National Instruments NI CompactDAQ

Para la generación y lectura de las señales digitales de 24V se utilizó un equipo National Instruments NI CompactDAQ con interfaz USB, equipándolo con los módulos correspondientes para interconectar con este tipo de señales. El listado de componentes que conformaron este equipo se puede ver en la Tabla 4.

Cantidad	Componente	Descripción
1	cDAQ-9174 (NI P/N: 781157-01)	Chasis CompactDAQ de 4 Slots con conectividad USB
2	NI 9425 (NI P/N: 779139-01)	Módulo con 32 Entradas Digitales de 24V
1	NI 9476 (NI P/N: 779140-01)	Módulo con 32 Salidas Digitales de 24V

**Tabla 4.** Listado de componentes NI CompactDAQ

Para diseñar el interconexionado con el sistema se tuvieron en cuenta los manuales de los módulos [17][18].

#### 3.2.2 Emulador de Sensores

Se desarrolló un módulo Eurocard con la capacidad de generar 5 señales independientes de corriente compatible con las entradas del Acondicionador de Señales de SIA descrito en la sección 2.4.1.

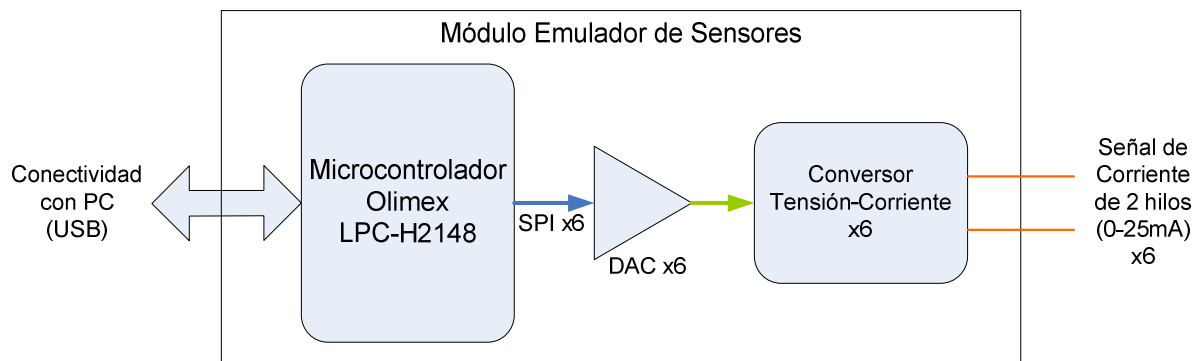
El módulo contiene un microprocesador Olimex LPC-H2148 tipo ARM7, el cual tiene conectividad USB y pines digitales programables. A través de estos últimos se realizó el manejo de 6 conversores digitales-analógicos(DAC) independientes DAC7513 de 12bits de resolución, accesibles mediante protocolo SPI.

La salida del DAC es una salida de tensión, la cual es convertida a señales de corrientes 0-25mA mediante integrados adecuados para ello. Este rango de salida permite probar tanto la excursión válida del rango del sensor (4-20mA) como rangos de fallas.

Tanto el conector USB como las borneras con las señales de corriente son accesibles desde el frente del módulo.

El módulo se alimenta de 24V por los pines del conector Eurocard de manera similar a los módulos diseñados para el SIA (ver sección 2.3.1). Esto permite que el módulo sea colocado para funcionar en uno de los conectores de conexión derecho de cualquiera de los Trenes de Medición del SIA (ver sección 2.5.1) que no son utilizados por el sistema.

Tanto el DAC como el circuito conversor tensión-corriente tienen una respuesta más rápida que los sensores reales estipulados en los requerimientos del sistema (ver sección 2.2.1) permitiendo emular cualquier curva de presión requerida.



**Figura 14.** Esquema del Módulo Emulador de Sensores

### 3.2.2.1 Conversiones de Valores en el Módulo Emulador de Sensores

De la hoja de datos del DAC7513 se obtiene que:

$$V_{DAC} = \frac{V_{Ref}}{4096} N_{DAC}$$

Donde:

$V_{DAC}$  : Tensión de Salida del DAC

$V_{Ref}$  : Tensión de Referencia Utilizada

$N_{DAC}$  : Valor binario de entrada al DAC

La referencia de tensión es el integrado SC431CSK-.5TRT, acondicionando a través de un operacional de precisión en configuración doblador de tensión.

$$V_{Ref} = 2 \times V_{SC431} = 2 \times 2.495V = 4.99V$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$V_{DAC} = \frac{4.99V}{4096} N_{DAC} = 1.2183 \cdot 10^{-3} V N_{DAC}$$

Luego el circuito que convierte de tensión a corriente tiene una constante de 5mA/V, llegando a que la conversión final a corriente de salida  $I_S$  es:

$$I_S = \frac{5\text{mA}}{\text{V}} V_{DAC} = \frac{5\text{mA}}{\text{V}} 1.2183 \cdot 10^{-3} \text{V} N_{DAC} = 6.0913 \cdot 10^{-3} \text{mA} N_{DAC}$$

### 3.2.2.2 Dispersión de Errores de los valores de conversión

Los errores asociados a las constantes individuales de conversión se resumen en la siguiente tabla:

Componente Electrónico		Error asociado
Tensión de referencia SC431CSK-.5TRT		0.5%
Amplificador No inversor X2		1%
DAC7513		1.85%
Convertor Tensión	AD8212	0.1%
Corriente	Resistencia shunt	1%
<b>TOTAL</b>		<b>4.45%</b>

**Tabla 5.** Errores en la conversión de valores en el Módulo Emulador de Sensores sin calibrar.

Para reducir este error a un valor compatible con esta aplicación se recurre a un proceso de calibración por tabla.

### 3.2.2.3 Calibración del Módulo Emulador de Sensores

Se realizó la calibración de las 6 salidas de corriente para el módulo fabricado, tomando 14 valores por señal. A continuación se puede ver la tabla con los valores medidos.

$N_{DAC}$	Salida 1 [mA]	Salida 2 [mA]	Salida 3 [mA]	Salida 4 [mA]	Salida 5 [mA]	Salida 6 [mA]	Media [mA]	Desvío [%]
0	0.005	0.0114	0.0046	0.004	0.004	0.0058	0.0058	0.014
200	1.232	1.268	1.246	1.228	1.224	1.255	1.2422	0.086
400	2.470	2.508	2.476	2.468	2.456	2.486	2.4773	0.090
650	4.002	4.038	4.002	4.000	3.986	4.022	4.0083	0.093
800	4.916	4.958	4.910	4.920	4.904	4.938	4.9243	0.101
1000	6.180	6.200	6.136	6.152	6.166	6.194	6.1713	0.124
1200	7.422	7.430	7.352	7.382	7.406	7.434	7.4043	0.160
1600	9.866	9.872	9.776	9.836	9.848	9.884	9.8470	0.194
2000	12.34	12.36	12.24	12.32	12.33	12.36	12.324	0.215
2400	14.81	14.83	14.71	14.79	14.80	14.83	14.795	0.232
2800	17.26	17.29	17.14	17.26	17.25	17.29	17.246	0.281
3200	19.74	19.74	19.58	19.72	19.73	19.75	19.710	0.317
3400	20.99	20.98	20.81	20.95	20.98	20.99	20.950	0.342
4000	24.66	24.49	24.85	24.57	24.63	24.74	24.657	0.634

**Tabla 6.** Calibración del Módulo Emulador de Sensores.

La calibración debe tener el menor error posible en rango de valores de interés (4-20mA) ya que fuera del rango sólo es utilizado para ver el comportamiento de la fallas por detección de señales fuera de rango.

Las últimas dos columnas de la Tabla 6 son la media y el desvío porcentual relativo a fondo de escala para cada valor medido sobre las 6 salidas del módulo. Se puede observar que, en el rango de interés, el desvío entre valores es bajo ( $< 0.35\%$ ) por lo que se decidió hacer una calibración lineal única para las 6 salidas.

La ecuación resultante al utilizar una interpolación lineal de los valores medios queda:

$$I_S = 6.1592 \cdot 10^{-3} \text{ mA } N_{DAC} + 4.7916 \cdot 10^{-3} \text{ mA}$$

Para comprobar la premisa de que se podía realizar una calibración única para las 6 salidas, se calcularon los errores relativos respecto a la interpolación lineal de todos los valores medidos obteniendo como máximo error porcentual respecto a fondo de escala  $0.66\%$  y una media entre todos los valores de  $0.15\%$ .

### 3.2.2.4 Software del microcontrolador presente en el módulo Emulador de Sensores

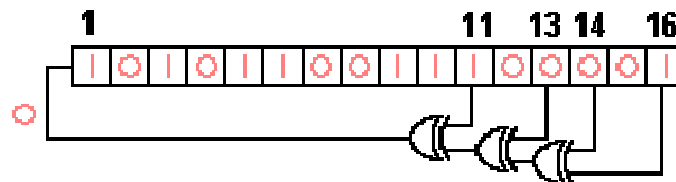
Se realizó un software para el microcontrolador Olimex LPC-H2148 utilizando un lenguaje C sobre RTOS. El mismo tiene las siguientes capacidades:

- Recepción de comandos vía USB con los siguientes operaciones:
  - Carga de valor constante para cada DAC
  - Carga de valor de tabla para cada DAC
  - Ejecución de tablas en forma única o periódica
  - Detención de ejecución periódica
  - Carga de desvío de ruido sumado a la señal para cada DAC
- Comando de los DAC mediante protocolo SPI
- Generación de ruido pseudo-aleatorio con distribución normal que se suma al valor instantáneo del DAC

### 3.2.2.5 Generación de ruido con distribución normal

Se le agregó al software del microcontrolador la capacidad de generar ruido pseudo-aleatorio con distribución normal.

Para su generación se utilizó un algoritmo LFSR (Linear feedback shift register) [19] como generador de números pseudo-aleatorios, ya que el mismo tiene mínimos requerimientos de procesamiento computacional necesitando únicamente algunas operaciones XOR y rotación de bits. En la Figura 15 se puede ver un esquema del mismo para un LFSR con longitud de 16bits.



**Figura 15.** Esquema de un algoritmo LFSR de 16bits.

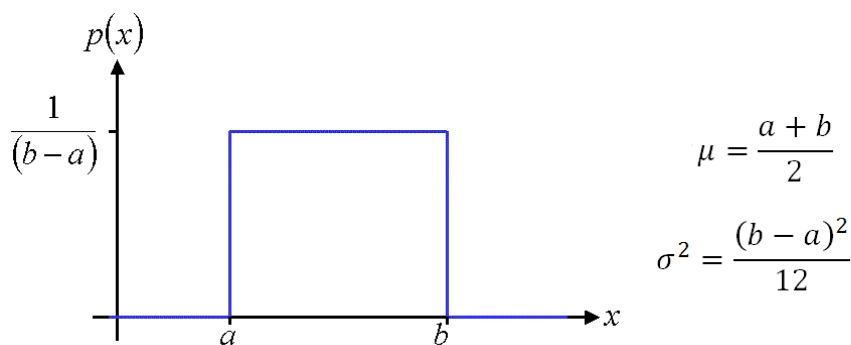
Las realimentaciones se eligen de manera que la secuencia pase por todos los números posibles antes de repetirse, generando de esta manera una distribución uniforme.

Para generar números pseudo-aleatorios con distribución normal a partir de los de distribución uniforme se analizaron dos posibilidades con bajos requerimientos computacionales en matemática de punto fijo:

- a) Por inversión de la función de distribución acumulativa
- b) Por sumatoria de varios valores consecutivos con distribución uniforme (Teorema del Límite Central) [20].

Se realizó el intento de implementar la primera opción (por inversión de la función de distribución acumulativa) utilizando tablas en el microcontrolador consumiendo una porción poco significativa de la memoria disponible. Mediante tablas de 2Kb no se pudieron lograr distribuciones que retornasen números más allá de los  $\pm 4\sigma$  y simultáneamente conservaran una precisión aceptable.

Para analizar la segunda alternativa hay que considerar que la media y la varianza de una distribución uniforme es:



Si consideramos a  $U$ , una variable aleatoria uniforme con  $a = 0$  y  $b = 1$ , su media y su varianza serán  $\mu_u = \frac{1}{2}$  y  $\sigma_u^2 = \frac{1}{12}$

Luego, si  $S$  es suma de  $N$  variables aleatorias  $U$

$$S = \sum_N U$$

Por Teorema del Límite Central,  $S$  tendrá una distribución que se asemeja a la normal con

$$\mu_S = N \cdot \mu_u = \frac{N}{2} \quad \text{y} \quad \sigma_S^2 = N \cdot \sigma_u^2 = \frac{N}{12}$$

Eligiendo  $N = 12$  se obtiene una distribución de forma que se asemeja a la normal, con  $\mu = 6$ ,  $\sigma = 1$  y con densidad de probabilidad acotada entre 0 y 12 por lo que sus valores pueden alcanzar los  $\pm 6\sigma$ .

Se eligió la segunda alternativa, ya que con la distribución resultante se obtienen valores que cubren un rango mayor.

Para seleccionar la longitud del algoritmo LFSR se analizó el periodo de repetición. Como punto de partida se analizó el LFSR de 32 bits ya que el microcontrolador utilizado maneja en forma nativa este tamaño de acumuladores. Con un LFSR de 32bits, para un periodo de actualización del ruido de 0.5mseg, la repetición de la secuencia se da antes de las 50hs. Para realizar corridas más largas se seleccionó un LFSR de 64bits con tiempo de repetición mayor a  $10^7$  años.

Las realimentaciones para generar un LFSR de 64bits de periodo máximo corresponden a las posiciones 60, 61, 63 y 64 [21].

Para explicar en manejo numérico de la implementación en punto fijo, se adopta la notación de punto fijo [s]a.b, donde 's' denota signo, la 'a' el número de dígitos binarios que representa la parte entera del número y la 'b' la parte fraccionaria.

La siguiente tabla muestra algunos rangos como ejemplo:

Formato	Cantidad total de bits	Menor nro.	Mayor nro.	Resolución
s3.5	9	-8	7.96875	0.03125
3.5	8	0	7.96875	0.03125
s2.1	4	-4	3.5	0.5
s3.7	11	-8	7.9921875	0.0078125
0.9	9	0	0.998046875	0.001953125

**Tabla 7.** Ejemplos de utilización de la notación de rangos en punto fijo.

Durante la explicación también se usa la notación [m,n), que representa los límites que el valor puede alcanzar.

La secuencia de generación y suma del ruido al valor instantáneo del DAC se describe a continuación:

- 1) Se generan dos LFSR de 64bits.
- 2) Se subdividen los 2 números de 64 bits en 12 números de 10 bits (sobran 8 bits que se descartan). Cada número de 10 bits representa un valor pseudo-aleatorio con distribución uniforme, los cuales se interpretan como 0.10 en notación de punto fijo, por lo que su rango es [0,1).
- 3) Se realiza la sumatoria de los 12 valores de 10 bits, obteniendo un valor 3.10, rango [0,12). Estos representarán valores pseudo-aleatorios, que por Teorema Central del Límite su distribución se asemejará a una distribución normal con media 6 y variancia 1.
- 4) Se resta el número fijo 6 para que la distribución tenga media nula. Ahora el valor tiene representación s3.10 y rango [-6,6).
- 5) Para cada canal se multiplica por la constante de desvío  $\sigma_i$ , enviada por USB. Ésta es una constante de 12bits con representación 10.2, o sea rango [0,1024). El resultado de la multiplicación es una variable s13.12 con rango (-6144,6144). La variable obtenida tiene valores pseudo-aleatorios con distribución que se asemeja a la normal con media nula y desvío  $\sigma_i$
- 6) Se recortan los 12 bits fraccionarios (menos significativos), quedando un número con representación s13.0; y se le suma el valor de determinístico del DAC (ya sea que se está recorriendo una tabla o se le configuró un valor fijo). El valor determinístico tiene representación 12.0 y la suma será s14.0 con valores comprendidos entre [-6144, 10239].
- 7) Al último valor se lo satura al rango del DAC [0, 4095] antes de enviarlo por SPI al mismo.

Se puede notar que la saturación del último paso produce un recorte de los bordes de la distribución para valores grandes de  $\sigma_i$ , pero ésta es menos significativa que las que se producirán durante la adquisición, ya que el rango de salida del emulador es 0-25mA mientras que la adquisición es 4-20mA.

### 3.2.2.6 Verificación de la Implementación del ruido aditivo con distribución normal.

Para realizar la verificación de la implementación detallada en la sección anterior se realizó una medición de la señal generada, conectando una de las salidas de corriente del Emulador de Sensores a la entrada de la señal de presión de un Módulo Acondicionador de Señales del SIA (ver 2.4.1), para realizar la conversión corriente-tensión y poder medir con un osciloscopio Tektronic DPO4104 la salida del mismo. Se adquirió una muestra de  $10^6$  puntos a través del conector USB de este osciloscopio.

Se configuró el Emulador de Sensores con la interfaz de PC descrita en la sección 3.4. Se utilizó un valor fijo de 3V y seleccionó un valor de  $\sigma$  para el ruido de 120 unidades del DAC. De esta manera se pudo configurar el osciloscopio en 0.5V/div, logrando una resolución de 20mV en la adquisición de las tablas de datos guardadas en archivo a través del puerto USB del mismo. Se seleccionó una frecuencia de muestreo de 10KS/s.

Procesando esta señal mediante Matlab se obtuvo un valor medio de 3.03V y una desviación estándar de **0.377V**.

Para verificar este último valor contra la configuración de 120 cuentas de desvío del ruido, se utilizó la calibración de la sección 3.2.2.3 para la conversión de constante de DAC a corriente y la relación corriente-tensión 2.4.1. La relación entre tensión a la salida del Módulo Acondicionador relativa al número configurado en el DAC es:

$$V_p = 0.5 \frac{V}{mA} I_p$$

$$V_p = 0.5 \frac{V}{mA} (6.1592 \cdot 10^{-3} \text{ mA } N_{DAC} + 4.7916 \cdot 10^{-3} \text{ mA})$$

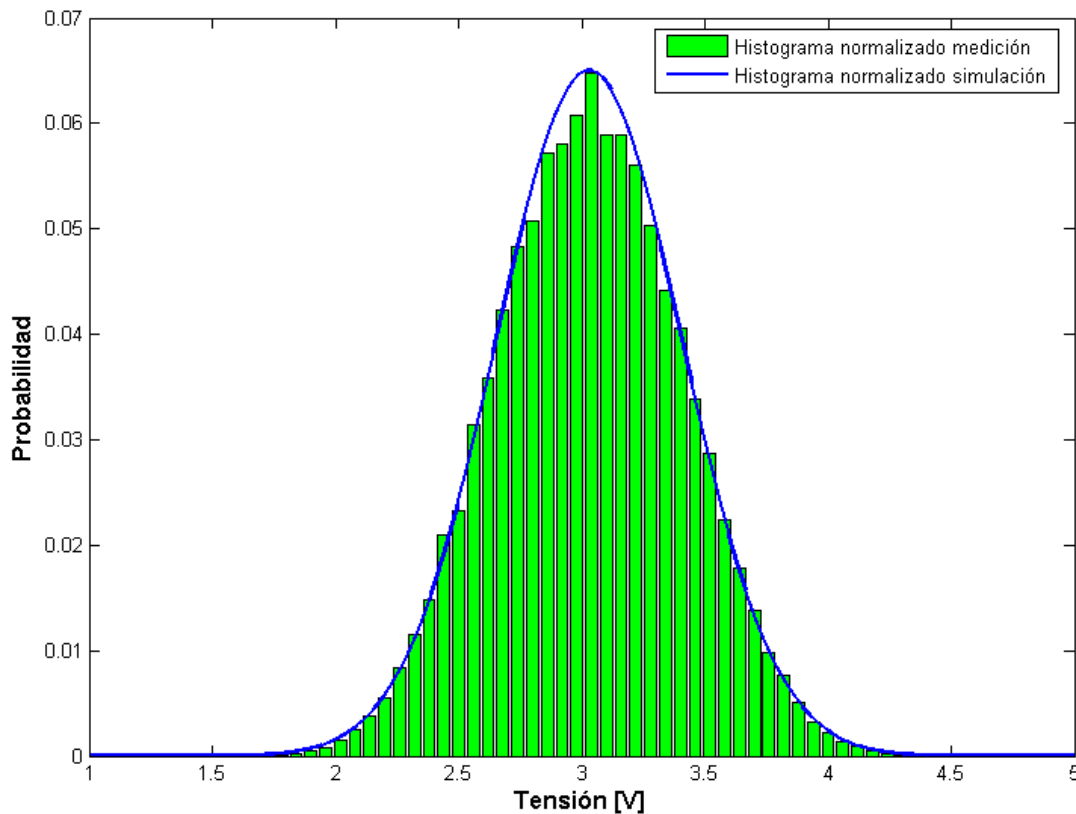
$$V_p = 3.08 \cdot 10^{-3} \text{ V } N_{DAC} + 2.40 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Para el caso de la desvío del ruido solo es necesario el factor lineal, por lo que

$$\sigma_p = 3.08 \cdot 10^{-3} \text{ V } \sigma_{DAC} = 3.08 \cdot 10^{-3} \text{ V } \times 120 = \mathbf{0.370V}$$

Se verifica de esta manera que la configuración está dentro de las tolerancias de calibración sumadas del emulador (0.85%), del Módulo Acondicionador (0.5%) y el osciloscopio (1.5%).

Por último, se verificó que la señal generada tenga valores que se asemejen a una distribución normal. Para ello, se realizó un histograma de los valores medidos. Previo al histograma se realizó un submuestreo 1:5, ya que la frecuencia de muestreo del osciloscopio (10KS/s) es 5 veces mayor que la de actualización del DAC (2KS/s). De esta manera se recupera una sola muestra por valor del retenedor del emulador, la cual es tomada como cada número pseudo-aleatorio generado por el algoritmo implementado en el módulo. El histograma se puede ver en la Figura 16 superpuesto con la distribución normal correspondiente a la media y varianza obtenida anteriormente.



**Figura 16.** Histograma normalizado medición ruido comparado con la distribución Normal.

Se puede observar que el ruido generado tiene una distribución de valores que se asemeja a la distribución normal.

### 3.2.3 Contactores

Cada módulo de Driver de Potencia tiene 4 salidas independientes, cada una maneja un contactor. Cada tren tiene un Driver de Potencia por lo que para ejercitar todas las salidas de todos los drivers se utilizaron 16 contactores de características similares de carga que lo que se utilizarán en planta.

Se seleccionaron, para la verificación, los Contactores Siemens Sirius 3RT1017-1BB41 con varistor de protección contra sobretensión Siemens 3RT1916-1BB00, similares a los utilizados en la central.

### 3.2.4 Fuentes de Alimentación

Como se mencionó en 2.3.1 el sistema utiliza 2 alimentaciones de tensiones nominales de 24V (L+ y PM), y una de -24V (L-).

La mayoría de los módulos tienen detección por L+ fuera de rango (<19V), por lo que fue de interés poner una fuente variable para esta alimentación. Se utilizó una fuente de alimentación doble regulable 0-30V MCP M10-TP3005H, de 5A por salida, alimentando L+ y L-.

Por otra parte, los contactores y la línea PM se alimentó mediante una fuente fija de 24V 15A.

### *3.2.5 Computadora*

Se utilizó una HP Pro 3000 Small Form Factor Business PC para ejecutar el software de simulación y como interfaz de usuario del sistema de verificación.

### *3.2.6 UPS*

Se decidió utilizar una UPS para soportar transitorios en la alimentación de línea y falta de energía de al menos 5 minutos, lapso suficiente para apagar la PC y realizar un corte de energía controlado del sistema.

Se seleccionó la Zigor Volga 1000VA de doble conversión, UPS tipo On-LINE. La misma trae conectividad RS-232 para conectar a la PC y un software para controlar distintas modalidades de corte, con la capacidad de configurar su re-encendido al volver la energía de alimentación externa.

### *3.2.7 Cables de Fibra Óptica*

Se utilizaron 16 cables de fibra óptica dobles de 3m con características de transporte óptico similares a las que se van a colocar en planta (multimodo 62.5/125  $\mu\text{m}$ ), pero con menores exigencias de robustez externa, siendo de esta manera más práctico para interconectar terminales en un mismo rack. Estos cables se consiguen en el mercado local y vienen prearmados con los terminales ST, por lo que se los puede conectar directamente a los módulos de fibra desarrollados (2.4.3).

## **3.3 Montaje**

El montaje del SIA junto que con el equipamiento de verificación se realizó sobre un rack compatible con los subracks Eurocard 19”.

Es de notar que en el sistema instalado en planta la distribución será distinta, estando cada Tren de Medición en un tren de instrumentación distinto por criterio de separación física entre redundancias. Para el proceso de verificación en fábrica esto no se consideró necesario, priorizando la practicidad de instalación en un mismo rack.

En Figura 17 la se puede observar un esquema de la interconexión en el rack entre equipamiento de verificación y el SIA, y en la Figura 18 una foto del rack con todos los elementos montados.

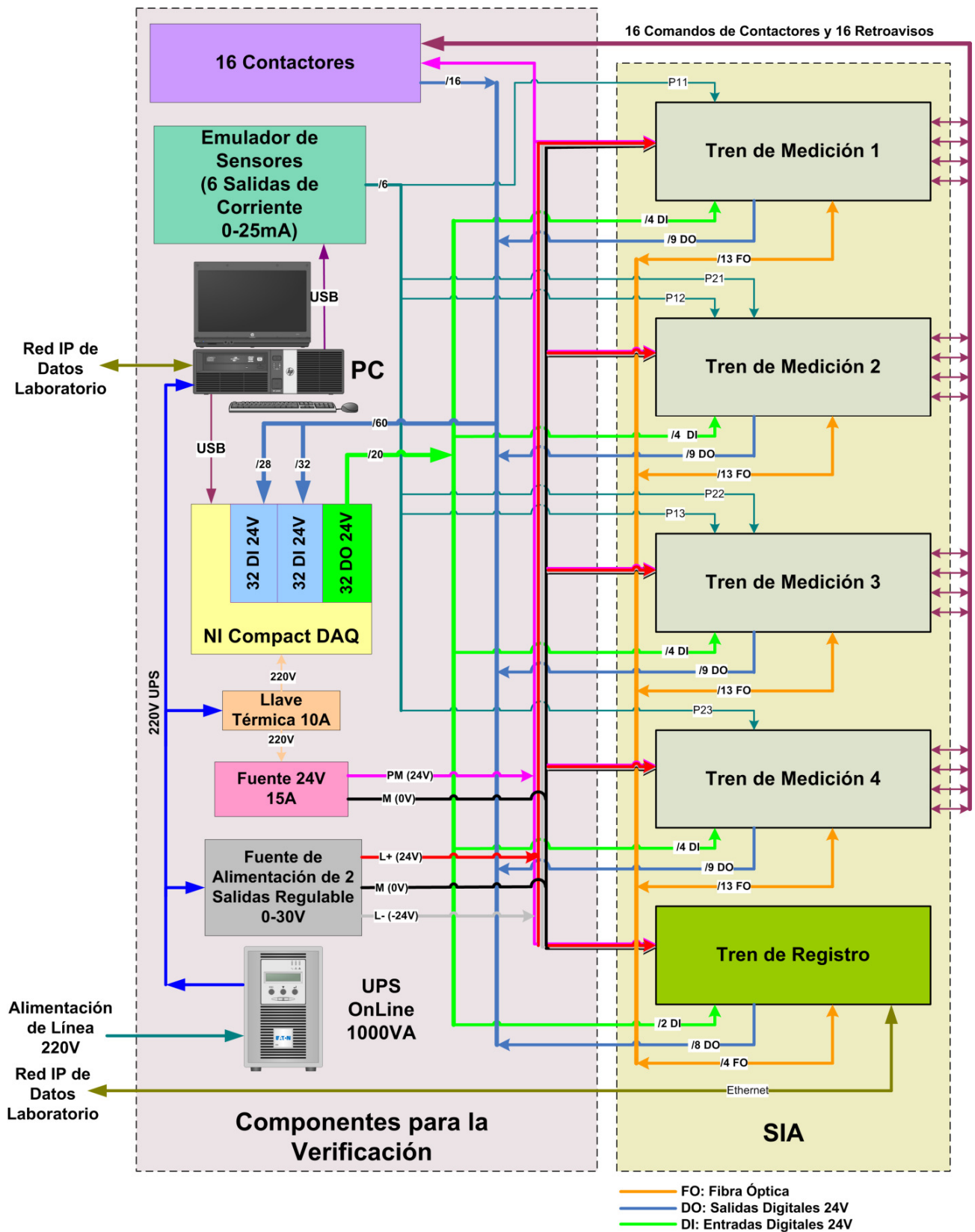
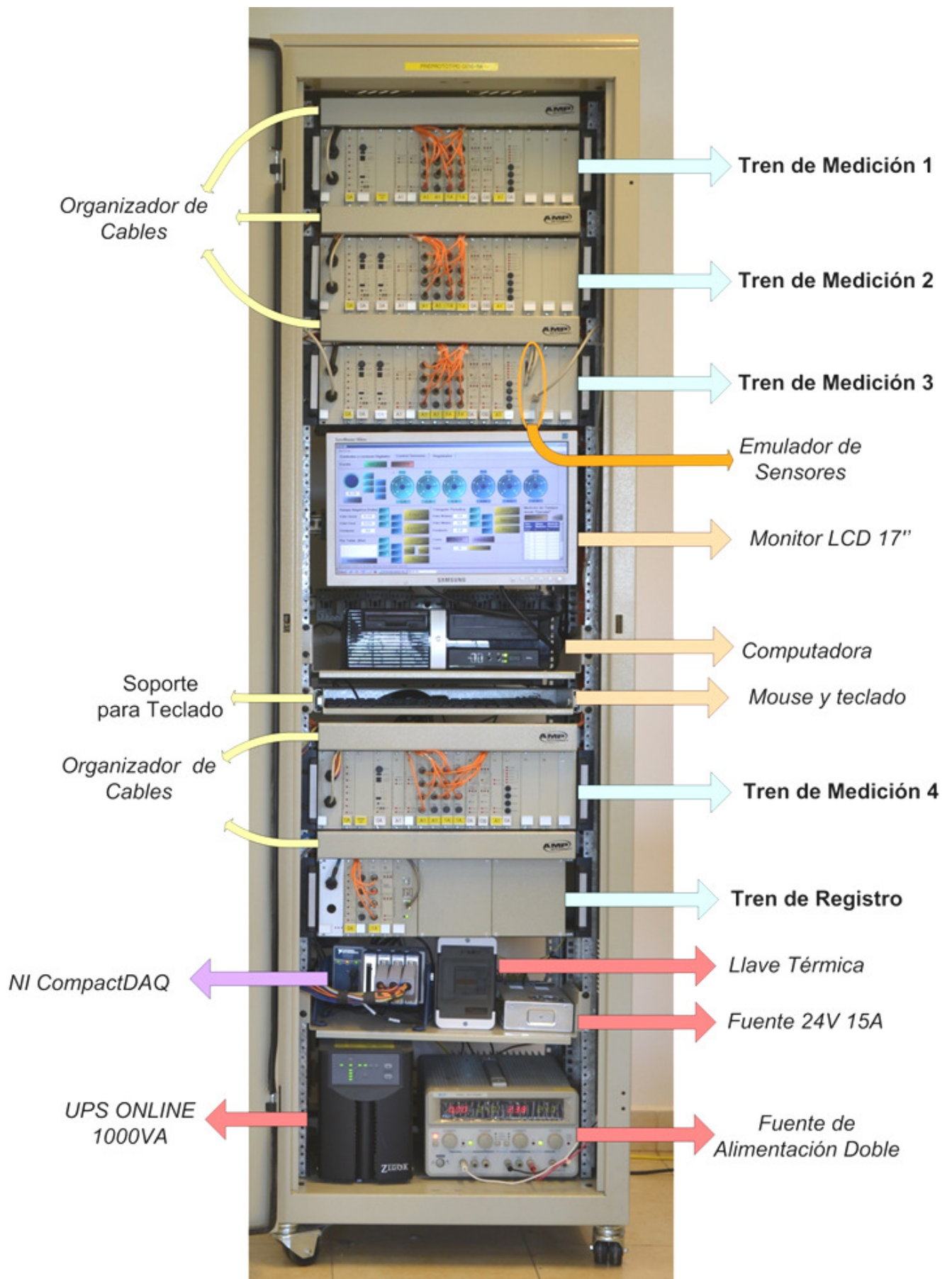


Figura 17. Esquema de la interconexión de los componentes para la Verificación del SIA.



**Figura 18.** Rack del SIA en conjunto con el equipamiento de verificación.

### 3.3.1 Rack y accesorios

Se eligió el rack Fayser RU-4021 de 40U de altura 1874,50mm debido a su disponibilidad en el mercado local, la compatibilidad con los subracks del sistema y que suplía con las necesidades de espacio para colocar todo el sistema y los componentes necesarios para su verificación.

En la tabla a continuación se detallan los elementos utilizados.

Ítem	Cantidad	Descripción del Suministro
1	1	Rack RU-4021 - Serie RU 40u (Amp: 0-1657165-3)
2	1	Puerta trasera para rack 40u (Amp: 0-1657115-8)
3	1	Ruedas para racks (Amp: 0-1657135-4)
4	5	Organizador Cables Horiz.19" 1u C/Tapa (Amp: 0-1657100-5)
5	1	Soporte para teclado (Amp: 0-1657195-6)
6	1	Canal de tensión Vertical con 10 tomas (Amp: 0-1657030-7)
7	2	Bandeja fija liviana 20Kg ventilada (Amp: 0-1657010-6)
8	1	Kit de tornillos (Amp: 0-1657670-5)
9	1	Soporte articulado para monitor LCD

**Tabla 8.** Listado de Rack y accesorios utilizados para el montaje

### 3.3.2 Distribución de los componentes en el rack

Se buscó una distribución ergonómica en función del monitor y el teclado de la PC, que se detalla en la Tabla 9 y se puede visualizar en la Figura 18.

Ubicación en Rack [U]	Altura [U]	Descripción
1	1	Organizador Cables Horiz.19" 1u C/Tapa (Amp: 0-1657100-5)
2-4	3	Tren de Medición 1 (Variante A)
5	1	Organizador Cables Horiz.19" 1u C/Tapa (Amp: 0-1657100-5)
6-8	3	Tren de Medición 2 (Variante B)
9	1	Organizador Cables Horiz.19" 1u C/Tapa (Amp: 0-1657100-5)
10-12	3	Tren de Medición 3 (Variante B). El módulo Emulador de Sensores se enchufó en la posición M16 de este tren (ver 2.5.1)
13-18	6	Monitor LCD 17" (Samsung SyncMaster 740NW) con soporte articulado para LCD
19-21	3	Computadora HP Pro 3000 Small Form Factor Business PC sobre Bandeja fija liviana 20Kg ventilada (Amp: 0-1657010-6)
22-23	2	Mouse y Teclado sobre soporte para teclado (Amp: 0-1657195-6)
24	1	Organizador Cables Horiz.19" 1u C/Tapa (Amp: 0-1657100-5)
25-27	3	Tren de Medición 4 (Variante C)
28	1	Organizador Cables Horiz.19" 1u C/Tapa (Amp: 0-1657100-5)
29-31	3	Tren de Registro
32-35	4	NI CompactDAQ (cDAQ-9174, 2 NI 9425, NI 9476) y Fuente 24V 15A sobre Bandeja fija liviana 20Kg ventilada (Amp: 0-1657010-6)
36-40	5	UPS y Fuente de Alimentación doble sobre piso inferior de rack

**Tabla 9.** Distribución de componentes en el rack

### **3.4 Software de Verificación**

Se desarrolló un software en lenguaje Microsoft Visual C# bajo sistema operativo Windows. El mismo provee una interfaz de usuario capaz de comunicarse con los 3 dispositivos principales a través de los cuales se ejercita y se toman lecturas del sistema bajo prueba. Estos dispositivos son:

- National Instruments NI CompactDAQ (ver 3.2.1)
- Emulador de Sensores (ver 3.2.2)
- Registrador del SIA (ver 2.4.8)

Las capacidades de la interfaz de usuario lograda se resumen a continuación:

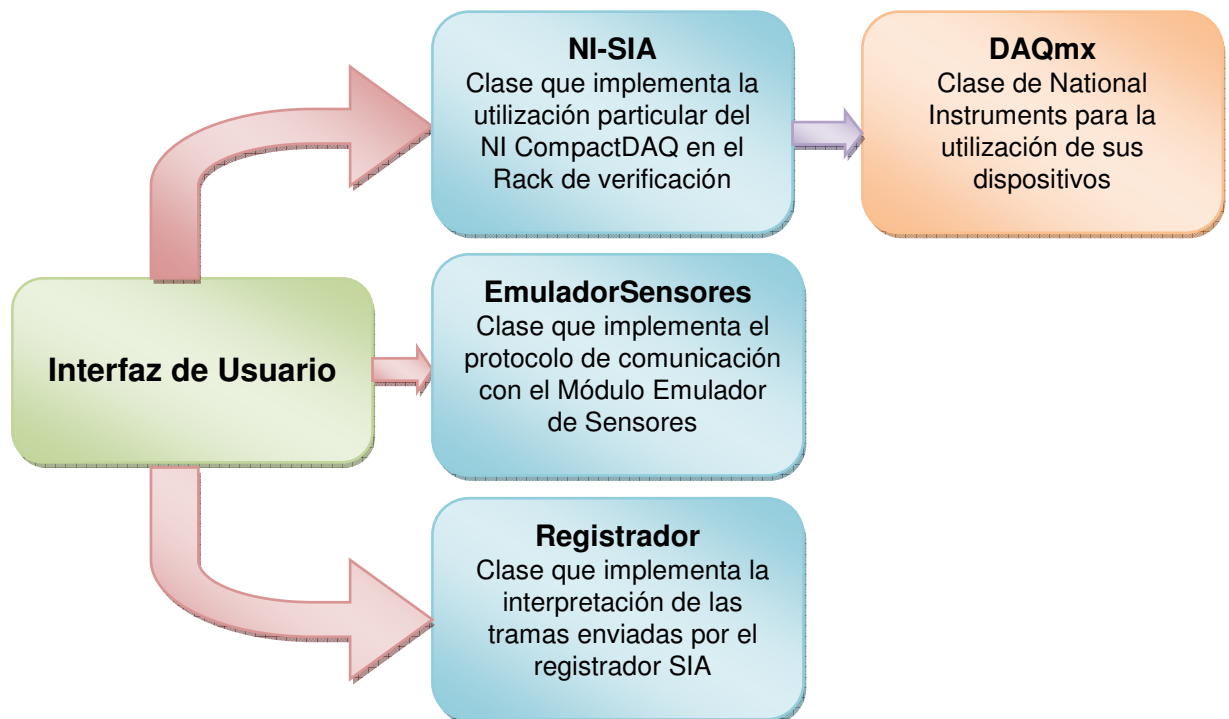
- Comandar manualmente las señales digitales de 24V de SIA y de manera automática la señal de blinking.
- Mostrar las salidas digitales de 24V del SIA, las cuales normalmente se encuentran en nivel alto, reteniendo el paso por nivel bajo de cualquiera de ellas.
- Mostrar el estado de los contactores (ver 3.2.3)
- Fijar un nivel constante de salida de las señales del emulador de sensores de manera global (para las 6 señales) o individual. Este valor se puede especificar en 3 escalas diferentes:
  - Unidades del DAC del Emulador de Sensores (0 - 4095)
  - Tensión a la salida del Acondicionador de Señales (0V-10V)
  - Bares del sensor de presión simulado (0 Bar -150 Bares)
- Generar una rampa negativa paramétrica en escala de bares, que se almacena como tabla en el Emulador de Sensores. Se puede seleccionar el conjunto de sensores tanto para la carga como para la ejecución de la rampa.
- Generar señales periódicas tipo triangular y trapezoidal, de forma paramétrica que se almacenan como tablas en el Emulador de Sensores. Se puede seleccionar el conjunto de sensores tanto para la carga como, para la ejecución de la rampa.
- Cargar tablas desde archivo separado por tabulaciones de 7 columnas, una para el tiempo y 6 correspondientes a cada una de las señales.
- Enviar al Emulador de Sensores las constantes individuales de desvío estándar de ruido (ver 3.2.2.5).
- Medición de tiempos desde la ejecución de rampa negativa o desde la ejecución de tablas por archivo hasta la apertura de los contactores.
- Gráfico de las presiones leídas por los Módulos de Comparación y Disparo del SIA para monitoreo en línea del funcionamiento.

### 3.4.1 Estructura del software

La programación se realizó bajo el paradigma de Programación Orientada a Objetos, en la que se pueden distinguir 3 clases principales:

- Interfaz de usuario
- Clase para el comando y lectura de datos desde el NI CompactDAQ, la cual tiene en cuenta la ubicación de las señales y como se cablearon. A su vez, esta utiliza un conjunto de clases proporcionadas por National Instruments (DAQmx) para el control de sus dispositivos.
- Clase para el comando del Emulador de Sensores.
- Clase para la interpretación de las tramas enviadas por el Registrador del SIA.

La división realizada permite la reutilización del código de las clases de cada dispositivo. En la Figura 19 se puede ver la dependencia entre clases.

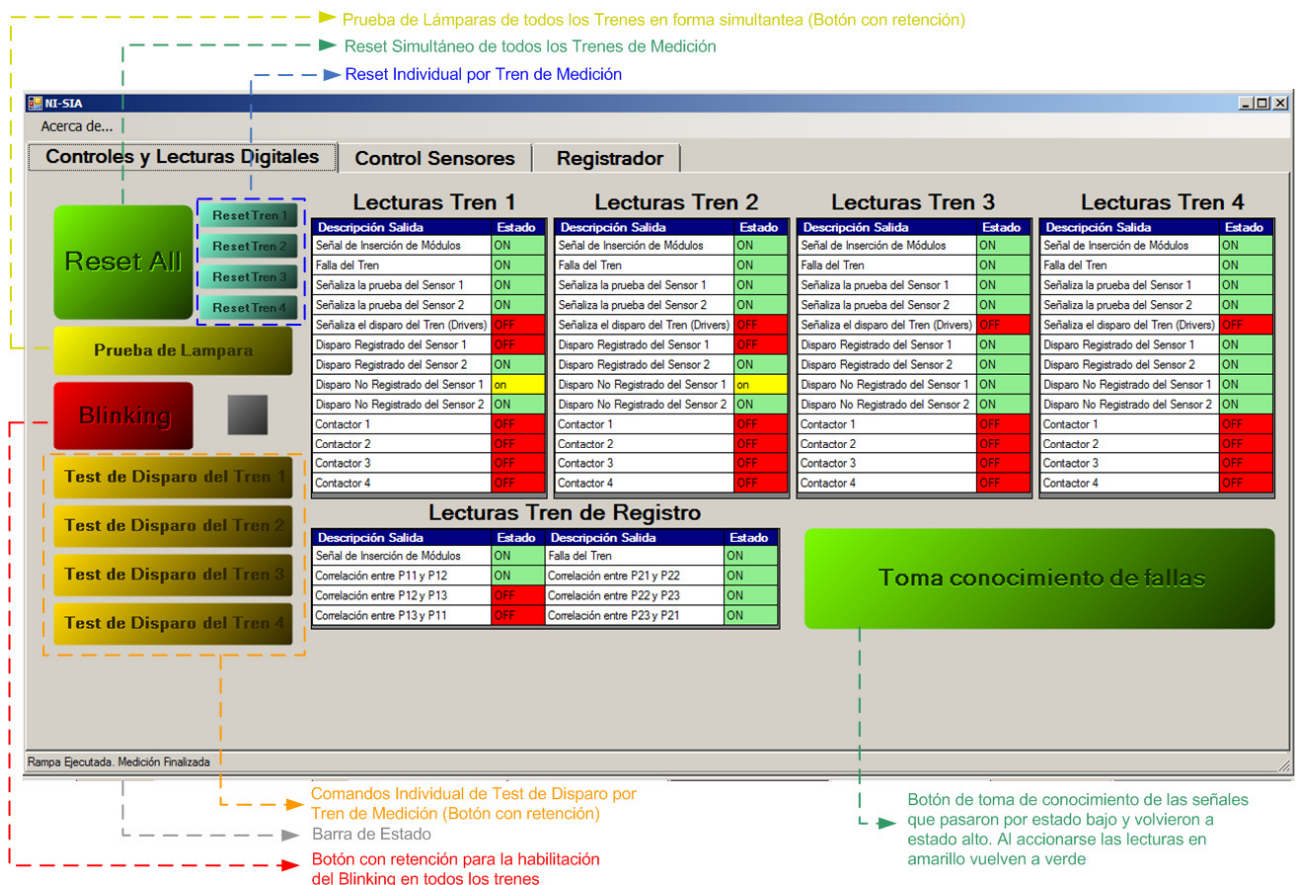


**Figura 19.** Dependencia de las clases utilizadas en el software de verificación.

### 3.4.2 Interfaz de Usuario

La Interfaz de Usuario se diseñó para una pantalla de 17" con resolución de 1280x720 pixeles. Para lograr la ubicación de todos los controles e indicaciones, la interfaz se dividió en 3 solapas, una para cada dispositivo.

En la primera solapa se ubicaron los comandos y lecturas digitales del NI CompactDAQ. Esta se puede ver en la Figura 20.



**Figura 20.** Pantalla de la primera solapa de interfaz de usuario con los comandos y lecturas digitales del NI CompactDAQ.

A continuación se describe el detalle de utilización de cada comando (botón).

- **Reset all:** Activa simultáneamente las líneas de reset de cada Tren de Medición para reponer los comparadores y votadores que hayan sido disparados.
- **Reset Tren ‘iésimo’:** Activa la línea de reset del Tren de Medición en cuestión. Se le aplican las mismas condiciones descritas en el punto anterior.
- **Prueba de Lámpara:** Activa simultáneamente las líneas *Lamp Test* de los 5 Trenes (ver Sección 2.3.7).
- **Blinking:** Es un botón con retención que activa el modo de parpadeo. Cuando este modo está activado se transmite una señal cuadrada de 2Hz por las líneas de *Blinking* mencionadas en la Sección 2.3.7 en forma sincrónica para los 5 trenes.
- **Test de Disparo de Tren ‘iésimo’:** Activa la línea de **t\_Tren** de disparo del Tren de Medición en cuestión. Luego de acondicionada por cada Módulo Adaptador de Entrada/Salida, esta línea es leída por los Módulos de Comparación y Disparo del tren correspondiente y distribuida a todos los votadores en la trama *result* (ver Sección 2.4.2). El votador del tren en cuestión solo realiza el disparo de prueba en el caso de que no se haya pedido test a ninguno de los otros trenes. Si los Módulos de Votación detectan pedido de test simultáneo, dan falla. Esta metodología previene el disparo por error de cableado u error de ejecución de las señales de test

desde sala de control, ya que el disparo de 2 trenes producirían el accionamiento del sistema de extinción. En el caso de un proceso de test normal sobre un solo tren, el cuadro de válvulas presente en la central evita la inyección de boro por disparo de un solo driver. Los botones tiene retención, permitiendo el pedido simultáneo de más de una señal de test para poder probar este modo de falla.

- Toma de conocimiento de fallas:** Los paneles de lectura de las señales se programaron para retener el pasaje por bajo de cualquier señal. En funcionamiento normal todos los indicadores se encuentra en "ON", las luces de los módulos están apagadas y las señales digitales que salen de los trenes están en estado alto (24V). Cualquier señalización, ya sea por disparo o falla hace que la señal correspondiente pase a estado bajo (0V). Este estado se señala con "OFF" en los paneles de lectura. Si la señal correspondiente vuelve a estado alto, se señala con "on" para dejar constancia de ha tenido un pasaje por estado bajo. El botón "Toma de conocimiento de fallas" permite volver las indicaciones "on" a "ON" recuperando la capacidad de detectar nuevas transiciones.

En la segunda solapa se agruparon los controles relacionados con el Emulador de Sensores. Una captura de pantalla junto con las referencias de los mismos se puede ver en la Figura 21.

Comando para setear el Valor en todos los Canales simultaneamente

Comandos para el seteo individual del valor seleccionado en cada canal

Valor Constante en la Escala Seleccionada a ser Seateado

Selección de Escala a Mostrar los Relojes y seteos de los Valores Individuales

Valores actuales presente en los sensores

Selección, Carga y Ejecución de Formas de Onda por Tablas desde Archivo

Configuración, Carga y Ejecución de Rampas Negativas Paramétricas

Carga de Valor Global o Valores Individuales de la Desviación Estándar del Ruido Normal

Configuración, Carga y Ejecución de Señales Periódicas Paramétricas

Cuadro con valores medidos de retardo desde la ejecución de rampas negativas o por tabla hasta la apertura de cada contador. También tiene columna con promedios de tiempos desde el último Reset

Con-tactor	Ultima Medicion	Medición Promedio
T1 C1	<781ms	781ms
T1 C2	<781ms	781ms
T1 C3	<781ms	781ms
T1 C4	<781ms	781ms
T2 C1	<781ms	781ms
T2 C2	<781ms	781ms
T2 C3	<781ms	781ms
T2 C4	<781ms	781ms
T3 C1	<781ms	781ms

**Figura 21.** Pantalla de la segunda solapa de interfaz de usuario con los comandos para el Emulador de Sensores.

El detalle de la utilización de esta pantalla se comenta en los siguientes puntos:

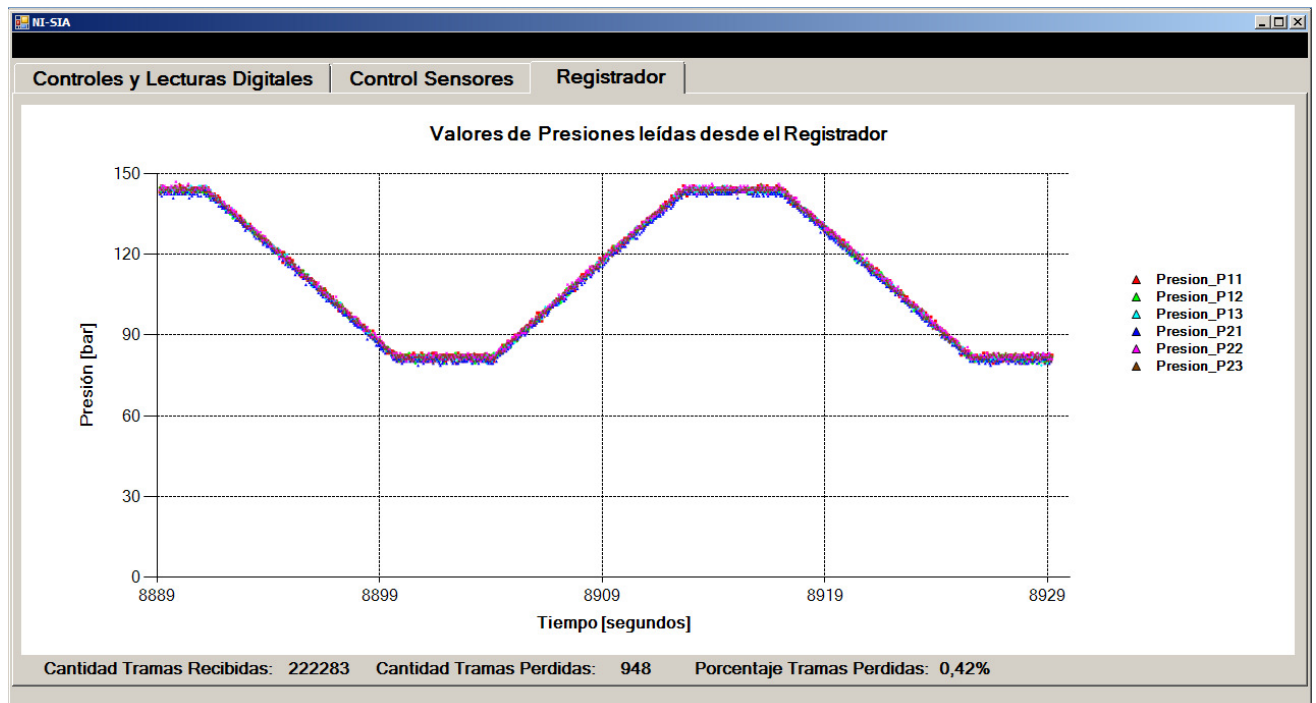
- **Escala:** Selección de escala a mostrar en los relojes y configuración de los valores individuales. Las posibles escalas son:
  1. **DAC 12bits:** Envía al Módulo Emulador de Sensores el valor del DAC a ser configurado. El rango admisible es 0 a 4095. Permite direccionar todo el rango de corriente de las salidas del módulo (ver 3.2.2) por lo que permite valores fuera de rango del sensor para prueba de detección de fallas.
  2. **VOLT 0-10:** Corresponde a la escala de salida del Acondicionador de Señales y el rango de los valores de parámetros que se pueden medir en el frente del mismo.
  3. **BAR 0-150:** Corresponde al rango del sensor de presión. No permite seleccionar valores fuera de rango para prueba de fallas.
- **Valor Constante:** es posible ingresarlo tanto por teclado como moviendo el selector radial. El rango de valores admisibles depende de la escala seleccionada.
- **Botón "Set All":** Realiza la carga del Valor Constante simultáneamente en todas las salidas del Emulador de Sensores.
- **Botones de Carga Individual de Valores Constantes:** permite la carga del Valor Constante salida por salida del Emulador de Sensores. La codificación Pxx corresponde con la utilizada anteriormente para identificar los sensores.
- **Valores actuales presentes en los sensores:** consta de indicadores tipo relojes de aguja y de valores numéricos. Los valores mostrados son los leídos de las tramas del registrador, a menos que este valor sea cero, en cuyo caso se muestra el último valor enviado al Emulador de Sensores para el canal correspondiente.
- **Rampa Negativa:** en este recuadro están los parámetros y controles para cargar y ejecutar señales tipo rampas negativas. El programa genera la tabla óptima a partir de los parámetros elegidos, teniendo en cuenta las particularidades de las tablas implementadas en el Módulo Emulador de Sensores. Para evitar comportamientos erráticos, antes de la carga se deberá detener cualquier señal periódica en ejecución sobre los canales correspondientes. Los parámetros a configurar son el *Valor Inicial*, el *Valor Final* y la *Pendiente*. Los dos primeros deberán tener unidades de bares y la pendiente en bares por segundo. El recuadro tiene su grupo de 6 botones con retención correspondientes a los sensores *P11*, *P12*,... *P23* que sirven para seleccionar a que canales se desea cargar la tabla, así como también para iniciar la ejecución. Los pasos a seguir para realizar una ejecución de Rampa Negativa son:
  1. Detener la ejecución de señales periódicas.
  2. Configurar los 3 parámetros del recuadro.
  3. Seleccionar los canales a actualizar mediante los botones P11 a P23. Por lo general se seleccionan los 6 sensores para el proceso de carga.
  4. Presionar el botón *Cargar*.

5. Utilizando la carga de valores constantes llevar a las señales a valores cercanos al *Valor Inicial* configurado. De no realizar este paso, se producirán escalones en las señales al momento de ejecución desde el valor presente en el sensor al valor inicial configurado, los cuales pueden producir disparos.
  6. Realizar, desde la primera solapa del programa, un *Reset* de los disparos que se puedan haber producido hasta el momento y realizar la *toma de conocimiento* de manera de analizar los que se produzcan a partir de la nueva ejecución.
  7. Seleccionar los canales a ejercitar. Puede ser cualquier conjunto que haya sido previamente cargado con los parámetros actuales.
  8. Presionar el botón *Ejecutar* para dar inicio a la rampa.
  9. Mientras no se modifiquen los parámetros seleccionados, se puede volver a repetir desde el paso 5, realizando varias corridas de la rampa sobre distintos conjuntos de sensores, cambiar el nivel de ruido sumado y/o para realizar promedio de la medición de tiempo desde que se realiza la ejecución hasta la apertura de los contactores, lo cual se detallará más adelante.
- **Triangular Periódica:** de manera similar a la rampa negativa descrita en el punto anterior, el recuadro de Triangular Periódica contiene los parámetros y controles para la configuración, carga, ejecución y, en este caso se le agrega la acción de *Parar*, ya que a diferencia de la rampa negativa, la triangular periódica se ejecuta indefinidamente. La *Pendiente* define de forma simétrica tanto la rampa positiva como la negativa. Se implementaron 2 formas de onda, la triangular propiamente dicha se selecciona con el botón *Triangular Pura*, mientras que la forma de onda trapezoidal, llamada *Tipo RI*, tiene partes constantes de duración  $1/6$  de periodo sobre los extremos mínimo y máximo de la señal, quedando las rampas con duración de  $1/3$  de periodo cada una. Esto permite que el valor PZ del algoritmo de disparo alcance al valor PA, si se hubiesen distanciado (ver 2.4.2.1). Un ejemplo de este tipo de forma de onda se muestra en la Figura 22. Los pasos a seguir para realizar una ejecución de Triangular Periódica serían:
    1. Detener la ejecución de señales periódicas.
    2. Configurar los 3 parámetros del recuadro y seleccionar el tipo de forma de onda.
    3. Seleccionar los canales a actualizar mediante los botones P11 a P23. Por lo general se seleccionan los 6 sensores para el proceso de carga.
    4. Presionar el botón *Cargar*.
    5. Utilizando la carga de valores constantes, llevar a la señales a valores cercanos al *Valor Máximo* configurado, ya que la señal siempre comienza desde este valor. De no realizar este paso, se producirán escalones en las señales al momento de ejecución desde el valor presente en el sensor al valor máximo configurado, los cuales pueden producir disparos.

6. Realizar, desde la primera solapa del programa, un *Reset* de los disparos que se puedan haber producido hasta el momento y realizar la *toma de conocimiento* de manera de analizar los que se produzcan a partir de la nueva ejecución.
  7. Seleccionar los canales a ejercitar. Puede ser cualquier conjunto que haya sido previamente cargado con los parámetros actuales.
  8. Presionar el botón *Ejecutar* para dar inicio a la forma de onda.
  9. La única acción admisible (sin comportamientos erráticos), mientras se está ejecutando la onda periódica, es cambiar los valores de desviación estándar de ruido aditivo, como se comentará más adelante.
  10. Presionar el botón de *Parar* para detener el ensayo. Los valores de salida de los canales donde se venía ejecutando la forma de onda quedarán congelados en el valor que tenían al momento de presionar el botón.
  11. Mientras no se modifiquen los parámetros seleccionados, se puede volver a repetir desde el paso 5, realizando varias corridas sobre distintos conjuntos de sensores.
- **Por Tabla:** en este recuadro se encuentran los controles para la selección del archivo con valores a ser enviados al Emulador de Sensores, como así también los controles para la ejecución única, ejecución periódica y frenado de esta última. Los archivos deben tener 7 columnas separadas por tabulaciones, la primera correspondiente al tiempo del renglón y 6 valores de presión en bar, uno para cada canal. Los valores deben tener la “,” (coma) como separador decimal. No es necesario que las muestras de la tabla del archivo tenga tiempos equiespaciados temporalmente, ya que el programa adecua los valores leídos a las particularidades del Emulador de Sensores, linealizando los valores intermedios necesarios entre dos renglones del archivo. Esto permite la escritura de formas de onda con la mínima cantidad de puntos, por ejemplo una señal triangular con 3 puntos, una cuadrada con 4 y la tipo RI, mencionada anteriormente, con 5. Los pasos a seguir para realizar una ejecución consistente son similares a los anteriores, con la única diferencia que en vez de parámetros, en este caso se debe seleccionar un archivo.
  - **Ruido:** permite la modificación de la desviación estándar del ruido aditivo de distribución normal implementado en el Emulador de Sensores (ver 3.2.2.5). El casillero de la izquierda en conjunto con el botón *Cargar All* modifica los valores de todos los canales simultáneamente, mientras que el resto de los casilleros editables corresponde a los valores individuales que se cargan cuando se presiona el botón *Individuales*. El ruido es sumado en todos los modos del Emulador, tanto con los valores constantes como cuando se están ejecutando tablas, sean éstas periódicas o no. La manera de suprimir el ruido es configurar 0 como parámetro de desvío.

- **Medición de Tiempos desde "Ejecutar"** : es una **estimación** del tiempo de respuesta del sistema desde que se ejecuta la rampa negativa o la tabla hasta que se abren los contactores. Esta estimación es siempre mayor que el tiempo de respuesta, ya que incluye los tiempos de la PC, la comunicación con el módulo Emulador de Sensores, la respuesta de este último, del NI CompactDAQ y lectura desde la PC del mismo. Se realizó una comparación con casos medidos por osciloscopio y se estimó que las mediciones de este cuadro están **sobrestimadas** en **90mseg**, que corresponde al tiempo de respuesta al escalón. Por lo tanto hay que tener en cuenta esta limitación al utilizarlo.

Por último, la tercera solapa muestra un gráfico de los valores de presión leídos desde la trama enviada por UDP desde el Registrador del Sistema. En la Figura 22 se puede ver una captura de esta pantalla con una forma periódica Tipo RI con un ruido sumado con desviación estándar de  $76\mu A$  de corriente sobre la señal de en la salida del Emulador de Sensores, que representa 0.71 bares en rango de presión.



**Figura 22.** Pantalla de la tercera solapa de interfaz de usuario con las lecturas de presiones leídas a través del Registrador de Sistema.

En esta pantalla además figura la cantidad de tramas recibidas y perdidas, y el porcentaje de tramas perdidas desde el inicio de la ejecución del programa. El eje de tiempo del gráfico está en segundos también desde el inicio del programa. En el gráfico se mantienen los últimos 1000 datos recibidos.

### 3.4.3 Archivo de Configuración Inicial

Al ejecutarse el programa lee un archivo de configuración inicial llamado *NI-SIA.ini*. En el mismo se pueden configurar los siguientes parámetros y opciones:

- Sección [*EmuladorSensores*]:
  - *Puerto* : Puerto de comunicación serie emulado por la comunicación USB con el microcontrolador LPC-H2148 del Módulo Emulador de Sensores (ej. *COM6*).
  - *ValorInicialSensorX* : donde X va de 1 a 6, son los valores que carga como valor constante en los 6 canales del Emulador de Sensores, en escala del DAC 0-4095.
  - *SeteoInicial* : (*SI* o *NO*) habilitación de los valores iniciales anteriores durante el inicio.
  - *Conv\_DACtomA\_Pendiente* : pendiente correspondiente a la calibración lineal global del Emulador de Sensores (ver 3.2.2.3)
  - *Conv\_DACtomA\_Ordenada* : ordenada al origen correspondiente a la calibración lineal global del Emulador de Sensores (ver 3.2.2.3)
- Sección [*NI-DAQ*]:
  - *ResetInicial* : (*SI* o *NO*) automatismo para realizar un reset 10 segundos después del Seteo Inicial
- Sección [*Registrador*]:
  - *IP* : dirección IP del Registrador de Datos.
  - *TCPPort* : puerto TCP del Registrador del Sistema a donde realiza la conexión inicial el programa, de manera que el Registrador devuelva las tramas por puerto UDP.
  - *UDPPort* : puerto UDP por donde se recibirá la retransmisión de tramas de estado desde el Registrador.

### 3.5 Ensayos realizados, resultados y hallazgos encontrados durante el proceso de Verificación

Se planificó una serie de ensayos de modalidad *caja negra* para la verificación en fábrica del SIA (factory acceptance test) utilizando el equipamiento y software descrito en los puntos anteriores.

La Tabla 10 resume los ensayos a realizar y el requerimiento que verifica (junto con la sección donde se los describe) .

Sección	Ensayo	Requerimiento que Verifica
3.5.1	Reset de los trenes	Reposición del sistema y la detección de fallas que involucran a la línea de <i>reset</i> (2.4.2 y 2.4.4)
3.5.2	Prueba de Lámparas y Medición de consumo	Prueba de Lámparas (2.3.7) y medición del consumo máximo del sistema
3.5.3	Test de Disparo de Tren	Test de Disparo y fallas involucradas (2.4.4)
3.5.4	Fuera de rango de los sensores	Falla por fuera de rango de las señales de entrada (2.4.1 y 2.4.2)
3.5.5	Ejecución continua con valores constantes y verificación del rango de alimentación	Verificar el funcionamiento global del sistema en estado estacionario de las señales de entrada en todo el rango de alimentación (2.3.1)
3.5.6	Simulación de escalones de presión y medición de tiempos de respuesta	Disparo ante escalón y medición del tiempo de respuesta (2.3.9)
3.5.7	Disparos individuales por escalón	Señalización de disparos Registrados y No registrados en los Módulos Comparación y Disparo (2.4.2.1) y la lógica de votación (2.4.4)
3.5.8	Simulación de rampas negativas y estimación del tiempo de respuesta del sistema	Algoritmo de detección de caída abrupta de presión, estimulando las señales de entrada de manera de verificar el comportamiento según los parámetros de disparo configurados en el Módulo Acondicionador de Señales (2.4.1 y 2.4.2)
3.5.9	Simulación de rampas máximas que no deben producir disparo	Precisión del parámetros <i>A</i> y algoritmo de detección de caída abrupta de presión sin disparos espurios cuando se le presentan al sistema rampas extremas que coinciden con este parámetro (2.4.1 y 2.4.2)
3.5.10	Simulación de rampas abruptas con excursiones pequeñas que no deben producir disparo	Precisión del parámetros CPA y algoritmo de detección de caída abrupta de presión sin disparos espurios cuando se le presentan al sistema formas de onda con cambios abruptos (mucho mayores a <i>A</i> ) y con excursiones extremas que coinciden el margen de disparo CPA (2.4.1 y 2.4.2)
3.5.11	Señales constantes con ruido	Comportamiento del margen de disparo CPA ante una señal estable ruidosa (2.4.1 y 2.4.2) y búsqueda de la amplitud de ruido tolerable sin que se produzcan disparos espurios
3.5.12	Simulación de rampas máximas que no deben producir disparo con ruido	Comportamiento del algoritmo de disparo ante una señal con pendiente negativa similar al parámetro de disparo <i>A</i> con ruido sumado y búsqueda de la amplitud de ruido tolerable en esta condición sin que se produzcan disparos espurios
3.5.13	Simulación de eventos iniciantes tipo Rotura 0.1A y 2A en la rama fría del circuito primario	Efectividad de disparo ante simulaciones de eventos iniciantes tipo Rotura 0.1A y 2A en la rama fría (2.4.1 y 2.4.2)
3.5.14	Detección de fallas de comunicación entre los comparadores y los votadores	Detección de fallas en el entrecruzamiento de información de disparo desde los Módulos de Comparación y Disparo a los Módulos de Votación; y verificar el comportamiento del tratamiento de la falla como disparo de los sensores correspondientes (2.4.4)
3.5.15	Detección de desconexión de módulos	Detección de desconexión de módulos a través de la Señal de Inserción (2.3.6) y otros efectos sobre el resto del sistema

**Tabla 10. Planificación de ensayos**

### 3.5.1 Reset de los trenes

Utilizando el botón *Reset All* y los botones de reset individuales de la primera solapa del software se verificó que:

- La utilización de éstos tuvo el efecto de restauración desde el disparo tanto de los módulos de Comparación y Disparo, así como también de los Votadores.
- Para el caso de Módulo de Comparación y Disparo, el reset es efectivo solo después de haber desaparecido la señal de Disparo No Registrado del sensor correspondiente. Esto es consistente con las especificaciones.
- Para el caso de Módulo de Votación, el reset es efectivo cuando al menos 2 sensores de cada loop están sin disparo. Esto es consistente con las especificaciones.
- Al dejar presionado cualquiera de los botones de reset por más de 5 segundos ambos módulos dan falla consecuentemente con lo especificado en 2.4.2.1 y en 2.4.4. La falla desaparece al soltar el botón de reset y el sistema se repone normalmente. Esta prueba se repitió al menos 10 veces en el transcurso de los meses de prueba y en todas ellas el resultado fue coherente. A esta prueba se le agregó el hecho simular una forma de onda de presión tal que el sistema debe disparar mientras se mantenía presionado el comando de *reset*. Se observó que el disparo se produjo independientemente de que los módulos estén indicando falla, verificando de esta manera que el sistema soporta una falla sobre la línea de *reset*, sin producir disparo por falla, pero disparando si las condiciones de disparo reales se produjeren.

### 3.5.2 Prueba de Lámparas y Medición de consumo

La prueba de lámparas se ejecutó con éxito todas las veces que se probó (al menos 20 en el transcurso de los meses de prueba).

Además, cuando ésta se ejecuta, se produce el máximo consumo del sistema. Para realizar una medición sobre una sola de las líneas de alimentación se desconectó la alimentación de PM que se realiza con la fuente fija de 24V 15A, dejando que todo el consumo se realice a través de la fuente de doble regulable que permite una lectura directa del consumo en el indicador de la misma. Se varió la fuente para tener las mediciones tanto con la tensión nominal de 24V, como en los extremos del rango de tensión de las baterías de la central.

Tensión de Alimentación	Consumo Máximo (Bajo prueba de lámparas)
20V	3.90 A
24V	3.57 A
30V	3.10 A

**Tabla 11.** Tabla de valores del consumo total sumado de los 4 Trenes de Medición y del Tren de Registro para varios valores de tensión de alimentación.

Cabe mencionar que este consumo medido no incluye a los contactores, ya que los mismos se alimentan desde la fuente fija de 24V 15A.

### 3.5.3 Test de Disparo de Tren

La primera vez que se ejecutó la prueba de Test de Disparo de Tren se observó que los Módulos de Votación de la diversidad A (FPGA de Xilinx) no ejecutaban correctamente el pedido de test en el Tren 4, mientras que en los otros trenes el pedido era efectivo. Se realizó el pedido de corrección al responsable de la implementación de este módulo, luego de la cual la prueba se ejecutó en forma exitosa en todos los trenes.

Al probar el pedido conjunto de test sobre varios trenes simultáneamente se observó un comportamiento distinto en ambas diversidades. Los Módulos de Votación de la diversidad B (FPGA Actel) anuncian falla solo sobre los trenes a los que se está pidiendo Test de Disparo, mientras que los módulos de la diversidad A anuncian falla en todos los trenes.

Para determinar cuál de los dos comportamientos era el correcto se buscó el punto que lo detalla en la Ingeniería de Detalle del Sistema [10]. El mismo se transcribe a continuación:

*"12.3.10.5 Falla por Múltiples pedidos de Test*

*Por las entradas result\* se recibe el estado de la señal Test de Tren de cada uno de los trenes. **Si el tren actual** recibe un pedido de test de tren o está en test, y alguno de los demás trenes también tiene pedido de test, se genera falla sin disparo, por detectarse multiplicidad de pedidos de Test. La señal Interna "f\_MultTest" se pone en 1, y el módulo deja de estar en Test si lo estaba."*

Se observa que la especificación aclara que la falla se anuncia sobre el tren actual que recibe el pedido de test, por lo que se resolvió solicitar la corrección de comportamiento al responsable de la diversidad A.

Luego de la corrección se continuó con el plan de prueba normal, que se comenta a continuación.

Desde el estado de funcionamiento normal, sin disparo, se realizaron la ejecución de los Test de Disparo de Tren, de a un tren por vez, al menos 10 veces durante los meses de prueba, obteniendo en todos los casos resultados satisfactorios. Es decir que se produce el disparo del votador y del driver del tren seleccionado, con la consecuente apertura de los contactores.

Se probaron también la ejecución conjunta de más de un Test de Disparo de Tren simultáneo, en todas sus combinaciones (en total 10), dando en todas ellas falla en los Módulos de Votación y la inhabilitación del test, sin disparar el driver y reteniendo los contactores. Esto es consistente con el especificado.

### *3.5.4 Fuera de rango de los sensores*

Configurando con valores contantes los distintos canales del emulador de sensores, sin ruido sumado, se comprobó que la detección de fuera de rango por debajo de 4mA en los Módulos de Comparación y Disparo se produce entre los de valores de 1.795V y 1.885V, que corresponde a una corriente de entrada de 3.59mA y 3.77mA.

Si se continúa bajando el nivel de entrada, pasan a dar falla también los Módulos Acondicionadores de Señales, que tienen como función una detección más grosera del fuera de rango por desconexión del sensor. La falla se produce entre los valores de 1.59V y 1.73V, que corresponden a corrientes de 3.18mA y 3.46mA.

Se comprobó también que la falla continúa desde estos valores hasta alcanzar 0mA.

Por arriba de los 20mA (10V) la falla se detectó en los módulos de Comparación y Disparo entre los valores de 10.2V y 10.3V, que corresponde a corrientes de 20.4mA a 20.6mA. Y en los Módulos Acondicionadores de Señales entre los valores de 10.8V y 11V, que corresponden a corrientes 21.6mA y 22mA.

Todo lo probado en este punto verifica correctamente el funcionamiento esperable del sistema.

### 3.5.5 Ejecución continua con valores constantes y verificación del rango de alimentación

El sistema estuvo más de 4 meses en funcionamiento con entradas constantes por encima del nivel  $LA+CPA=82\text{bar}+7\text{bar}$ . En estos niveles el algoritmo podría producir disparo si se detectase un cambio abrupto de valor. Parte de estos 4 meses fueron previos al montaje del sistema de verificación descrito, durante la puesta en marcha, donde no se tenía al módulo Emulador de Sensores, y como emulador rudimentario de sensor se utilizó un resistor.

Ni con el emulador rudimentario a resistor ni con el montaje final de verificación se detectaron disparos espurios, probando en gran medida el correcto diseño y la robustez del sistema en estado estacionario.

Además, durante este periodo se hizo funcionar el sistema variando la fuente de alimentación doble de manera de verificar que el sistema funcionaba correctamente en todo el rango especificado de alimentación (ver 2.3.1). La prueba consistió en configurar la tensión de alimentación L+ a 20V durante lapso de 1 semana y a 30V durante otra semana. Luego se procedió a realizar el mismo procedimiento sobre L-, a valores de -20V y -30V. Salvo el cambio de consumo sobre la alimentación respectiva, no se observaron cambios de comportamiento.

### 3.5.6 Simulación de escalones de presión y medición de tiempos de respuesta

Por medio de cambio abrupto de valores constantes, se simuló un escalón en las entradas de corriente. Teniendo en cuenta que  $LA = 82 \text{ bar}$  y  $CPA = 7 \text{ bar}$ , se eligió como valor inicial un valor entre 145 bar y 110 bar; y valor final entre 92 bar y 82 bar.

La secuencia de pasos realizados fue:

1. Configurar el valor contante entre 145 bar y 110 bar en la segunda solapa del software y presionar *Set All*.
2. Al cabo de unos segundos reponer todo el sistema presionando *Reset All*, y *Toma de conocimiento* para pasar todos los registros en amarillo a verde (en la primera solapa)
3. Configurar el valor constante entre 92 bar y 82 bar, produciendo de esta manera un escalón entre el valor anterior y este último al momento de presionar *SetAll*.
4. Mirando los frentes de los módulos al presionar *SetAll*, se verificó que todos los leds de Disparo se hayan activado, tanto en los Módulos de Comparación y Disparo, en los de Votación, así como en los Módulos de Drivers. En el Módulos de Adaptador Entrada/Salida se verificó que se enciendan los leds asociados a los Disparos Registrados, mientras que los No Registrados se encienden por un momento y luego se apagan. Todo este comportamiento también se verificó en los paneles de lectura del NI CompactDAQ de la primer solapa de la interfaz de usuario.
5. Luego de desaparecer las señales de Disparo No registrados, se puede volver a reponer el sistema presionando *Reset All*.

Se utilizó este procedimiento para verificar los tiempos de respuesta de cada punto del sistema. Para ellos se utilizó un osciloscopio de 4 canales, 200Mhz modelo Rigol DS4024. Se tomaron los tiempos de respuesta ante un escalón.

Se observó que en todas las mediciones realizadas, los módulos de la diversidad B (FPGA Actel) respondieron con más lentitud, por lo que se tomaron estos números de

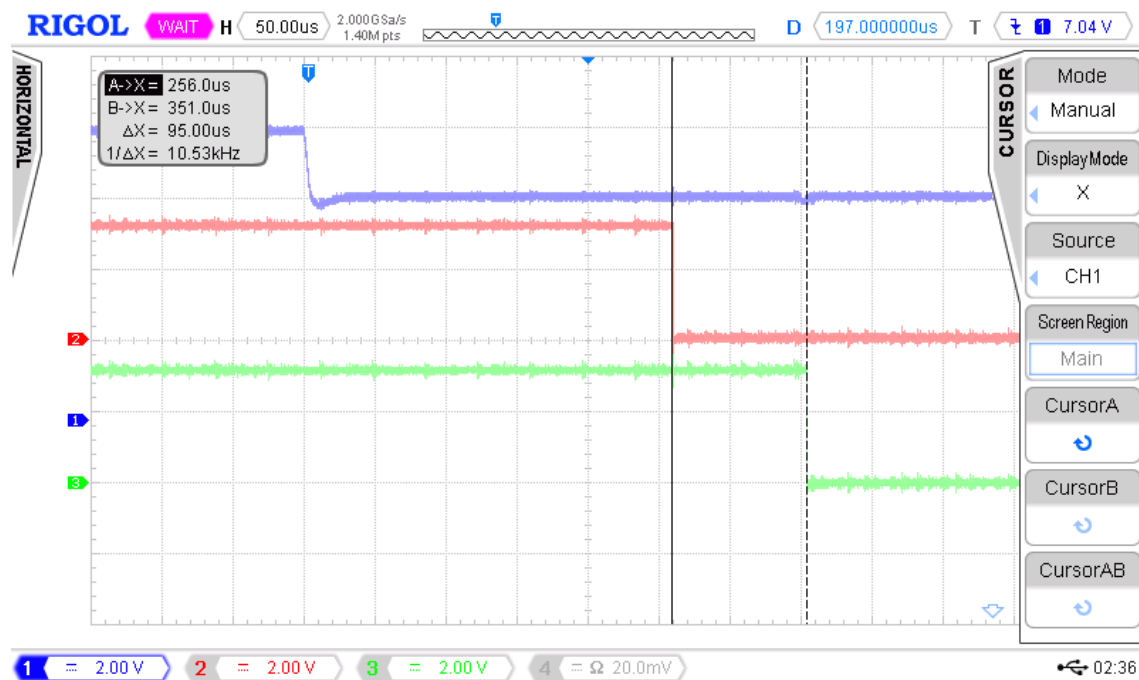
manera conservativa. La medición se realizó en 2 etapas utilizando 3 canales en cada una. La primera desde la señal con el escalón hasta el disparo del votador (Figura 23) y la segunda desde el disparo del votador hasta el retroaviso del contactor. Se realizaron 10 mediciones de cada parte y en la Tabla 12 se volcó el valor máximo obtenido para cada una comparándolos con los valores especificados en los requerimientos [9].

Medición	Tiempo mínimos especificados en los requerimientos	Máximo Tiempo Medido (10 mediciones)
Tiempo de respuesta de la unidad de comparación	2 ms	0.292 ms
Tiempo de respuesta de la unidad de votación	1 ms	0.155 ms
Tiempo de respuesta de la unidad de driver	0.3 ms	0.106 ms
Tiempo de respuesta de los contactores	15 ms	10.7 ms

**Tabla 12.** Tabla con máximos tiempos de respuesta medidos ante un escalón de entrada y la comparación con los tiempos esperables especificados en los requerimientos del SIA

Se observa que todos los valores medidos son menores con los esperables en la etapa de requerimientos, verificando de esta manera el cumplimiento de los mismos.

Se puede también mencionar que los valores obtenidos son coherentes con los obtenidos anteriormente durante la ejecución del protocolo de ensayo "Medición de tiempo de respuesta del sistema de inyección de boro alternativo para CNAII" [22][23], cuyo objetivo era realizar la medición del tiempo de respuesta total previo al montaje del rack de verificación.



**Figura 23.** Captura de la pantalla de osciloscopio de una de las mediciones de tiempo de respuesta del Módulo de Comparación y Disparo (256.0us), y del Módulo de Votación (95.00us).

### 3.5.7 Disparos individuales por escalón

Se utilizó la capacidad de la interfaz para realizar escalones en la señal como se explicó en el punto anterior, pero en vez de presionar el botón *Set All*, se presionaron los botones individuales *P11 .. P23*, del recuadro de configuración de valores constantes.

Al producir un escalón sobre una sola entrada se deberá producir disparo de ese sensor, sobre ese tren, en las 2 diversidades del Módulos de Comparación y Disparo; y en todos los votadores se debe encender el led que indica que esa entrada de la 2/3 respectiva está disparada. En ningún caso, ante un escalón individual se deberá disparar la salida del votador, y tampoco la de los drivers.

Tanto en el Módulo de Adaptador de Entrada/Salida, como en el panel de lectura de la primera solapa de la interfaz se deberá observar el cambio simultáneo del *Disparo No Registrado* y *Disparo Registrado* correspondiente al sensor estimulado. Luego de unos segundos el primero deberá desaparecer, mientras el segundo se deberá conservar hasta que se realice la reposición a través del comando de *reset*.

Se observó en las primeras pruebas que tanto en el Módulo de Adaptador de Entrada/Salida como en el panel de lectura, al realizar un escalón sobre una entrada, se encendían las indicaciones de Disparo No Registrado de los 2 loops. Se investigó el problema utilizando un multímetro sobre la placa de interconexiones llegando a la conclusión que los Módulos de Comparación y Disparo diversidad A (FPGA Xilinx) tenía intercambiados los pines de los Disparos No Registrados. Se solicitó al responsable de esa implementación de corregir el error.

Luego de la corrección, se observó que todas las pruebas de escalones individuales sobre los sensores fueron correctas. Esto es que los escalones con diferencias menores a CPA no produjeron disparo, mientras que los mayores sí lo hicieron.

### 3.5.8 Simulación de rampas negativas y estimación del tiempo de respuesta del sistema

Considerando que *A*, *B*, *CPA* y *LA* son los parámetros con que se configuran a los Acondicionadores de Señales y  $A_{señal}$  la pendiente de la señal como se configura en la interfaz; se puede considerar que el disparo podrá producirse únicamente si  $A_{señal} > A$  (ambas expresadas en módulo). En caso contrario, nunca deberá producirse.

Dentro de los casos  $A_{señal} > A$  el disparo se dará si la rampa negativa tiene un recorrido tal que *PZ* se distancie de *PA* una valor *CPA* antes de que llegue a su límite inferior de recorrido.

Una manera de determinar los casos que el sistema disparará es a través del cálculo del retardo al disparo sistemático debido al algoritmo de detección, y compararlo con la duración de la rampa *TR*. El retardo al disparo se puede calcular como:

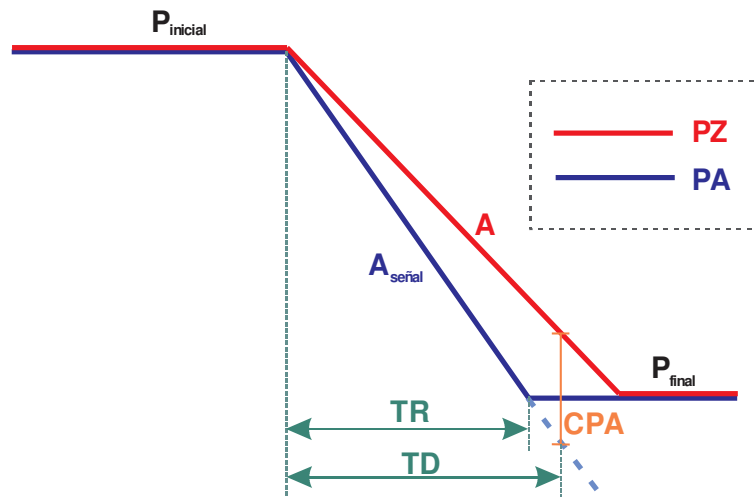
$$TD = \frac{CPA}{A_{señal} - A}$$

Este valor es solo debido al algoritmo de detección y cabe aclarar que no tiene en cuenta los tiempos de respuesta de la implementación que fueron medidos en la sección 3.5.6.

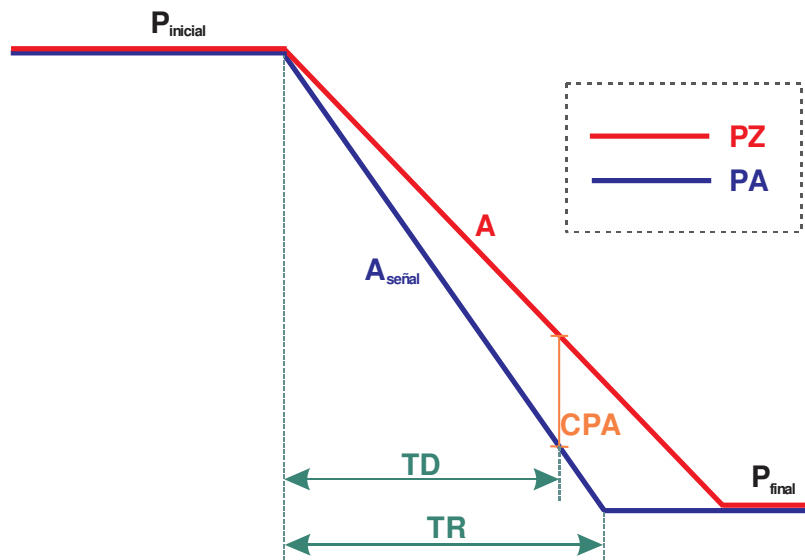
El disparo se dará si la rampa negativa tiene una duración mayor que el retardo al disparo. La duración de la rampa *TR* se puede calcular como:

$$TR = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{A_{señal}}$$

En la Figura 24 se muestra un ejemplo donde  $TR < TD$  y no se produce disparo; mientras que en la Figura 25 se ve un segundo ejemplo con  $TR > TD$  con disparo.



**Figura 24.** Ejemplo de Rampa Negativa sin disparo



**Figura 25.** Ejemplo de Rampa Negativa con disparo.

Para completar este análisis se debe tener en cuenta los errores de ajuste y lectura de los parámetros de disparo, que se configuran a través de potenciómetros en el Módulo Acondicionador de Señales. El error de ajuste a través del potenciómetro es del 0.5% a fondo de escala, y la lectura de ese valor que se realiza en los Módulos de Comparación y Disparo, suma otro 0.5% a fondo de escala. En total, los parámetros pueden tener 1% de error a fondo de escala en su interpretación, por lo que los errores en los valores anteriormente calculados quedan:

$$\Delta_{TD} = TD \left( \frac{\Delta_{CPA}}{CPA} + \frac{\Delta_A}{A_{señal} - A} \right)$$

donde se asumió que el error de la pendiente de la señal  $A_{señal}$  es despreciable frente al error en la interpretación del parámetro  $A$ .

Ahora considerando los errores en  $TD$  se pueden distinguir 3 casos:

$$TR < TD - \Delta_{TD} \quad \text{No se produce disparo}$$

$$TD - \Delta_{TD} < TR < TD + \Delta_{TD} \quad \text{Puede o no producirse disparo (Inderminado)}$$

$$TR > TD + \Delta_{TD} \quad \text{Debe producir el disparo}$$

Para las pruebas, se eligieron 3 grupos de parámetros de disparo  $A$ ,  $B$ ,  $LA$  y  $CPA$ ; y se realizaron 10 corridas para 4 rampas con distintas pendientes, todas las cuales deben producir disparo.

Se utilizó el tiempo de respuesta leído por el programa solo a modo de obtener una *medición aproximada* del tiempo de respuesta de cada ejecución, sabiendo que éste es siempre es mayor al real como se explicó en 3.4.2.

De medición a medición se fueron variando los canales ejercitados, seleccionando al menos dos de algunos de los loops, de manera que se produzca disparo de los votadores (y con ellos de los drivers y los contactores).

Parámetros	$P_{inicial}$ [Bar]	$P_{final}$ [Bar]	$A_{Señal}$ [Bar/ seg]	$TR$ [seg]	$TD-\Delta TD$ [seg]	$TD+\Delta TD$ [seg]	Disparó las 10 veces?	Medición Promedio por Interfaz
<b>A = 6bar/s</b> <b>B = 15bar/s</b> <b>CPA = 7bar</b> <b>LA = 82bar</b>	140	82	8	7.250	1.875	5.125	Sí	3.457 seg
	115	85	15	2.000	0.568	0.988	Sí	0.820 seg
	115	105	50	0.200	0.123	0.195	Sí	0.253 seg
	115	105	200	0.050	0.028	0.044	Sí	0.125 seg
<b>A = 15bar/s</b> <b>B = 30bar/s</b> <b>CPA=5bar</b> <b>LA = 70bar</b>	140	80	18	3.333	0.889	2.444	Sí	1.700 seg
	115	85	30	1.000	0.222	0.444	Sí	0.383 seg
	115	100	100	0.150	0.041	0.077	Sí	0.153 seg
	115	105	200	0.050	0.019	0.035	Sí	0.120 seg
<b>A = 50bar/s</b> <b>B = 50bar/s</b> <b>CPA = 9bar</b> <b>LA = 90bar</b>	140	90	65	0.769	0.480	0.720	Sí	0.678 seg
	115	90	100	0.250	0.148	0.212	Sí	0.289 seg
	115	95	150	0.133	0.075	0.105	Sí	0.195 seg
	115	100	200	0.075	0.050	0.070	Sí	0.165 seg

**Tabla 13.** Tabla con resultados de las ejecuciones de Rampas Negativas para distintos casos. Por cada renglón se realizaron 10 mediciones.

Debido a las limitaciones en la medición del tiempo de respuesta de la interfaz se observa que para valores de  $TD$  pequeños (menores a 0.3seg) los valores medidos son mayores a  $TD+\Delta TD$ . De todas formas el objetivo de la prueba no era una medición precisa de este tiempo, sino la comprobación de que el disparo se produjo a tiempo razonable, que sobreestima el tiempo de disparo real en 90ms. Por lo tanto, el tiempo de disparo medido por la interfaz debería ser menor a  $TD+\Delta TD+90ms$ , condición que se dio en todos los casos.

### 3.5.9 Simulación de rampas máximas que no deben producir disparo

Se utilizaron las formas de onda triangulares implementadas en la interfaz para simular repetitivamente durante tiempos prolongados, caídas de presión coincidentes con el parámetro  $A$ .

Principalmente se simuló utilizando los parámetros del sistema original ( $A=6\text{bar/s}$ ,  $B=15\text{bar/s}$ ,  $LA=82\text{bar}$  y  $CPA=7\text{bar}$ ), durante varios días de prueba. Además se probaron otros dos conjuntos de parámetros.

Para la selección de los límites de amplitud de la señal se utilizó el criterio de partir de un valor alto cercano al máximo valor de entrada y finalizar en el valor  $LA$ , donde el algoritmo de detección deja de producir disparo. Éste es el peor caso al que el algoritmo deberá responder sin producir disparo.

En este punto se probaron señales sin ruido sumado.

En la Tabla 14 se resumen las pruebas realizadas y sus resultados

Parámetros	Señal Simulada	Tiempo Acumulado de Prueba	Resultado
$A = 6\text{bar/s}$ $B = 15\text{bar/s}$ $CPA = 7\text{bar}$ $LA = 82\text{bar}$	Tipo RI Valor Máximo= $145\text{bar}$ Valor Mínimo= $82\text{bar}$ Pendiente= $6\text{bar/s}$	22 días	Sin disparos espurios
	Tipo Triangular Pura Valor Máximo= $145\text{bar}$ Valor Mínimo= $82\text{bar}$ Pendiente= $6\text{bar/s}$	8 días	Sin disparos espurios
$A = 15\text{bar/s}$ $B = 30\text{bar/s}$ $CPA = 5\text{bar}$ $LA = 70\text{bar}$	Tipo RI Valor Máximo= $145\text{bar}$ Valor Mínimo= $70\text{bar}$ Pendiente= $15\text{bar/s}$	3 días	Sin disparos espurios
$A = 50\text{bar/s}$ $B = 50\text{bar/s}$ $CPA = 9\text{bar}$ $LA = 90\text{bar}$	Tipo RI Valor Máximo= $145\text{bar}$ Valor Mínimo= $100\text{bar}$ Pendiente= $50\text{bar/s}$	3 días	Sin disparos espurios

**Tabla 14.** Resumen de las simulación de rampas máximas que no deben producir disparo

### 3.5.10 Simulación de rampas abruptas con excursiones pequeñas que no deben producir disparo

Se utilizaron las formas de onda triangulares implementadas en la interfaz para simular repetitivamente durante tiempos prolongados caídas de presión abruptas (con pendientes mayores a  $A$ ), pero con excursiones menores al margen de disparo  $CPA$ .

Principalmente se simuló utilizando los parámetros del sistema original ( $A=6\text{bar/s}$ ,  $B=15\text{bar/s}$ ,  $LA=82\text{bar}$  y  $CPA=7\text{bar}$ ), caso con el cual se juntaron varios días de prueba. Además se probaron otros dos conjuntos de parámetros más.

Para la selección de los límites de amplitud de la señal se utilizó el criterio de que tanto el valor máximo como el mínimo sean superiores a  $LA$ , donde el algoritmo de detección deja de producir disparo, y que la diferencia entre ellos sea igual a  $CPA$ . Además, se elige un valor de pendiente de la señal muy superior a  $A$ .

En este punto se probaron señales sin ruido sumado.

En Tabla 15 se resumen las pruebas realizadas y sus resultados.

Parámetros	Señal Simulada	Tiempo Acumulado de Prueba	Resultado
A = 6bar/s B = 15bar/s CPA = 7bar LA = 82bar	Tipo RI Valor Máximo=107bar Valor Mínimo=100bar Pendiente=20bar/s	3 días	Sin disparos espurios
A = 15bar/s B = 30bar/s CPA = 5bar LA = 70bar	Tipo RI Valor Máximo=95bar Valor Mínimo=90bar Pendiente=50bar/s	20 horas	Sin disparos espurios
A = 50bar/s B = 50bar/s CPA = 9bar LA = 100bar	Tipo RI Valor Máximo=119bar Valor Mínimo=110bar Pendiente=150bar/s	20 horas	Sin disparos espurios

**Tabla 15.** Resumen de las simulaciones de rampas abruptas con excursiones pequeñas que no deben producir disparo.

### 3.5.11 Señales constantes con ruido

Se utilizaron las capacidades implementadas de simulación de ruido con distribución normal sobre señales constantes, para determinar y verificar qué niveles de ruido son aceptables sobre las señales de entrada sin producir disparos espurios.

Después de varios días de prueba y variación de los valores de ruido se observó que con los parámetros del sistema original (A=6bar/s, B=15bar/s, LA=82bar y CPA=7bar) se podía ingresar ruido del orden de los **100µA** de **desviación estándar** sobre las señales de corriente **sin** que se produjesen **disparos espurios**. Este valor equivale a 0.5% a fondo de escala. Esta situación se probó durante 3 días de corrido.

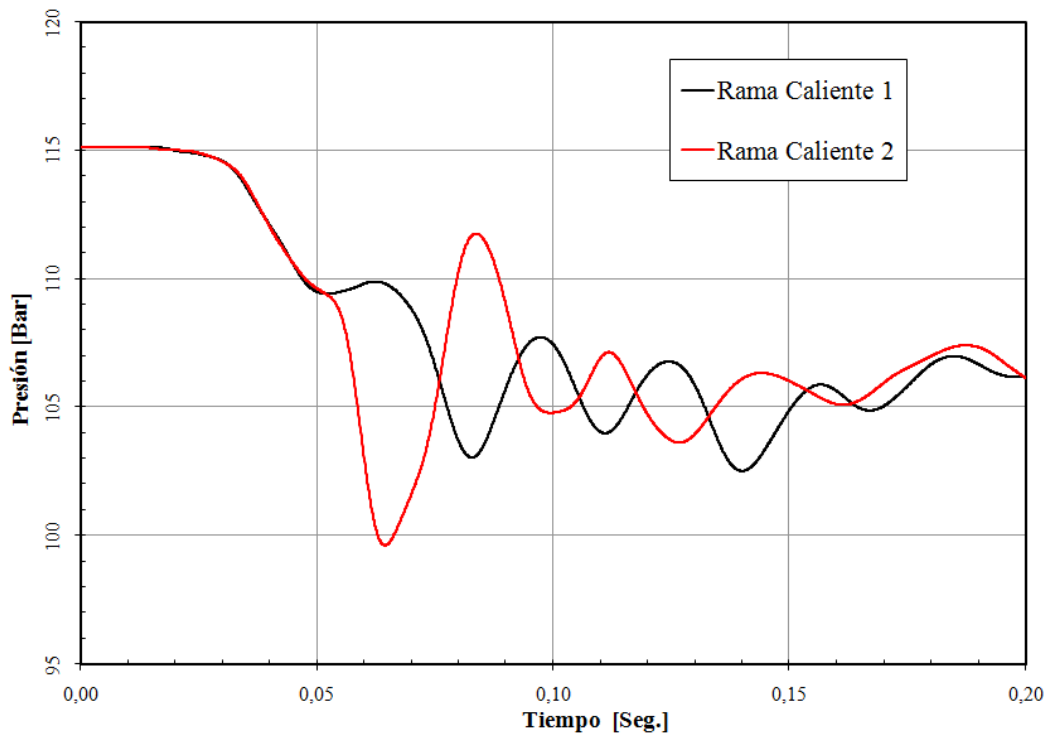
### 3.5.12 Simulación de rampas máximas que no deben producir disparo con ruido

Se realizó la combinación de pruebas de las secciones 3.5.9 y 3.5.11. Se observó que ante la rampa máxima, el nivel de ruido sin disparos espurios no podía conservarse en los mismos niveles que en el caso de señal constante.

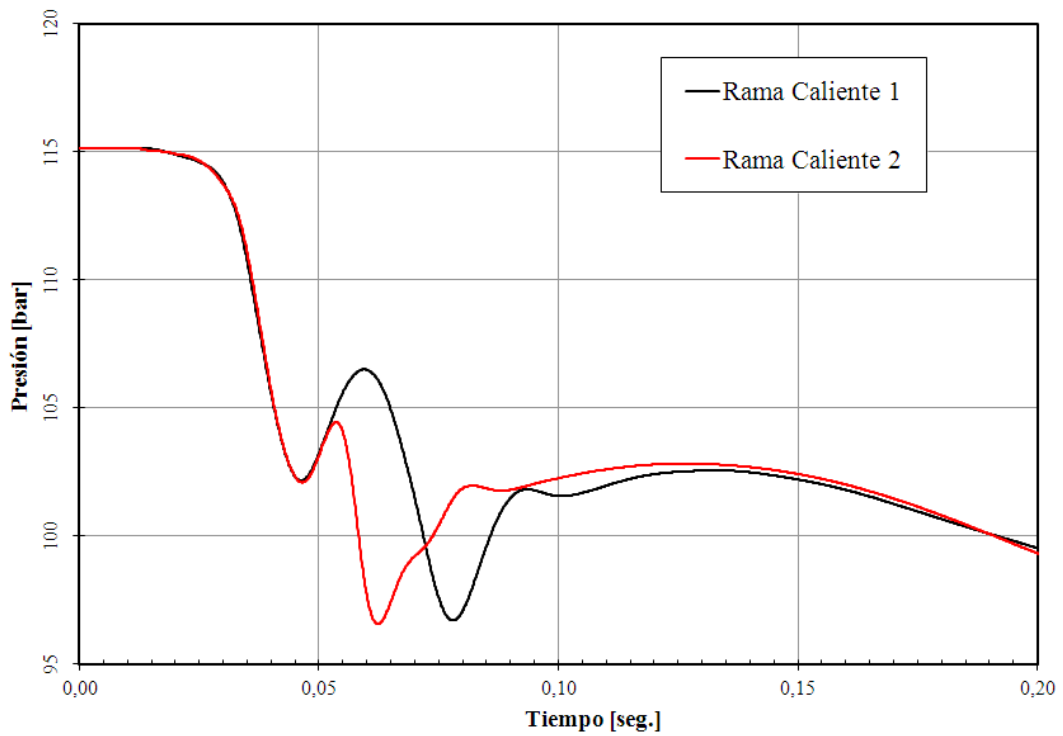
Se observó que, con los parámetros del sistema original (A=6bar/s, B=15bar/s, LA=82bar y CPA=7bar) y señal periódica tipo RI con valor máximo de 145bar, mínimo de 82bar y pendiente de 6 bar/seg, se podía sumar ruido del orden de los 76µA de desviación estándar. Se acumularon 10 días de prueba de esta situación sin disparos espurios de ningún canal. Una captura de pantalla de la solapa con las señales adquiridas a través del registrador de esta prueba se puede ver en la Figura 22.

### 3.5.13 Simulación de eventos iniciantes tipo Rotura 0.1A y 2A en la rama fría del circuito primario

El grupo de Análisis de Seguridad y Diseño del Núcleo de la CNAll facilitó las curvas de presión de las ramas calientes, simuladas mediante código RELAP, ante roturas de la rama fría del circuito primario de la central. Estas curvas se muestran en las Figura 26 y Figura 27.



**Figura 26.** Simulación de las señales de presión sobre los sensores del sistema ante una rotura 0.1A de la rama fría del circuito primario (Provistas por CNAII).



**Figura 27.** Simulación de las señales de presión sobre los sensores del sistema ante una rotura 2A de la rama fría del circuito primario (Provistas por CNAII).

Se realizaron archivos con los valores en los formatos de tabla descritos en 3.4.2 y se realizaron 10 corridas de cada uno con los parámetros de disparo del sistema original (A=6bar/s, B=15bar/s, LA=82bar y CPA=7bar). Todas las corridas dieron disparo en todos los canales, siendo esto coherente con las pendientes muy abruptas de estas señales (la menos abrupta es la Rama Caliente 1 en la rotura 0.1A que es de 145bar/seg, las otras tienen pendientes mayores).

Se concluye que para el algoritmo de detección, este tipo de entradas son equivalentes a escalones por que las pendientes involucradas son grandes.

#### *3.5.14 Detección de fallas de comunicación entre los comparadores y los votadores*

Por criterio de falla sin riesgo, cualquier falla en las comunicaciones que indican disparo entre los Módulos de Comparación y Disparo y los Módulos de Votación, son procesadas en estos últimos como disparo de los sensores correspondientes.

Se desconectó cada cable de fibra óptica en los Módulos Receptores correspondiente a los votadores, verificando que los Leds del frente del mismo indicaran disparo de los sensores respectivos.

También se probó la desconexión múltiple sobre un mismo Módulo de Votación, resultando en el disparo del mismo.

Por último, se probó la desconexión simple y el disparo por escalón de un sensor que no corresponda al cable desconectado, verificando el disparo del votador por una falla considerada como disparo y un disparo real.

#### *3.5.15 Detección de desconexión de módulos*

Se realizó la verificación de la detección de desconexión de módulos. Esta detección se realiza de varias maneras. La primera es a través de la señal de Inserción de Módulos (ver 2.3.6). Existe una señal de este tipo por cada tren, las cuales se muestran en los Paneles de Lecturas de la primera solapa del programa (Figura 20). La segunda, es por detección de fallas en los módulos que leen señales del módulo desconectado. De esta manera se puede construir una tabla con los efectos de la desconexión de cada módulo sobre el resto del sistema. Se extrajo cada uno de los módulos y se completó la Tabla 16 con los efectos observados.

Módulo Desconectado	Detectado por									
	Mismo Tren								Otros Trenes	
	Señal Inser.	Adap. E/S	CyD #1	CyD #2	Vot #1	Vot #2	Conc. Datos	Driv. Pot.	Adap. E/S	Votad.
Adaptador de Entrada/Salida	Sí									
Acondicionador de señales 1	Sí	Falla DispL1	Falla2 DispL1	Falla2 DispL1						
Acondicionador de señales 2	Sí	Falla DispL2	Falla2 DispL2	Falla2 DispL2						
Comparación y Disparo #1	Sí	Falla DispL1 DispL2		Falla1 DispL1 DispL2	Falla2		Falla2 Falla3 Falla4			
Comparación y Disparo #2	Sí	Falla DispL1 DispL2	Falla1 DispL1 DispL2			Falla2	Falla2 Falla3 Falla4			
Transmisor de Fibra Óptica 1	Sí							Falla	Vot#1 Falla2	
Transmisor de Fibra Óptica 2	Sí							Falla	Vot#2 Falla2	
Receptor de Fibra Óptica 1	Sí	Falla DispT			Falla2 DispT	Falla1 DispT		DispT		
Receptor de Fibra Óptica 2	Sí	Falla DispT			Falla1 DispT	Falla2 DispT		DispT		
Votador Diversidad #1	Sí	Falla DispT				Falla1 DispT	Falla2	DispT		
Votador Diversidad #2	Sí	Falla DispT			Falla1 DispT		Falla2	DispT		
Concentrador de Datos	Sí	Falla								
Driver de Potencia	Sí	Falla DispT								

**Tabla 16. Efectos de desconexión de módulos**

Se observa en la tabla que el único módulo que al ser extraído tiene efecto solo sobre la Señal de Inserción es el Adaptador de Entrada/Salida, mientras que todos los demás tienen efectos también sobre otros módulos. Pero la extracción de este módulo produce la caída a nivel bajo de todas las señales digitales del tren que son leídas por la instrumentación de planta, que en funcionamiento normal deben estar en nivel alto, exponiéndose también de esta manera la desconexión del módulo en cuestión.

Para todas las otras desconexiones de módulos se tuvieron efectos sobre otros módulos del mismo tren o, en el caso de los Transmisores de Fibras Ópticas, de otros trenes.

Se revisó que cada efecto pudiese ser explicado por la Ingeniería de Detalle y se llegó a la conclusión que todos son correctos.

### 3.5.16 Otros hallazgos realizados durante el periodo de Verificación

El hecho de que el sistema esté disponible y funcionando para hacer pruebas permitió que se encuentren varios problemas de la integración del sistema que fueron surgiendo a lo largo de estos meses. Los mismos se describen a continuación.

### 3.5.16.1 Hotplug de módulos.

Por requerimiento, los módulos del sistema deben ser capaces de soportar que los mismos se inserten y se remuevan en funcionamiento.

Se observó que al conectar el Módulo Adaptador de Entradas/Salida en el Tren de Registro en su posición M03 (ver sección 2.6), el Módulo Registrador de Datos en la ubicación M07 del mismo tren fallaba.

Se realizó un estudio de este efecto y se encontró que la causa era la aparición de pulsos de 24V sobre las líneas de datos en el módulo que se está insertando. Esto se produce debido a que, con alta probabilidad, el pin de alimentación positiva L+ y/o PM hacen contacto antes que el pin de masa M, poniendo toda la placa a 24V.

A partir de este hallazgo se realizó la revisión del Módulo Registrador de Datos, con el agregado de protecciones adicionales sobre sus líneas de datos digitales.

Además se realizaron pruebas exhaustivas de conexión y desconexión de todos los módulos tanto en los trenes de medición como en los de registro y se encontró una instancia más de problemas por hotplug. La misma involucraba también al Módulos Adaptador de Entrada/Salida, pero esta vez en los trenes de medición, después de insertarlo en su posición M03 (ver sección 2.5) se observó que una salida de señalización digital del Módulo de Drivers presentaba un tensión indeterminada como nivel lógico, entre nivel bajo y alto. A partir de este hallazgo se determinó el agregado de una protección extra sobre los pines digitales de salida del Módulo de Drivers, leídos por el Módulo Adaptador de Entradas/Salidas.

Este problema determinó que para nuevos desarrollos se colocarán protecciones extras (componentes discretos) a las protecciones internas de los dispositivos digitales.

Además, se determinó que en lo sucesivo se utilizará para los módulos un conector Eurocard DIN41612/IEC60603-3 de 48 pines tipo F con los pines B2 y B32 más largos (leading contacts) en vez de los comunes que se venían utilizando con todos los pines iguales. De esta manera, se busca que los pines de masa a través de B2 y B32 tengan conexión eléctrica antes que el resto de los pines.

### 3.5.16.2 Fallas esporádicas en el Módulo Concentrador del Tren

Durante el primer mes de pruebas se observó que los leds de Falla 1 de los Módulos Concentrador del Tren se encendieron en diversas oportunidades. Este led de falla se enciende ante la detección de problemas de recepción de las tramas de estado provenientes de los 4 módulos con FPGA del mismo tren a través de la placa de interconexión.

Se pudo inducir la falla apagando y encendiendo las luces del laboratorio, el cual cuenta con 18 tubos fluorescentes.

Se decidió aumentar el tiempo por timeout de las tramas de estado en el Módulo Concentrador, de 5 tiempos de trama a 50, con esta modificación no se observaron fallas. Esta funcionalidad es de reporte y registro, y el cambio insertado no modifica en nada la confiabilidad del sistema en la línea de la acción protectora.

De todas formas, tomando esta experiencia se decidió que para futuros diseños se utilizará líneas balanceadas de comunicación de datos digitales tipo LVDS, que soportan mayores velocidades y tienen mejor inmunidad al ruido.

### 3.5.16.3 Comentarios generales sobre el funcionamiento del SIA

Durante el periodo de verificación (más de 8 meses), no se produjeron fallas de componentes electrónicos de ninguno de los módulos del sistema bajo ensayo.

## 3.6 *Discusión y futuros trabajos*

La verificación realizada fue del tipo *caja negra*, proceso por el cual se tiene acceso a las entradas y salidas del sistema. La finalidad de éste fue verificar el cumplimiento de las funciones respecto a las acciones protectivas del sistema. Se postula como trabajo futuro, la verificación de las tramas de estado y el Tren de Registro, las cuales no cumplen función para disparo del sistema. La información contenida en estas tramas son colectadas por la computadora de la central, para su monitoreo en línea pero no forma parte del sistema de protección.

Además, como un aporte a la puesta en marcha en la instalación final, se realizó un análisis de sensibilidad al ruido en la señales de entrada. A priori, si la naturaleza del ruido presente en estas señales es proveniente de una suma de factores independientes, el ruido resultante tendrá distribución normal por Teorema del Límite Central, el hecho de que los sensores redundantes cumplan con el criterio de segregación entre redundancias justifica la implementación de ruido no correlacionado entre canales. El ruido generado en el Módulo Emulador de Sensores, cumple con este criterio. Sin embargo, podrían llegar a plantearse casos de ruido con distribuciones distintas de la normal y correlacionados entre sensores, como por ejemplo ruidos impulsivos sobre varios canales de forma simultánea. Estos casos tienen similitudes con la emulación de señales del punto 3.5.10, donde se hace excursionar a la señal de entrada con una amplitud igual al margen de disparo *CPA* y pendientes mucho mayores a parámetro de disparo *A*, por esto, se cree que estos casos, también están cubiertos en la verificación. Estos resultados deberán tenerse en cuenta en el momento del ajuste de los parámetros de disparo, sobre todo el parámetro *CPA* que es función directa de la precisión de los sensores y el ruido presente en el canal de medición

Por otro lado, en la sección 3.5.15 se realizó la detección de fallas y efectos ante la desconexión completa del módulo, pero este proceso no prueba desconexión o falla de pines individuales de los módulos. Queda planteado como trabajo a futuro la fabricación de un extensor Eurocard que permita la interrupción de conexiones individuales para emular fallas de desconexión de pines y verificar su detección.

Por último, se plantea continuar con el desarrollo del software, para generar pruebas complejas que combinen distintos tipos de ensayos sin interacción del usuario y registren el comportamiento del sistema, en situaciones de estrés continuo con demanda de actuación y detectando disparos espurios o fallas si las hubiere. De esta manera el período de verificación podrá extenderse por mucho más tiempo, recolectando estadística de funcionamiento.

## 4. Conclusiones

Se realizó el montaje en fábrica del Sistema de Instrumentación Alternativo para la Inyección de Boro de CNAII y un conjunto equipos para verificar el mismo.

De estos equipos se destaca el desarrollo del Módulo Emulador de Sensores, por medio del cual se simuló las 6 señales 4-20mA para estimular al sistema con formas de onda de prueba. La implementación del mismo incluyó la generación de ruido pseudo-aleatorio con distribución normal y desviación estándar ajustable, el cual se suma a formas de onda configurables mediante tablas enviadas desde la PC.

Se desarrolló una interfaz de usuario que permitió interactuar con el sistema bajo prueba de manera de leer todas las salidas generadas por éste y a su vez generar las entradas que lo estimulan, haciendo posible tanto la generación de pruebas como la visualización del comportamiento del sistema en forma centralizada.

Se generó una batería de pruebas, que se ejecutaron con éxito. Algunas de ellas revelaron fallas menores en la implementación.

La plataforma de verificación lograda permite analizar el comportamiento del sistema en función de los parámetros de disparo, pudiendo por ejemplo, encontrar el contenido máximo de ruido que puede tolerar la señal del sensor sin que se produzcan disparos espurios.

El hecho de tener el sistema funcionando bajo condiciones equivalentes a las reales también permitió descubrir otro tipo de fallas, como por ejemplo problemas relativos al hotplug (inserción de módulos con el subrack y el resto de los módulos energizados).

Es de notar que todas las fallas encontradas fueron sobre funciones de prueba, detección de fallas, visualización y registro de datos; ninguna involucraba la línea directa de la acción protectora, que en ningún caso perdía disponibilidad al disparo y tampoco producían disparos espurios.

Durante los últimos 8 meses se contabilizaron al menos 6 meses de ensayos efectivos ejercitando al sistema, sin errores significativos de diseño ni fallas de componentes electrónicos de los módulos, por lo que se estima que no presentará problemas significativos al ser instalado en planta ni durante el proceso de validación final.

La experiencia obtenida en el proceso de verificación y la depuración de algunos problemas de implementación se utilizará en el desarrollo de los Sistemas de Protección de Reactor para los proyectos CAREM, RA10 y Loop del RA10.

Se confirma la ventaja de realizar la verificación de la integración de un sistema de esta envergadura para la depuración de problemas en fábrica previo a la instalación en planta, dado que la verificación individual de cada módulo resulta insuficiente para asegurar el funcionamiento de todo el sistema.

Así mismo, se ganó experiencia en la implementación del equipamiento de verificación, el cual será volcado a los futuros procesos de verificación SPR recién mencionados. Estos serán de un orden de magnitud más complejos debido a la cantidad de variables que manejan, por lo que las limitaciones encontradas durante el desarrollo de este trabajo, dará las bases para la arquitectura de los sistemas de verificación futuros.

Quedan como trabajos a futuro la continuación de software desarrollado y la extensión de cobertura de los ensayos para la detección de desconexión o fallas de pines individuales de los módulos.

## 5. Referencias bibliográficas

- [1] Kraftwerk Union AG. *Preliminary safety analysis report: CNA II*. Technical report, KWU, 1981.
- [2] Lazarte, A.I. *Estudio termohidráulico en el transitorio producido durante los primeros segundos de un accidente por pérdida de refrigerante en la Central Nuclear Atucha II*. Instituto Dan Beninson, 2008.
- [3] International Electrotechnical Commission. *Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - General requirements for systems*. IEC 61513 Ed.2, 2011.
- [4] IAEA Safety Standards Series. *Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants Safety Guide*. Safety Guide No. NS-G-1.3, 2002.
- [5] Estryk, D.S., Verrastro, C.A. *Lógica de Scram del RA1 – Mod. CNEA T910*. CNEA MU-14Y-002 Rev.0, 2004.
- [6] Ríos, G.E. *Impulsímetro Digital para Canal de Arranque de Reactores de Investigación*. Instituto Dan Beninson, 2012.
- [7] Ferrucci, F.N. *Equipo generador de pulsos aleatorios y determinísticos para emulación de un sistema de detección neutrónica y ajuste de cadenas de medición neutrónica*. Instituto Dan Beninson, 2012.
- [8] Bakhmach, I., Kharchenko, V., Siora, O., Tokarev, V., Andrashov, A. *Modernization of NPP I&C Systems using FPGA Technologies: Ukrainian experience*. 2nd International Workshop on The Applications of Field-programmable Gate Arrays in Nuclear Power Plants, 2009.
- [9] Alarcón, J.E., Estryk, D.S., Ferrucci, F.N., Ríos, G.E. *Requerimientos del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro de la CNAII*. CNEA IN-06Y-054 Rev.1, 2012.
- [10] Alarcón, J.E., Estryk, D.S., Ferrucci, F.N., Ríos, G.E. *Ingeniería de Detalle del Sistema de Instrumentación Alternativo para el Accionamiento de Inyección de Boro para la CNAII*. CNEA ET-06Y-043 Rev.1, 2013.
- [11] International Electrotechnical Commission. *Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - Development of HDL-programmed integrated circuits for systems performing category A functions*. IEC 62566 Ed.1, 2012.
- [12] Siemens. *Reactor Protection System TELEPERM C Modules for analog signal processing*. Catalog MP 16, Section 3, 1986.
- [13] Texas Instruments. *Low-Voltage Logic (LVC) Designer's Guide*. SCBA010, 1996.

- [14] SIEMENS. *Reactor Protection System. Analog Computing Circuit Pressure Drop 1 in the Reactor Coolant System. Fast Boron Injection Actuation*. Work Report No KWU E455/1992/2007, 1992.
- [15] Ferrucci, F.N. *Prueba de Principio de Sistema Digital de Límite Deslizantes*. CNEA IN-06Y-052, 2011.
- [16] Estryk, D.S. *Cableado de Fibra Óptica del Sistema de Instrumentación Alternativo para la Inyección de Boro de Atucha II*. CNEA IT-06Y-086 Rev. 0, 2012.
- [17] National Instruments. *NI 9425 Operating Instructions and Specifications 373782E-01*, 2008.
- [18] National Instruments. *NI 9476 Operating Instructions and Specifications 373964D-01*, 2008.
- [19] Wakerly, J.F. *Diseño digital: principios y prácticas (Tercera Edición)*. Prentice Hall, 2000.
- [20] Rangaa, R.K., Kumarb, B.N, Krishnac, R.N. *Generation of Standard Normal Random Variables*. Indian Journal of Scientific Research 2(4), 2011.
- [21] Ward, R.W., Molteno, T.S.A. *Table of Linear Feedback Shift Registers*. Electronics technical report, Electronics Group, University of Otago, 2012.
- [22] Alarcón, J.E. *Medición de tiempo de respuesta del sistema de inyección de boro alternativo para CNAII*. CNEA PPD-06Y-138 Rev.0, 2012.
- [23] Alarcón, J.E. *Registro de Inspección del ensayo "Medición de tiempo de respuesta del sistema de inyección de boro alternativo para CNAII"*. CNEA RI-06Y-517, 2012.

## 6. Anexos

Anexo 1. Vista del Tren de Medición Variante B.

