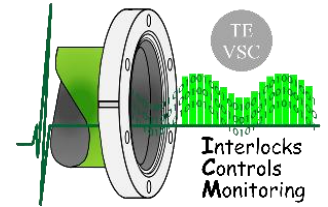




**TE** Technology Department

**TE-VSC-ICM**



# **Trabajo Final del Master en Ingeniería de Sistemas y Control**



**DESARROLLO DE UN NUEVO SISTEMA DE CONTROL BASADO EN PLCs PARA EL CONTROL DE LAS VÁLVULAS DEL SISTEMA DE VACÍO EN LOS ACELERADORES DEL CERN.**

Titulación: Master en Ingeniería de Sistemas y Control

Centro: Universidad Nacional de Educación a Distancia

Director y supervisor de proyecto (CERN): Gregory Pigny

Co-director de proyecto (UNED): Fernando Morilla García

Alumno: Miguel Ángel Quero Corrales

## Resumen

El objetivo de este trabajo es definir y justificar el diseño y desarrollo de un nuevo sistema de control para las válvulas utilizadas en el sistema de vacío de los aceleradores en el CERN. Actualmente los controladores y componentes utilizados en la cadena de enclavamiento de las válvulas de vacío son diferentes e independientes según el acelerador, ya que en cada uno se utiliza una lógica distinta. En alguno de los elementos de la cadena de enclavamientos incluso se usan componentes ya obsoletos. El objetivo principal es diseñar un nuevo sistema de control que permita unificar el hardware usado, independiente de la lógica o configuración del acelerador. Este nuevo sistema se ha ideado para ser lo más modular y flexible posible. Aunque la dinámica de cierre de las válvulas es relativamente lenta (varios segundos), se considerará muy ventajoso que este nuevo sistema, que procesará toda la lógica y controlará el cierre y apertura de las válvulas, sea al menos igual de rápido que el sistema actual. Para ello, también ha sido necesario caracterizar la respuesta temporal de todos los elementos utilizados en la cadena de enclavamientos, presentando los resultados en esta memoria. Para este nuevo sistema de control se diseñó y prototipó una primera versión no completa para comprobar el diseño electrónico y poder así desarrollar y testear el código de control. Una vez se corrigieron errores y se modificaron partes del diseño, se prototipó una segunda versión, esta vez del sistema completo, para el testeo final.

## Abstract

The objective of this report is to define and justify the design and development of a new control system for the valves used in the vacuum systems in the accelerators at CERN. Currently, the controllers and components used in the interlock chains for the control of the vacuum sector valves are different for each accelerator, since the valves in each accelerator are controlled by a different logic. The main objective is to design a new system that allows the unification of the hardware regardless of the accelerator's configuration or the logic in use. This new system has been designed to be as modular and as flexible as possible. Although the closing dynamic of the valve is relatively slow (a few seconds), it is considered as an advantage if the new system, that will process all the logic and will control the opening and closing of the valves, is at least as fast as the current system. Therefore, it has been also necessary to characterize the temporal response of all the elements that are currently being used in the interlock chain. The results are also presented in the report. For this system, a first, non-complete version was designed and prototyped to test the electronic design as well as to develop and debug the software code. Once mistakes were corrected and some modifications were made on the design, a second version of the full system was prototyped for the final testing.

## Agradecimientos:

Primeramente me gustaría mostrar mi agradecimiento a mi supervisor en el CERN, el Sr. Don Gregory Pigny, y al jefe de grupo de VSC-ICM, Don Paulo Gomes, por haberme considerado como un candidato competente para formar parte de la sección de Interlocks, Controls and Monitoring (ICM) en el grupo de Vacuum, Surfaces and Coatings (VSC) dentro del departamento de Tecnología del CERN. No solo por haber confiado en mis capacidades como estudiante de Ingeniería, sino también por todo el apoyo, la ayuda y explicaciones y los consejos a nivel académico que he recibido de su parte. Obviamente, participar con mi trabajo diario en el mayor centro de investigación de física de partículas del mundo es una oportunidad que no a todo el mundo se le presenta, y es por ello por lo que les estoy sinceramente agradecidos. Es un gran honor para mí haber sido partícipe y poderme haber integrado dentro de un grupo de trabajo tan multidisciplinar y que abarca tantos ámbitos y tanta responsabilidad durante estos 14 meses de estancia.

Una vez dicho esto, también dirigir mis agradecimientos a mi director de proyecto en la UNED, Don Fernando Morilla García, por haberme aceptado como alumno suyo para dirigirme en este proyecto de tan larga duración. Es para mí un honor haber tenido a un docente investigador tan experimentado como apoyo fundamental para el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster y por todo el tiempo que me ha dedicado. Por último, mostrar mi gratitud hacia él por todo el apoyo que he recibido por su parte desde incluso antes del comienzo del Máster y también durante la elaboración de este proyecto.

## Tabla de contenidos

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
1.1 INFORMACIÓN GENERAL.....	6
1.2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL DE VACÍO.....	9
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>11</b>
2.1 NOCIONES BÁSICAS DE LA TECNOLOGÍA DE VACÍO.....	11
2.1.1 Antecedentes generales.....	11
2.1.2 Sensores de vacío y principios de funcionamiento.....	12
2.1.3 Bombas de vacío y principio de funcionamiento de la bomba iónica (VPI).....	15
2.2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL POR PLC.....	17
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
<b>4. CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE ENCLAVAMIENTOS.....</b>	<b>19</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS.....	19
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL CONTROLADOR TPG 300.....	20
4.2.1 Caracterización del simulador basándose en la tarjeta de $10^{-11}$ mbar PE 300T11.....	20
4.2.2 Tests de la tarjeta Penning de $10^{-11}$ mbar.....	21
4.2.3 Tests de la tarjeta Penning de $10^{-9}$ mbar.....	23
4.2.4 Recopilación de resultados.....	23
4.3 CONTROLADORES DE LAS BOMBAS IÓNICAS.....	25
4.3.1 Controladores para VPIs del LHC y del CPS.....	26
4.3.2 Controladores del SPS.....	28
4.4 SISTEMAS DE ENCLAVAMIENTOS.....	30
4.4.1 Sistema de enclavamiento para el LHC.....	30
4.4.2 Sistema de enclavamiento para el SPS.....	33
4.4.3 Sistema de enclavamiento para el CPS.....	35
4.5 SISTEMAS SVCU.....	36
4.5.1 SVCU del LHC.....	37
4.5.2 SVCU del SPS.....	39
4.5.3 SVCU del CPS.....	41
4.6 CONCLUSIÓN DE LAS MEDICIONES.....	43
<b>5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE CONTROL BASADO EN PLC.....</b>	<b>45</b>
5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL.....	45
5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.....	45
5.3 ARQUITECTURA HARDWARE.....	46
5.3.1 Cadena de enclavamientos.....	46
5.3.2 Implementación completa.....	46
5.4 INTERFACES DEL SISTEMA, DEPENDENCIAS Y COMPORTAMIENTO.....	47
5.4.1 Interfaces por sector.....	47
5.4.2 Dependencias.....	48
5.4.3 Comportamiento de enclavamientos.....	48
5.4.4 Comportamiento de las VVGS.....	50
<b>6. DESARROLLO HARDWARE.....</b>	<b>51</b>
6.1 RACK DE PLC.....	51
6.2 INTERFAZ DE ENCLAVAMIENTOS.....	52
6.2.1 Rack de interfaz de enclavamientos.....	52
6.2.2 Backplane del rack de interfaz de enclavamientos.....	53
6.2.3 Tarjetas PCB del rack de interfaz de enclavamientos.....	53
6.3 INTERFAZ DE LAS VVGS.....	53
6.3.1 Rack de interfaz de vvg. ....	53
6.3.2 Backplane del rack de interfaz de VVGS.....	54
6.3.3 Tarjetas PCB del rack de interfaz de vvg. ....	54
6.4 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA Y DE SEGURIDAD.....	54
<b>7. DESARROLLO SOFTWARE.....</b>	<b>57</b>
7.1 TESTS.....	58

<b>8. CONCLUSIONES Y MEJORAS.</b>	<b>59</b>
8.1 SEGUNDA VERSIÓN. DISEÑO COMÚN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	59
8.2 NUEVA VERSIÓN DEL PROTOTIPO.....	59
8.3 OBSERVACIONES GENERALES SOBRE EL COSTE. ....	59
<b>9. TRABAJO FUTURO.</b>	<b>61</b>
9.1 CAMBIO A UN DISEÑO COMÚN DEL SISTEMA DE CONTROL. ....	61
9.2 TARJETAS DE CONTINUIDAD Y SEPARACIÓN.....	61
9.3 IMPLEMENTACIÓN DE PROFINET.....	62
9.4 HMI PARA CONTROL LOCAL. ....	62
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>63</b>
<b>11. ANEXO.</b>	<b>64</b>
11.1 CÁLCULOS.....	64

## **PALABRAS CLAVE Y LISTA DE ACRONIMOS**

BA - Bâtiment auxiliaire (Estructura o sector colindante)

BIC – Beam Interlock Controller (Controlador de enclavamientos del Haz)

DI – Digital Input (Entrada Digital)

DO – Digital Output (Salida Digital)

DP – Delta Pressure (Delta o Incremento de Presión)

GI – Global Interlock (Enclavamiento Global)

LI – Local Interlock (Enclavamiento Local)

PLC – Programmable Logic Controller (Controlador de Lógica Programable)

PS – Power Supply (Fuente de Alimentación)

SMU – Source Meter Unit (Unidad de Medida de Fuente)

SVCU – Sector Valve Control Unit (Unidad de Control de la Válvula Sectorial)

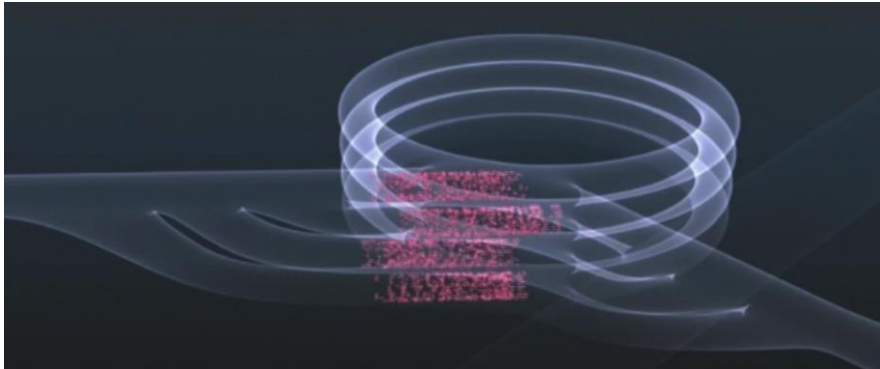
VPG – Penning or Cold-Cathode Ionization gauge. (Sensor de ionización cátodo frío o Penning)

VPI – Vacuum Ion Pump (Bomba Iónica de vacío)

VVGS – Vacuum Sector Gate Valve (Válvula sectorial)

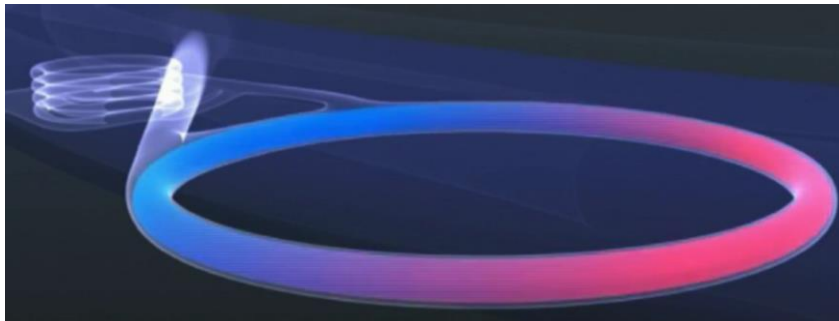


En la Figura 1 se muestra un diagrama con la disposición general de los distintos aceleradores y detectores de las zonas experimentales, incluyendo otros aceleradores y experimentos a energías menores a las que se van a describir a continuación. La cadena de aceleración de partículas suele comenzar en los LINACs (LINear ACcelerators) que se encargan de acelerar linealmente las partículas (por ejemplo, los protones obtenidos al sustraer electrones de los átomos de hidrógeno utilizados) hasta energías en el entorno de los 50 MeV. Las partículas provenientes del LINAC 2 pasan al Booster (Figura 2), un acelerador circular de cuatro anillos cuya finalidad es la de lograr maximizar la intensidad del haz mediante la separación de este en cuatro haces distintos (uno por cada anillo).



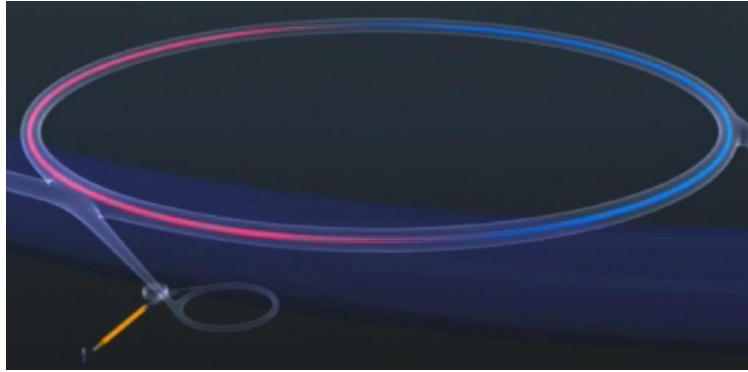
**Figura 2. Proton Synchrotron Booster (PSB). Primer acelerador circular en la cadena de aceleradores que conforman las instalaciones del CERN. 'The Bottle to Bang' produced by: Chris Mann ©2008-2016 CERN**

En este acelerador se consigue que las partículas pasen de ir a un tercio a un 91.6% de la velocidad de la luz, momento en el que estos haces se vuelven a aunar para pasar al siguiente acelerador circular, el Proton Synchrotron (Figura 3) con una energía de 1.4 GeV. En este acelerador circulan durante 1,2s, alcanzando un 99.9% de la velocidad de la luz y llegando al "punto de transición".



**Figura 3. Proton Synchrotron (PS). Segundo de los aceleradores circulares en la cadena de aceleradores que conforman las instalaciones del CERN. 'The Bottle to Bang' produced by: Chris Mann ©2008-2016 CERN**

En este punto, la energía otorgada a las partículas por el campo eléctrico pulsante no puede traducirse ya en un aumento de la velocidad de dichas partículas, al estar muy cercana a la de la luz. Por lo tanto, el aumento se produce en la masa de los protones, alcanzando una masa 25 veces más pesada a la nominal de los protones. En total, la energía de cada protón es de 25 GeV y es en ese momento cuando se transfieren al Super Proton Synchrotron (Figura 4).



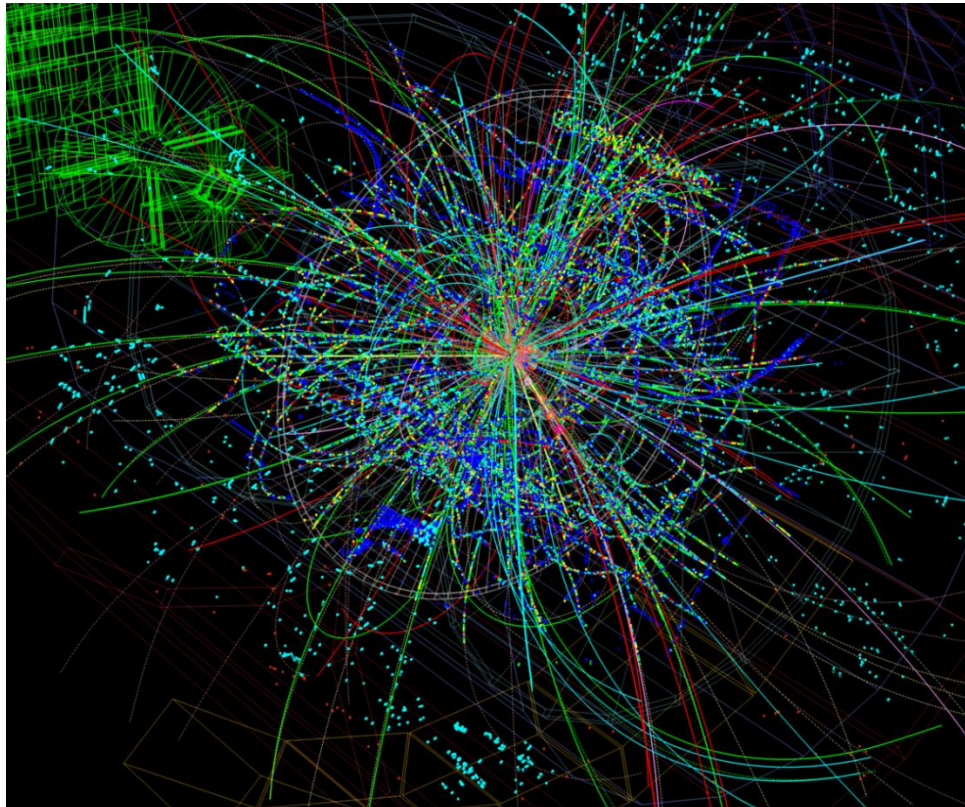
**Figura 4. Super Proton Synchrotron (SPS). Tercer acelerador circular en la cadena de aceleradores que conforman las instalaciones del CERN. 'The Bottle to Bang' produced by: Chris Mann ©2008-2016 CERN**

Este es otro acelerador circular de 7km de recorrido y que se encarga de aumentar la energía a unos 450 GeV, siendo lanzados posteriormente al LHC (Large Hadron Collider). El LHC es el acelerador de partículas más grande y energético del mundo, con una longitud de 27 km de circunferencia e instalado a una profundidad comprendida entre 50 y 175 metros subterráneos.



**Figura 5. Large Hadron Collider (LHC). Cuarto y más conocido acelerador circular en la cadena de aceleradores que conforman las instalaciones del CERN. 'The Bottle to Bang' produced by: Chris Mann ©2008-2016 CERN**

El LHC está constituido básicamente por dos tuberías en condiciones de ultravacío (en el rango de los  $10^{-11}$  mbar de presión) en las que los haces viajan en direcciones opuestas. El LHC sigue proporcionando energía a los protones, haciendo que esos vayan a una velocidad tan cercana a la de la luz que son capaces de dar más de 11.000 vueltas a lo largo de los 27 km del LHC por segundo, condensando los paquetes de unos 100.000 millones de protones en unas 64 micras (grosor de un cabello humano), consiguiendo cerca de 20 colisiones por cruce, haciendo un total de 600 millones de colisiones por segundo permitiendo conseguir una energía record de 13 TeV en mayo de 2015. Estos haces son guiados a lo largo del anillo del acelerador por un potente campo magnético, generado por electroimanes superconductores, por los que se le hace pasar una corriente de unos 12000 A. Para generar y mantener su estado de superconductividad, los imanes deben ser enfriados a  $-271.3^{\circ}\text{C}$  (1.9 K), una temperatura más fría que la del espacio. Para ello, una gran parte del acelerador está conectada a un sistema de distribución de helio líquido que enfría los imanes, así como otros sistemas anexos. Para dirigir los haces a lo largo del acelerador se utilizan millares de imanes de tipos y de dimensiones diferentes. Entre ellos los imanes principales, entre los que se encuentran 1234 imanes bipolares de 15 metros de longitud utilizados para curvar la trayectoria de los haces, y 392 imanes cuadripolares de 5 a 7 metros de longitud que concentran los haces. Justo antes de la colisión, se utiliza otro tipo de imán para unir las partículas unas a otras lo más posible, con el fin de aumentar las probabilidades de colisión. Esas partículas son tan minúsculas que hacerlas entrar en colisión equivale a lanzar dos agujas, una contra otra, desde una distancia de 10 km. Estos haces se hacen coincidir en las 4 cavernas en las que están instalados los detectores, que permiten seguir las trazas de las partículas resultado de la colisión de los paquetes de partículas, para el posterior análisis de los datos obtenidos (Figura 6). Estos detectores conforman los 4 experimentos principales del CERN: ALICE, ATLAS, CMS y LHCb.



**Figura 6. Resultados de la colisión iónica de protones de plomo medidos por el detector ALICE en el LHC 13.9.2012. Photograph: Thaefer, Jochen; Kolleger, Thorsten; Alt, Torsten © 2012 CERN**

En la Figura 6 se muestra que en LHC también se realizan pruebas de colisión de iones pesados de plomo. Estos iones provenientes de plomo vaporizado son acelerados en el LINAC 3 antes de entrar a otro acelerador circular llamado "Low Energy Ion Ring" o LEIR.

En el conjunto de instalaciones del CERN están presentes cientos de sistemas de control distintos, que permiten monitorizar todo lo que ocurre en los distintos aceleradores y detectores. Algunos ejemplos de sistemas que han de ser controlados son el estado de criogenia, el nivel de presión o vacío dentro de los tubos por las que circularán los haces de partículas, la intensidad de la radiación generada, la energía de los paquetes de partículas, etcétera.

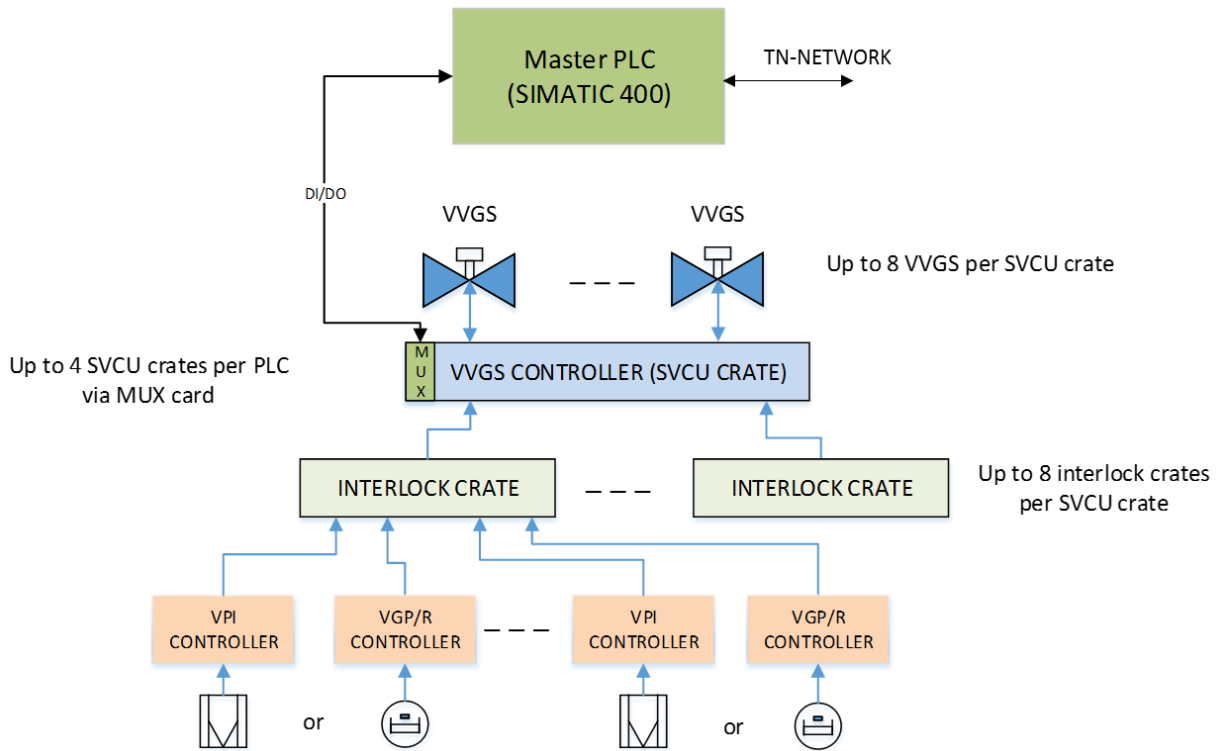
## 1.2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL DE VACÍO.

Como ya se ha comentado en el subapartado anterior, las tuberías por las que circulan los haces de iones han de estar en condiciones de vacío extremo llegando a los  $10^{-11}$  mbar o incluso valores menores en los últimos años. El propósito de la tecnología de vacío es conseguir reducir el número de interacciones haz-gas que se producen durante la realización de los "Runs" (proceso de aceleración de las partículas hasta que se producen las colisiones y se finalizan las pruebas) maximizando el tiempo de vida del haz, reducir las pérdidas de energía producidas por las colisiones de dichas interacciones haz-gas, así como reducir las inestabilidades de presión o las producidas por el "electron cloud". Esto se consigue gracias a una mezcla de equipos que eliminan las moléculas que hay en el gas por el que circula el haz (bombas de vacío), instrumentos para realizar mediciones de presión (sensores de presión), sistemas que permiten el aislamiento de los aceleradores en sectores (válvulas sectoriales de vacío), dispositivos responsables de la monitorización y regulación (controladores, lógicas de enclavamiento y alarmas), junto con bases de datos y software de procesado.

El objetivo de los sistemas de control de vacío es permitir la actuación sobre las válvulas sectoriales, previniendo cualquier anomalía o comportamientos peligrosos. Para ello, existen una multitud de válvulas sectoriales cuya función principal es la de proporcionar el aislamiento necesario entre los distintos sectores en que se encuentran divididos los sistemas de vacío, previniendo la propagación de cualquier fuga o permitiendo el aislamiento para una intervención

mecánica en ese sector. Debido a las particularidades de cada uno de los experimentos, varios sistemas de control de vacío están presentes a lo largo de todas las instalaciones del CERN. Por lo tanto, es necesario tener distintas infraestructuras que controlen dichos sistemas. Dependiendo del tipo de acelerador y de los sensores, el sistema de enclavamiento y la lógica de los controladores de las VVGS será distinto. [5]

La Figura 7 muestra un esquema de conexionado entre los distintos equipamientos utilizados. Los sensores y bombas van conectados a los controladores que realizan la lógica oportuna y que controlan la apertura o cierre de las válvulas de sector.



**Figura 7. Diagrama de conexionado de los distintos equipos usados en la generación, monitorización y regulación de vacío en los aceleradores del CERN. [1]**

## 2. ANTECEDENTES.

En este apartado se realiza una breve introducción de los antecedentes en lo concerniente a las tecnologías desarrolladas involucradas en el proceso de generación y control de vacío y también con respecto a los controladores de lógica programable (PLCs).

### 2.1 NOCIONES BÁSICAS DE LA TECNOLOGÍA DE VACÍO.

La cadena de enclavamientos que permite controlar el sistema de vacío de los aceleradores comienza por una serie de sensores de presión Pirani (TPR) y de cátodo frío o Penning (IKR), que permiten recabar información sobre la presión del sector de la máquina en la que están situados. Estos sensores, desarrollados por PFEIFFER VACUUM, van conectados a unos controladores TPG 300, también elaborados por BALZERS/ PFEIFFER VACUUM. Estos controladores permiten configurar un ciclo de histéresis que define los rangos aceptables y de alarma de la presión que se está midiendo. A su vez también existen una serie de bombas que funcionan como sensores llamadas bombas de iones. La corriente que estas bombas consumen es directamente proporcional a la presión que están generando y por lo tanto permiten saber dicha presión a la perfección. Son por lo tanto las fuentes que alimentan estas bombas las que actúan como controladores, permitiendo también establecer un umbral de presión a partir del cual es necesario cerrar las válvulas para mantener el estado de ultravacío. Todos estos controladores están conectados a su vez a otros racks de controladores que, dependiendo del acelerador, implementan una lógica de enclavamiento diferente. La mayoría de las conexiones realizadas entre todos los controladores consisten en un par de salidas provenientes de un relé de contacto seco. Esto significa que, de la salida de un controlador a la entrada del siguiente, el relé que determina el estado de alarma o de normalidad del sistema no proporciona ningún tipo de caída de potencial. En estos casos es el siguiente controlador en la cadena de enclavamiento el que proporciona en su entrada el voltaje que irá directo al relé de contacto seco del controlador anterior. Los racks de enclavamientos y las diferentes tarjetas que lo componen son todos circuitos diseñados en el CERN y fabricados específicamente para este centro de investigación, por lo que no se encuentran disponibles en ningún otro entorno externo.

#### 2.1.1 Antecedentes generales.

Aunque la unidad del Sistema Internacional que sirve para cuantificar la presión de un Sistema es el Pascal [Pa], la unidad base que se utiliza en temas de vacío es el bar, y más concretamente un submúltiplo asociado, el milibar [mbar]. En la tabla siguiente se recogen las equivalencias entre estas unidades de presión mencionadas, así como el resto de unidades normalmente utilizadas.

**Tabla 1. Conversión en las unidades de medida de presión.**

	Pa	bar	mbar	atm	torr
<b>1 Pa</b>	1	$10^{-5}$	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$
<b>1 bar</b>	$10^5$	1	$10^3$	0.98	750
<b>1 mbar</b>	$10^2$	$10^{-3}$	1	$0.96 \cdot 10^{-3}$	0.75
<b>1 atm</b>	$1.01 \cdot 10^5$	1.013	1013	1	760
<b>1 torr</b>	133	$1.33 \cdot 10^{-3}$	1.33	$1.32 \cdot 10^{-3}$	1

En el subapartado previo se ha mencionado el estado de ultravacío, que no es más que uno de los rangos de presiones en los que se puede clasificar un sistema (mostrado en la Tabla 2).

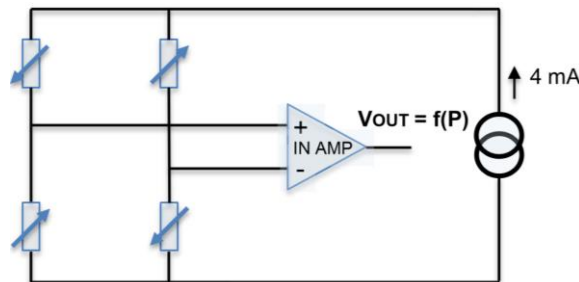
**Tabla 2. Clasificación de los rangos de vacío según la presión del sistema**

Grado de vacío	Rangos de presión [mbar]	Rangos de presión [Pa]
Vacío bajo (Low Vacuum) LV	$10^3 - 1$	$10^5 - 10^2$
Vacío medio (Medium Vacuum) MV	$1 - 10^{-3}$	$10^2 - 10^{-1}$
Alto vacío (High Vacuum) HV	$10^{-3} - 10^{-9}$	$10^{-1} - 10^{-7}$
Ultra-alto vacío (Ultra High Vacuum) UHV	$10^{-9} - 10^{-12}$	$10^{-7} - 10^{-10}$
Vacío Extremo (Extreme Vacuum) XHV	$<10^{-12}$	$<10^{-10}$

**2.1.2 Sensores de vacío y principios de funcionamiento.**

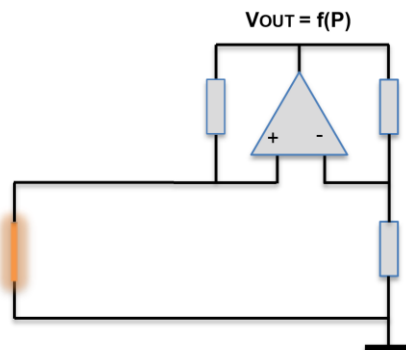
En cuanto a la tecnología de sensores empleada, existen multitud de tipos y variedades distintas, cada uno con unas características y limitaciones propias. En general se ha de tener la posibilidad de cubrir un rango amplio de presión de unas 15 décadas, por lo que es necesario recurrir al uso de múltiples sensores que suplan unos a otros y que incluso se solapen en la medición de presión.

El sensor de membrana cubre el rango de los 0 a los 2 bar y está compuesto por una fina capa de cristal de silicio que se usa como membrana. Su deformación induce un efecto piezorresistivo en unas resistencias que están formando un puente de Wheatstone (Figura 8). Como se puede deducir, el valor de la resistividad es dependiente de la presión. La señal de salida del amplificador operacional se encuentra en el rango de los milivoltios.



**Figura 8. Sensor de vacío de membrana. [2]**

El sensor Pirani (Figura 9) cubre desde los  $10^4$  a los  $10^{-4}$  mbar. La medición de la presión en este dispositivo se basa en la dependencia de la conductividad térmica del gas que se mide con respecto a su presión. Por lo tanto, para medir la presión se calienta un filamento y se mantiene a una temperatura constante. La corriente necesaria para mantener esta temperatura dependerá por lo tanto de la conductividad del gas y por lo tanto se podrá establecer una dependencia entre dicha corriente y la presión. La señal proporcionada por el amplificador operacional se encuentra en el rango de los voltios. Por encima de una presión de 1 mbar se obtiene una respuesta de medición no lineal, siendo dependiente del tipo de gas en que se mide.



**Figura 9. Sensor de vacío Pirani. [2]**

El sensor de presión electrónico Penning (Figura 10) es el que más nos concierne en este estudio y se basa en el principio de ionización del gas o ambiente sobre el que mide. Es uno de los dos subtipos de sensores denominado como sensor de descarga de cátodo frío. Este sensor cubre unos rangos de presión aproximados entre  $10^{-5}$  y  $10^{-11}$  mbar. Está compuesto por una varilla cilíndrica y delgada que actúa de ánodo. Esta varilla se rodea de un cátodo. Un potencial de alto voltaje (HV) equivalente a unos 3.3 kV crea un campo eléctrico muy intenso entre los dos electrodos, lo que favorece la ionización de las moléculas de gas alrededor en el espacio de vacío a medir. Alrededor de los electrodos, un imán permanente produce un campo magnético que fuerza a los electrones libres a moverse en patrones helicoidales, incrementando la probabilidad de ionizar más moléculas. La corriente de ionización que se genera y que se obtiene a través de los electrodos es función de la presión del gas que se esté midiendo, ya que la presión es a su vez proporcional al número de partículas que haya en el gas. En las mediciones en rangos de valores pequeños se obtiene una corriente de pA, es por eso por lo que se suele usar un cable de alto voltaje (HV) triaxial o coaxial de alta calidad.

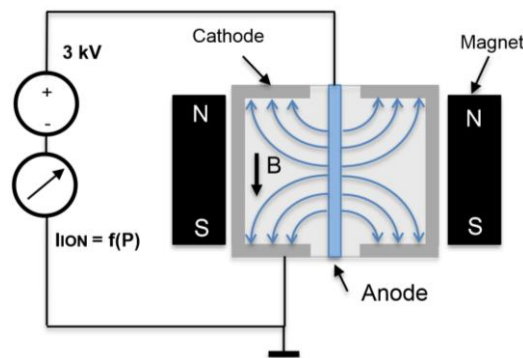


Figura 10. Sensor de vacío Penning. [2]

En el rango de los  $10^{-5}$  a  $10^{-9}$  mbar, la bomba de iones puede usarse, además de para su propia función de bombeo, como un sistema para medir la presión en el ambiente donde se está generando el vacío. Esta bomba se compone de varias células Penning con la particularidad de que los cátodos son de titanio y que se hace uso de un potencial de unos 5.6 a 7 kV (Figura 11). El principio de medición es igual que para el sensor Penning, e igualmente, para rangos bajos de presión se usa un cable HV de alta calidad ya que la corriente puede llegar a los 100 nA.

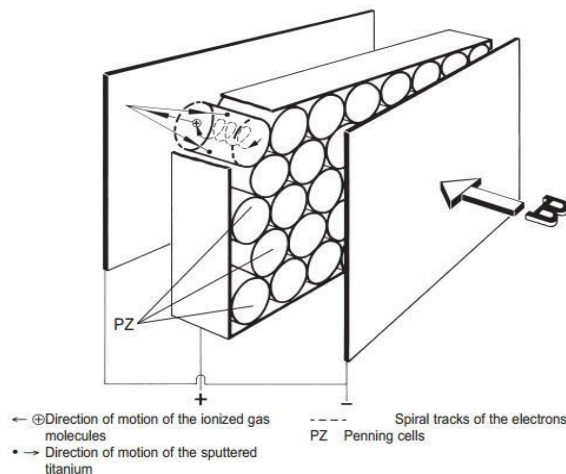


Figura 11. Diagrama de funcionamiento de una bomba iónica. [3]

Finalmente, para realizar mediciones en el rango de ultravacío ( $10^{-12}$  mbar), se usa el sensor Bayard- Alpert (Figura 12). Su principio de funcionamiento se vuelve a basar en un filamento calentado, que emite electrones que a su vez son acelerados por una rejilla que está a un potencial más elevado que el del filamento (+150 V). En su camino, estos electrones ionizan las moléculas de gas que son atraídas por el colector. La corriente que se produce en la varilla de colector es una medida de la ionización y por lo tanto del número de partículas ionizadas, que a su vez depende de la presión del gas (mayor presión mayor número de partículas). Esta última afirmación

se puede asociar con la ecuación de los gases ideales, ya que se trata de un sistema de gas en equilibrio:

$$P V = N_{moles} R T \tag{1}$$

donde P, V y T son la presión, el volumen y la temperatura del gas respectivamente, R es la constante de los gases ideales ( $8.314 \frac{J}{K mol}$ ).

La corriente de colector puede llegar a ser del nivel de una centena de femtoamperios (100 fA). En este sistema también se usa un cable triaxial de alta calidad para las mediciones. [2]

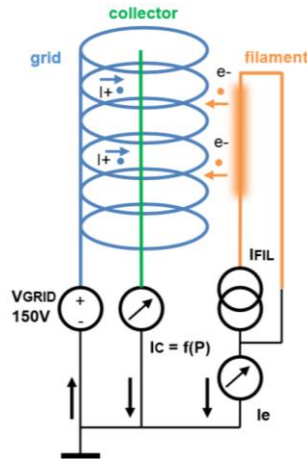


Figura 12. Sensor de vacío Bayard-Alpert.

En la Figura 13 se muestra un esquema resumen con las características y principios funcionales de los distintos sistemas comentados, junto con una escala de presión en la parte inferior que sirve para comparar los rangos de presión que los distintos elementos son capaces de medir (representado ese rango como el recuadro azul que delimita cada uno de los sensores).

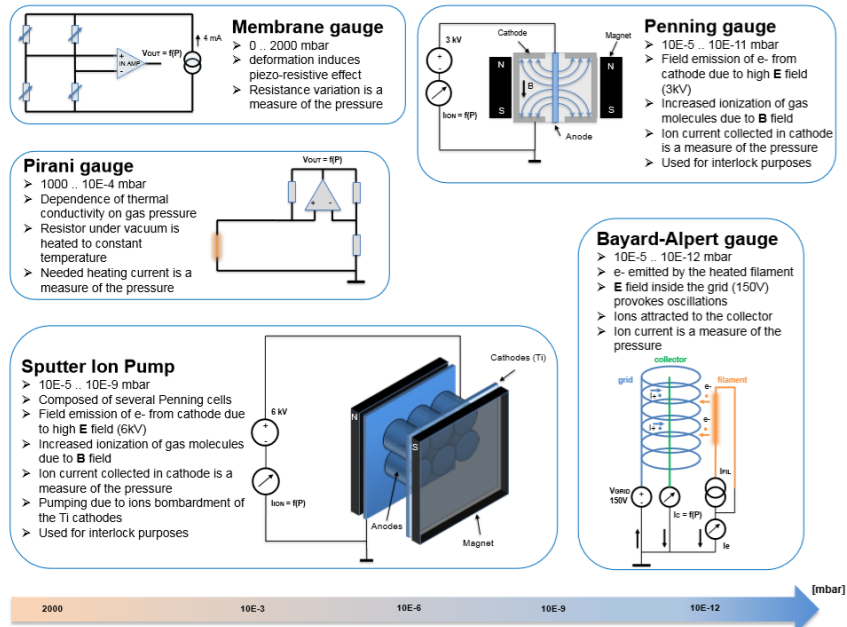


Figura 13. Esquema resumen de las características y principios de funcionamiento de los sensores de vacío usados en el CERN. [2]

### 2.1.3 Bombas de vacío y principio de funcionamiento de la bomba iónica (VPI).

Las bombas de vacío se utilizan para reducir la presión de un gas en un sistema confinado. Al igual que los sensores de vacío, existen multitud de categorías dependiendo del modo de funcionamiento y los principios físicos en los que se basan. Otra característica que permite definir una clasificación es el rango de presión de trabajo que se puede llegar a alcanzar. La Figura 14 muestra una amplia clasificación de estos equipos.

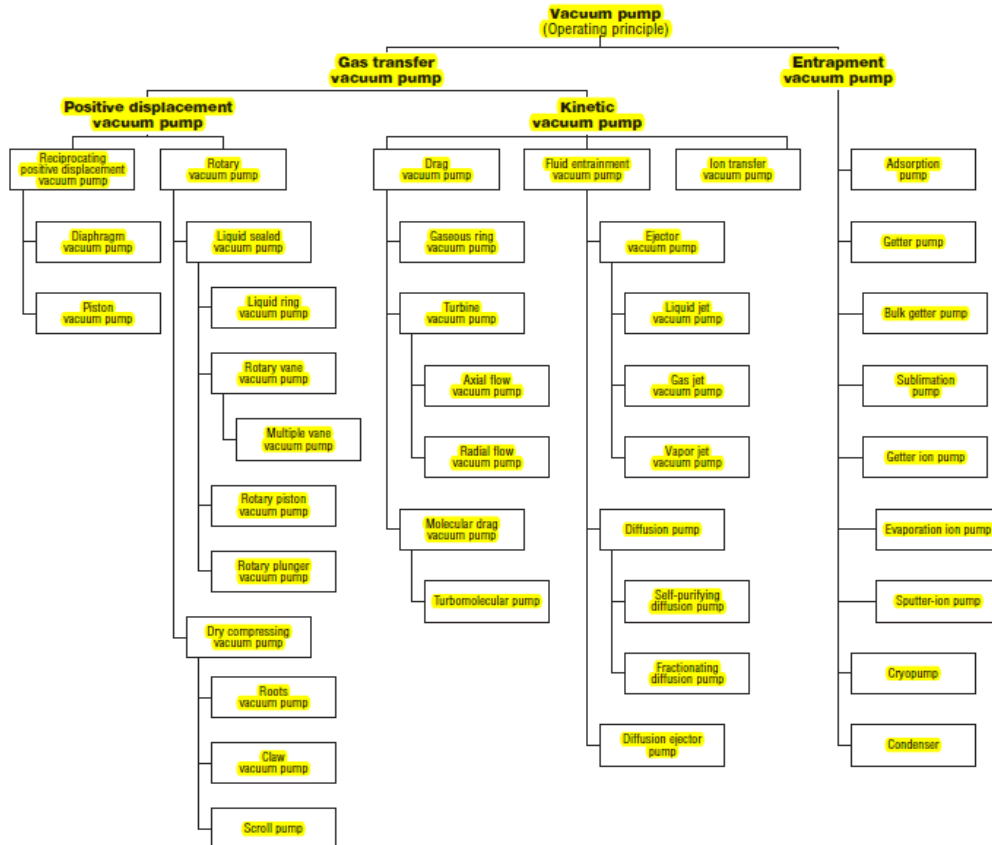


Figura 14. Diagrama de clasificación de diferentes bombas de vacío. [3]

Como ya se ha comentado en el subapartado anterior, la bomba de iones puede usarse, además de para su propia función de bombeo, como un sistema para medir la presión del sistema de vacío. Esta bomba se compone de varias células Penning que actúan como ánodo y que están colocadas justo entre dos placas paralelas de Titanio que actúan como cátodo con una diferencia de potencial entre estos de unos 5.6 a 7 kV (Figura 11). Se utilizan placas de Titanio debido a que es un elemento muy reactivo que forma compuestos estables con muchos gases distintos. Esta disposición se encuentra localizada a su vez dentro de un campo magnético homogéneo producido por imanes permanentes situados en el exterior de la carcasa de la bomba.

Así pues, los electrones son emitidos desde el cátodo debido al campo eléctrico generado por la diferencia de potencial entre los dos electrodos. Debido al campo magnético homogéneo externo, los electrones realizan una trayectoria helicoidal compuesta por un movimiento en espiral en el plano perpendicular al campo magnético mientras que a su vez se mueven en movimiento rectilíneo de forma paralela a los campos magnético y eléctrico. Este recorrido (mayor que el que haría únicamente debido al movimiento rectilíneo causado por el campo eléctrico), aumenta las posibilidades de colisión de estos electrones con las partículas que conforman el gas del sistema, produciendo la ionización de este gas. Por lo tanto, el resultado de esta colisión es la creación de un ion positivo que viaja hacia el cátodo debido al mismo campo eléctrico, sin verse visto afectado demasiado por el campo magnético debido a su mayor masa. Cuando llegan al cátodo, si estos iones chocan con la superficie con la energía y velocidad suficiente hacen que átomos de titanio salgan despedidos del cátodo que forman, depositándose en las paredes de los ánodos o del interior de la bomba.

Como se ha comentado, el Titanio es muy reactivo y permite absorber partículas de gas como hidrógeno nitrógeno u oxígeno. Sin embargo, la capacidad de reacción del Titanio con los gases nobles es prácticamente nula, por lo que es necesario el uso de otro tipo de técnicas. Aun así, para ser generador de vacío (mediante la eliminación de las partículas de gas del ambiente), no es necesario que estas partículas sean ionizadas. El hidrógeno por ejemplo se combina directamente con el Titanio en el cátodo por lo que se elimina rápidamente. Como el número de iones generados depende de la presión (como se comentó en la Ecuación 1), la intensidad de bombeo se autorregula, aumentando cuanto mayor sea la presión y disminuyendo conforme más vacío haya en el sistema. Esto hace que el bombeo sea muy eficiente, aumentando el tiempo de vida de las bombas de iones usadas en zonas de vacío de alta calidad. Sí es cierto que para realizar estas mediciones es necesario que el Sistema se encuentre en un estado de baja presión, ya que en caso contrario se podrían dar casos de sobrecargas de corriente, calentamiento de la bomba, fugas de gases, etc. [4]

Existen dos tipos básicos de bombas iónicas, las de tipo diodo y las de tipo triodo.

En la Figura 15, se muestra la configuración y esquema de funcionamiento básico de la bomba iónica de tipo diodo, en la que los cátodos están sujetos al cuerpo de la bomba y además el potencial que se aplica al ánodo es positivo.

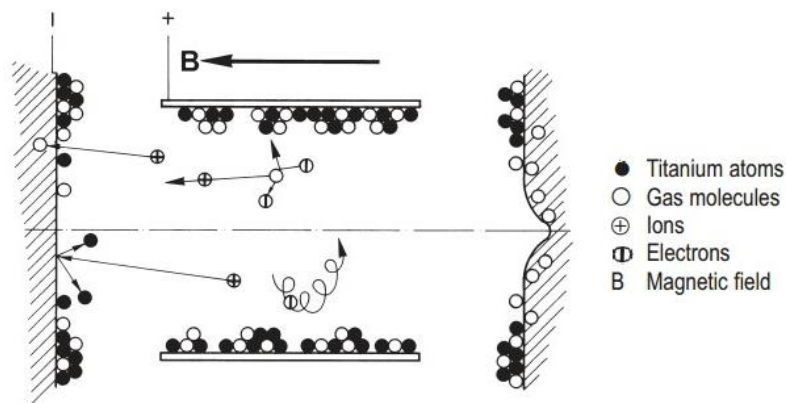


Figura 15. Configuración de la bomba iónica de tipo diodo. [3]

En la Figura 16 se muestra la configuración de la bomba iónica de tipo triodo, en la que se pueden observar dos cambios fundamentales. En este tipo, los cátodos están separados de la estructura de la bomba, siendo constituidos por una red de tiras de aluminio. Además, la tensión aplicada a las tiras de cátodos es negativa, mientras que los ánodos se mantienen conectados a tierra.

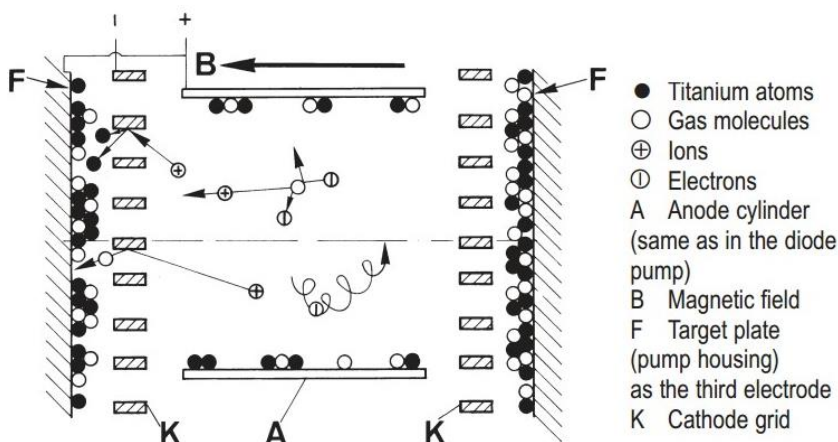


Figura 16. Configuración de la bomba iónica de tipo triodo. [3]

## 2.2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL POR PLC.

Los controladores lógicos programables o PLCs (Programmable Logic Controllers) son uno de los sistemas de control más extendidos y utilizados en el ámbito de la automatización industrial, para permitir la automatización de procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria en líneas de montaje. Según la NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos), un PLC es: "Instrumento electrónico, que utiliza memoria programable para guardar instrucciones sobre la implementación de determinadas funciones, como operaciones lógicas, secuencias de acciones, especificaciones temporales, contadores y cálculos para el control mediante módulos de E/S analógicos o digitales sobre diferentes tipos de máquinas y de procesos".

El uso de los PLCs se da fundamentalmente en aquellas situaciones donde es necesario el control de uno o varios procesos simultáneamente, y suelen usarse en muchos tipos de industrias (ej. automoción, aeroespacial, construcción, etc.). Su aplicación abarca por lo tanto desde procesos de fabricación industriales de cualquier tipo a control de instalaciones. Como son sistemas ya muy conocidos en la industria, no se entrará tanto en detalle como se ha hecho con las distintas tecnologías de vacío.

Entre las ventajas del uso de PLC se puede resaltar sus reducidas dimensiones, la facilidad de su montaje, la posible modificación de la arquitectura o alteración de los módulos de control que utiliza y la facilidad de modificación de su comportamiento (al ser un control software), por lo que su uso es fundamental en situaciones de espacio reducido, en procesos de producción variables y o secuenciales y en instalaciones de procesos complejos.

Gracias a estos equipos es posible realizar operaciones en tiempo real, debido a su disminuido tiempo de reacción. Además, son dispositivos que se adaptan fácilmente a nuevas tareas debido a la fácil modificación de su arquitectura (número de módulos, o reparación o sustitución de estos) y su flexibilidad a la hora de programarlos, reduciendo así los costos adicionales a la hora de elaborar proyectos. Permiten también una comunicación inmediata con otros controladores y ordenadores e incluso permiten ser conectados en red. Eso posibilita un mejor monitorio del funcionamiento del sistema, así como mayor facilidad para detectar averías rápidamente y reducir el tiempo de mantenimiento.

En general, suelen tener una construcción robusta al estar diseñados para poder resistir condiciones adversas sobre vibraciones, temperatura, humedad y ruidos. Son fácilmente programables por medio de lenguajes de programación bastante comprensibles. [4]

Como principales desventajas se puede destacar que su implementación y uso requiere de mano de obra especializada que es necesario formar. Con respecto a su implementación, requiere un mayor coste con respecto a otras soluciones en caso de control de pequeños sistemas. Otro problema es que esta solución centraliza todo el proceso de control en un único sistema, por lo que se ha de recurrir a sistemas redundantes o a seguridad adicional si se trata de procesos críticos.

### 3. OBJETIVOS.

Como ya se ha comentado en los dos apartados anteriores, los sistemas de control de las válvulas de vacío utilizados en el CERN son distintos para cada uno de los aceleradores. Por lo tanto, el objetivo final de este proyecto es desarrollar el prototipo de un nuevo sistema de control que permita tener un diseño común del sistema de enclavamiento para todos los aceleradores.

Al ser un sistema novel y sin antecedentes previos, este prototipo del nuevo sistema se ha tenido que desarrollar en todos los ámbitos, tanto hardware como software. Para ello se ha debido de tener en cuenta consideraciones de diseño tanto del sistema presente en uso, como de posibles implementaciones, desarrollos o mejoras futuras en otros ámbitos o elementos de los sistemas de enclavamientos (cambio de lógica, cambio de controladores, etc.).

Obviamente, en el diseño de un nuevo sistema de control, y en especial de tal envergadura, es necesario la definición de una serie de requerimientos y subobjetivos adicionales. Tal y como se ha comentado, en el diseño de este sistema se deberán de tener en cuenta posibles futuras implementaciones o mejoras en el sistema de control. Por lo tanto, uno de los requerimientos clave de este nuevo sistema es que permita una cierta flexibilidad y modularidad tanto a nivel software como hardware. Además, este nuevo sistema no deberá introducir mayor latencia a la que introduce el sistema actual (que a su vez es desconocido, por lo que también deberá ser determinado).

Otro de los requerimientos que se deseaba implantar, era la sustitución del uso obsoleto de algunos de los componentes del sistema actual por una tecnología más novel, así como que el sistema en conjunto tuviera un grado de fiabilidad ya conocido (los circuitos del sistema actualmente utilizado están desarrollados directamente en el CERN, por lo que nunca se han llevado a cabo tests de fiabilidad sobre ninguno de los componentes). Es por ello que se decidió basar el nuevo sistema en PLCs, ya que ofrece la mayoría de las ventajas que se buscaban tener.

Para conseguir los objetivos, este proyecto se ha centrado en dos tareas principales:

- Llevar a cabo una caracterización, mediante equipos de medición de alta precisión, del retraso temporal que originan todos los elementos que conforman actualmente las cadenas de enclavamientos en los sistemas de control de las válvulas de vacío en los tres aceleradores circulares principales del CERN (CPS, SPS y LHC).
- Desarrollar un nuevo prototipo basado en sistemas PLCs que permita unificar todos los controladores y sistemas utilizados en los sistemas de enclavamientos para el control de las válvulas de sector en dichos aceleradores.

## 4. CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE ENCLAVAMIENTOS.

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS.

Este apartado se centrará en la descripción de los tests realizados para los diferentes elementos que son usados en la cadena de enclavamientos; desde los controladores de vacío donde se conectan los sensores y bombas de vacío, hasta los distintos chasis de control que realizan la lógica específica para cada acelerador y a los que se conectan las válvulas de sector para su apertura o cierre.

El controlador TPG 300, es un controlador comercial desarrollado por Balzers. Este controlador permite conectar hasta 3 tarjetas, dos de las cuales (PE 300T11 generalmente) tienen la misma funcionalidad de medición de vacío, proporcionando una conexión tanto para el sensor de vacío Piranni como para el Penning. Además, estas tarjetas ya proporcionan de por sí un sistema de enclavamiento interno que hace imposible comenzar las mediciones de información dadas por el sensor Penning mientras que el sensor Piranni esté leyendo una presión superior a  $10^{-3}$  mbar. Con respecto a la última tarjeta, esta proporciona tanto una conexión Profibus para que los PLCs puedan leer la información remotamente, y un conector de 25 pines para los relés de contacto seco dentro del controlador que se conectarán con los sistemas de enclavamiento.

El controlador TPG 300 ofrece la posibilidad de programar algunos parámetros según las necesidades del usuario. Entre las más relevantes, se puede destacar la posibilidad del usuario para determinar los umbrales máximos y mínimos de presión – similar a un ciclo de histéresis- a partir de los cuales el enclavamiento de la válvula debería activarse y desactivarse respectivamente. Esto asegura la prevención de cualquier estado inestable en los sectores. Otro parámetro muy significativo es la respuesta del filtro pasivo interno, permitiendo seleccionar tres configuraciones diferentes. La primera, llamada "Rápida" por el fabricante, proporciona un filtro con una constante de 16 ms. La configuración "Media" ajusta una constante de tiempo de 160 ms mientras que la "Lenta" configura una constante de tiempo de 1,6 s. [6]

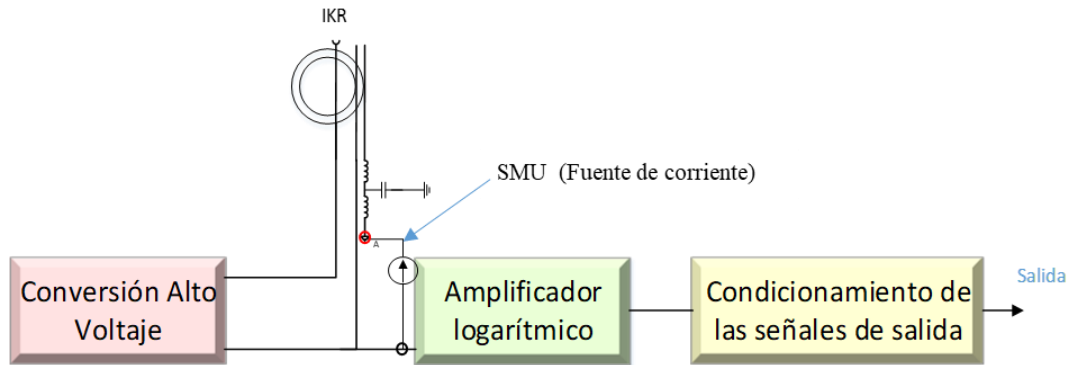
En lo referente a los controladores de las VPIs, hay tres sistemas diferentes implementados a lo largo de los experimentos. Para el LHC y el CPS se usa un controlador común, mientras que para el SPS se usan dos controladores distintos. Estos sistemas siempre muestran una correlación lineal entre el consumo de corriente de las bombas y el vacío que generan (medido mediante la presión) Lo único a tener en cuenta para la configuración de los controladores de las VPIS es el tamaño y la velocidad de bombeo de la bomba que va a controlar. Esta especificación permitirá establecer al usuario el umbral al que los enclavamientos deberían activarse. Por tanto, para cada bomba, un voltaje de referencia equivalente a dicha presión ha de ser ajustada con un potenciómetro externo.

Además de estos dos sistemas, los controladores y racks que constituyen el resto de la cadena de enclavamientos también serán caracterizados en cuanto al retraso que generan hasta que el comando de cierre llega al controlador de la válvula. Estos racks son diferentes para cada acelerador, y podemos distinguir dos tipos distintos:

- Los racks de enclavamientos, que son distintos en tamaño y funcionalidad para cada acelerador, conforman la etapa inicial en el sistema de control de las válvulas, y se encargan de realizar la lógica cableada o programada que también varía según el acelerador.
- Los racks SVCU, que son iguales en tamaño y funcionalidad general (aunque varían las señales que se procesan) y que sirven como interfaz de conexión con las válvulas de sector para su control.

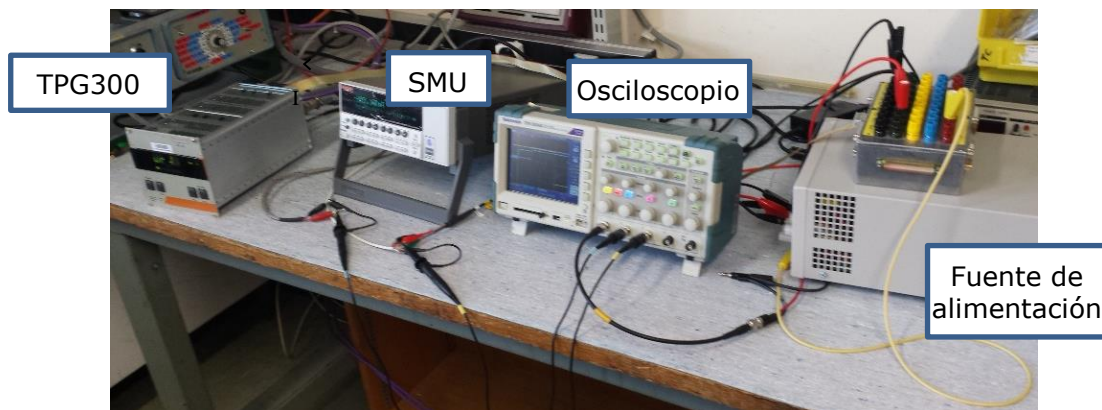
## 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL CONTROLADOR TPG 300.

Para la caracterización del retraso que el controlador TPG 300 y sus tarjetas generan en la cadena de mediciones y enclavamientos, se tuvo que diseñar un sistema que simulara la señal de entrada producida por la VPG. En este caso, la forma más simple fue generar una entrada de corriente aportada por una Unidad de Medida de Fuente o SMU. Esta SMU fue conectada entre la masa analógica y el terminal negativo del transformador, esto es, en paralelo con el condensador C53 justo al comienzo de la sección de amplificación logarítmica del circuito (Figura 17). Así, el retraso a medir en la señal incluiría el mayor número de etapas de procesado posibles.



**Figura 17. Esquemático de la sección del amplificador logarítmico en la tarjeta conectada al controlador TPG 300 y conexión del 6430 SMU 6430 sub-femtoamp remote SourceMeter de Keithley [6]**

Consecuentemente, el banco de pruebas propuesto puede verse en la Figura 18:



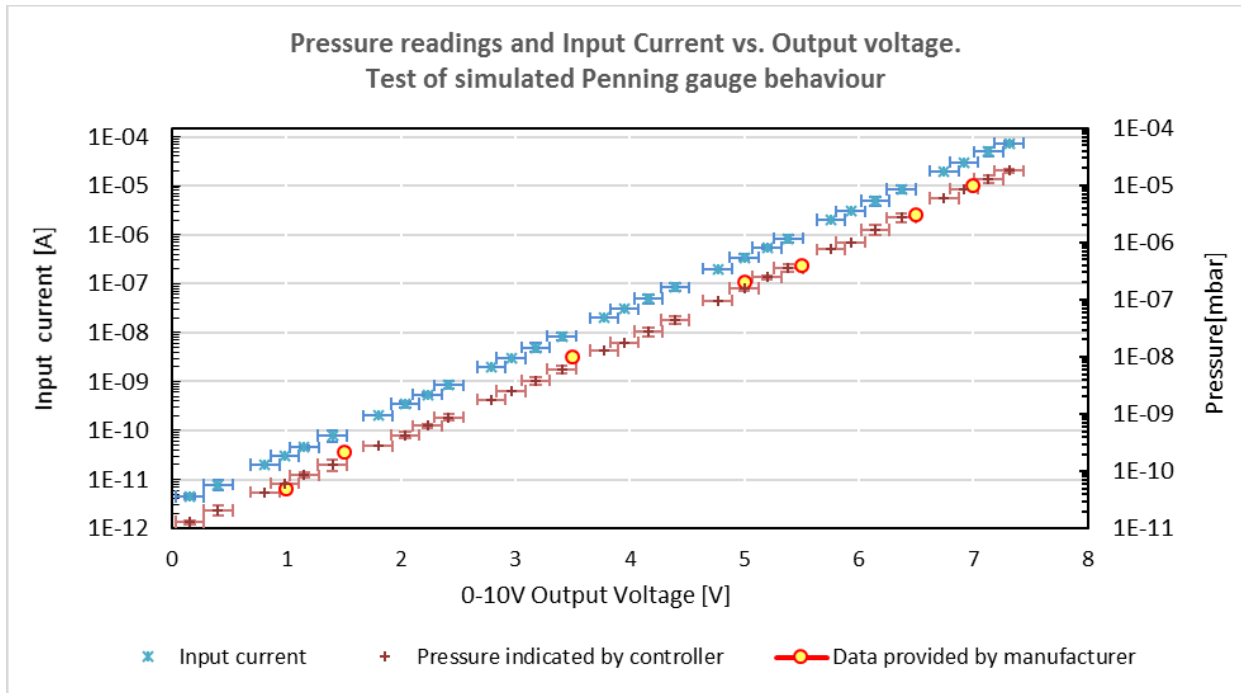
**Figura 18. Banco de pruebas para la medición del retraso que genera el controlador TPG 300.**

Para los siguientes tests, la operación de activación de los relés será efectuada mediante un incremento de voltaje en la SMU. Subsecuentemente, esto produce el incremento de corriente deseado en la tarjeta, haciendo que la presión medida supere el umbral establecido en el controlador.

### 4.2.1 Caracterización del simulador basándose en la tarjeta de $10^{-11}$ MBAR PE 300T11.

Para verificar si el sistema que va a ser testado es una simulación consistente del sensor Penning real, se tuvieron que realizar una serie de mediciones de caracterización. En este caso, se pudo establecer una correlación entre la corriente de entrada generada por el SMU, la tensión de salida proporcionada por la tarjeta PE 300T11 y la presión indicada por el controlador. Posteriormente, se compararon y verificaron todos los resultados con los datos dados por el fabricante del controlador.

La siguiente figura representa tanto la información proporcionada por el fabricante de las tarjetas, como los datos obtenidos en los tests con relación a la tensión de salida de la tarjeta para la conexión del sensor Penning, y la presión medida en el controlador con respecto a la corriente proporcionada por el SMU, con un total de 2050 mediciones realizadas.



**Figura 19. Medición de presión vs. tensión de salida en el controlador TPG 300.**

La Figura 19, presentada en una escala semilogarítmica, prueba que las medidas características establecidas se asemejan a los datos proporcionados por el fabricante [6]. Así pues, podemos confirmar la dependencia logarítmica entre la tensión de salida y la presión, así como una dependencia prácticamente lineal entre la corriente de entrada y la presión. Por lo tanto, de los datos obtenidos podemos extrapolar una regresión que nos permite aproximar el funcionamiento del controlador a la función:

$$P(U) = 10^{0,853 \cdot U - 11,072} \quad [\text{mbar}] \quad (2)$$

Donde  $P$  es la presión esperada del sistema en vacío indicada por el controlador TPG 300, y  $U$  es la tensión de salida en el rango de 0 a 10V proporcionada por la tarjeta PE 300T11.

#### 4.2.2 Tests de la tarjeta Penning de $10^{-11}$ MBAR.

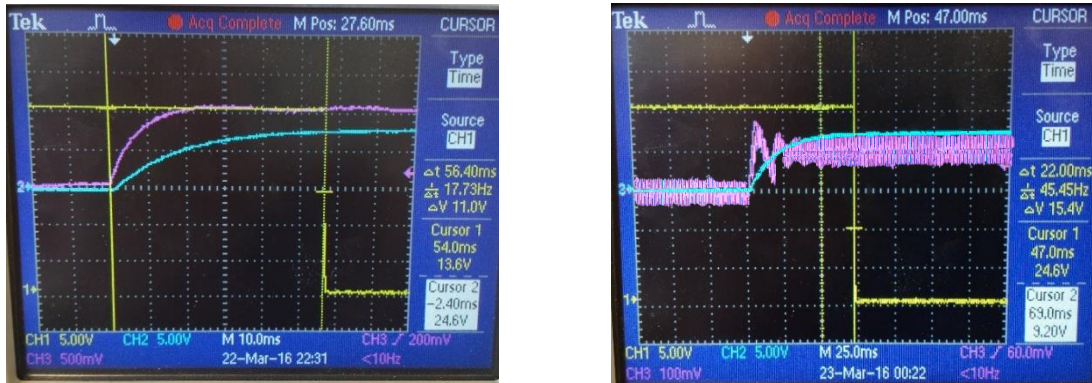
Tal y como se ha indicado en el apartado de objetivos, la finalidad es medir el retraso existente entre: un aumento de presión, simulado mediante un incremento en escalón de tensión, y la actuación a la salida de los relés que generan la primera señal en la cadena de enclavamientos. Para estas medidas, el SMU se utilizó como fuente de tensión, usando distintos escalones de tensión para simular un cambio brusco de presión.

Para adquirir el retraso medio, se realizaron un total de 10 mediciones para cada una de las configuraciones posibles, resultando en un total de 480 mediciones. Los parámetros modificados a lo largo de los tests:

- El escalón de tensión de entrada proveniente del SMU,
- La velocidad de respuesta del filtro del controlador TPG 300,
- El umbral de presión a los que los relés deberían conmutar. Este parámetro se cambió de década en década desde los  $10^{-7}$  mbar a los  $10^{-5}$  mbar para cubrir el mayor espectro posible.

Las mediciones diferenciales se tomaron con un osciloscopio con canales cuyas masas estaban independientemente aisladas unas de otras. El primer canal - en amarillo- representa el voltaje de salida en el relé (0 a 24 V), el Segundo canal -en cian- representa el voltaje de salida en la tarjeta (0 a 10 V) y, por último, el tercer canal -en magenta- muestra el voltaje de entrada proporcionado por la SMU.

En esta primera serie de mediciones se usó la tarjeta PE 300T11, proporcionando mediciones incluso en el rango de los  $10^{-11}$  mbar. Algunos ejemplos de estas mediciones pueden observarse en las Figura 20:



**Figura 20. Diferentes respuestas temporales para la tarjeta de  $10^{-11}$  mbar configurada con el filtro "Rápido" dependiendo del escalón de tensión. 0 a 1V en la izda., 0 a 100mV en la dcha.**

Para estos umbrales de presiones, los niveles de tensión de entrada que hacían conmutar al relé eran 2mV para el umbral de  $1 \cdot 10^{-7}$  mbar, haciendo conmutar el relé de un estado abierto a uno cerrado, y 10 mV para el umbral de  $4 \cdot 10^{-7}$  mbar, haciendo conmutar al relé de un estado cerrado a uno abierto.

En este banco de pruebas nos centramos en 4 mediciones diferentes de tiempo y retrasos, todas medidas en ms. La medición más significativa es el retraso desde el momento en que la señal de entrada comienza a cambiar hasta el momento en que el relé pasa a un estado abierto (medido esto último en el 50% de la caída de la señal de los 24 a los 0 V). Otros retrasos se midieron para comprender un poco mejor el comportamiento del sistema: el tiempo de subida de la tensión escalón de entrada, el tiempo de subida de la tensión de salida de 0 a 10V y el tiempo necesario para que el relé se abra (tiempo de bajada de la señal 0-24V). Las mismas mediciones se realizaron para cada una de las variaciones de configuración de filtro (rápida, media, lenta), amplitud del escalón de tensión (0 a 10V, 0 a 1V y 0 a 100 mV) para tres umbrales de presión ( $1 \cdot 10^{-7}$ -  $4 \cdot 10^{-7}$  mbar,  $1 \cdot 10^{-6}$ -  $4 \cdot 10^{-6}$  mbar y  $1 \cdot 10^{-5}$ -  $4 \cdot 10^{-5}$  mbar).

Aun así, como se ha dicho, la medición más importante es el retraso desde que se produce el cambio en la tensión de entrada hasta que el relé conmuta a un estado abierto (a partir de ahora se referirá a este retraso como "retraso total"). En este informe presentamos solamente los resultados obtenidos con los umbrales de  $1 \cdot 10^{-6}$ -  $4 \cdot 10^{-6}$  mbar, que son los normalmente establecidos en los controladores de los experimentos.

Para estos niveles, el valor de tensión que hacía conmutar al relé era de 27 mV para el nivel de  $1 \cdot 10^{-6}$  mbar, haciendo que el relé pasara de un estado abierto a cerrado, y de 115 mV para el nivel de  $4 \cdot 10^{-6}$  mbar, haciendo que el relé pasara de estar cerrado a abierto. Estos voltajes de conmutación no permitían realizar el test con el escalón de tensión de 0 a 100 mV, por lo que el escalón de tensión en el menor rango se realizó de 0 a 200 mV.

**Tabla 3. Retraso total [ms] entre el aumento de presión –simulado por un incremento en la tensión de entrada – y la apertura del relé. Umbral de  $1 \cdot 10^{-6}$  -  $4 \cdot 10^{-6}$  mbar.**

TPG300 (umbral $1 \cdot 10^{-6}$ - $4 \cdot 10^{-6}$ mbar)			
Tarjeta $10^{-11}$ mbar			
Escalón de tensión	Configuración de filtro		
	Rápida	Media	Lenta
0 a 200 mV	159	574	4398
0 a 1 V	72,1	363,6	2594
0 a 10 V	41,1	188,8	1359

Cuanto más lento sea el filtro, mayor será el tiempo que tardará el relé en conmutar para enviar la señal de enclavamiento. Además, cuanto mayor sea la amplitud de la señal escalón de tensión, y consecuentemente el escalón de corriente, más rápido responderá el sistema.

### 4.2.3 Tests de la tarjeta Penning de 10<sup>-9</sup> MBAR.

Posteriormente, los mismos tests se llevaron a cabo para la tarjeta PE 300DC9 de 10<sup>-9</sup> mbar. De nuevo, para obtener el retraso medio se realizaron una serie de 10 mediciones para configuración, resultando en un total de otras 480 mediciones. En la Tabla 4 se muestran los retrasos totales obtenidos al testear el sistema variando los diferentes parámetros ya explicados, para el umbral fijo de 1·10<sup>-6</sup>- 4·10<sup>-6</sup> mbar.

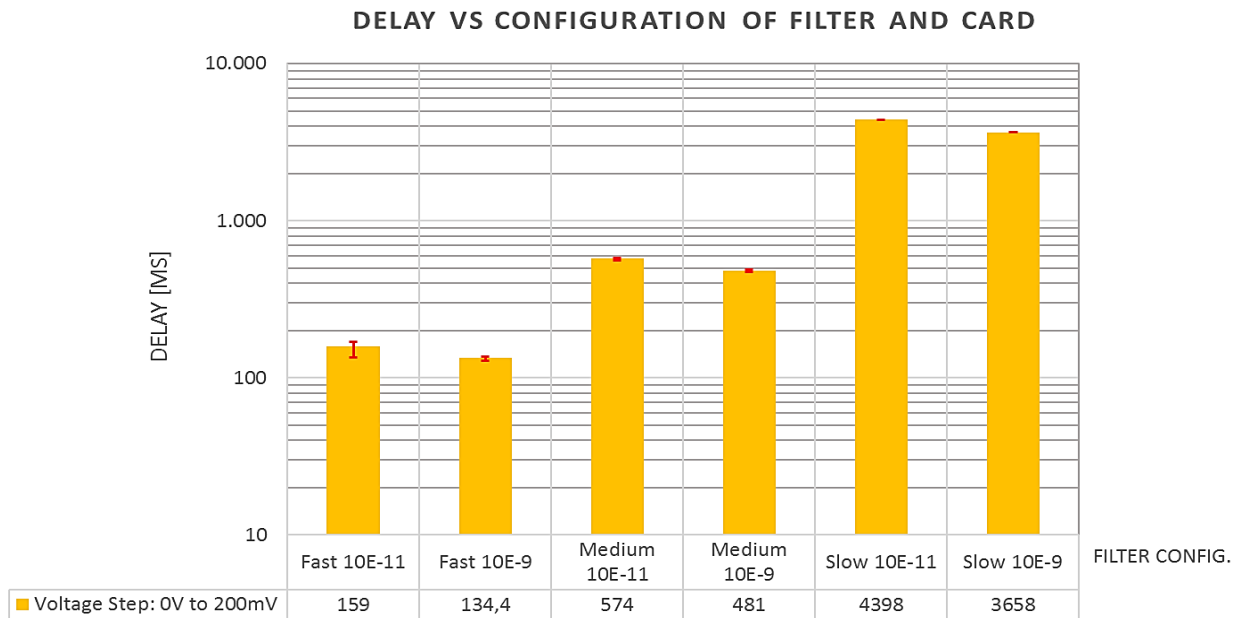
**Tabla 4. Retraso total [ms] entre el aumento de presión –simulado por un incremento en la tensión de entrada – y la apertura del relé. Umbral de 1·10<sup>-6</sup> - 4·10<sup>-6</sup> mbar.**

Tarjeta 10 <sup>-9</sup> mbar			
Escalón de tensión	Configuración de filtro		
	Rápida	Media	Lenta
0 a 200mV	134,4	481	3658
0 a 1 V	38,1	255	1982
0 a 10 V	24,6	125	913

Las conclusiones son similares a las comentadas con la tarjeta anterior, siendo más lento el sistema cuanto más lento sea el filtro seleccionado. Además, cuanto mayor sea la amplitud de la señal escalón, más rápida es la tarjeta en sobrepasar el umbral establecido.

### 4.2.4 Recopilación de resultados.

La Figura 21 resume la dependencia que existe en las mediciones con respecto al retraso total del sistema, dependiendo del escalón de tensión y de las diferentes configuraciones del filtro del controlador para unos umbrales de presiones de 1·10<sup>-6</sup> - 4·10<sup>-6</sup> mbar.

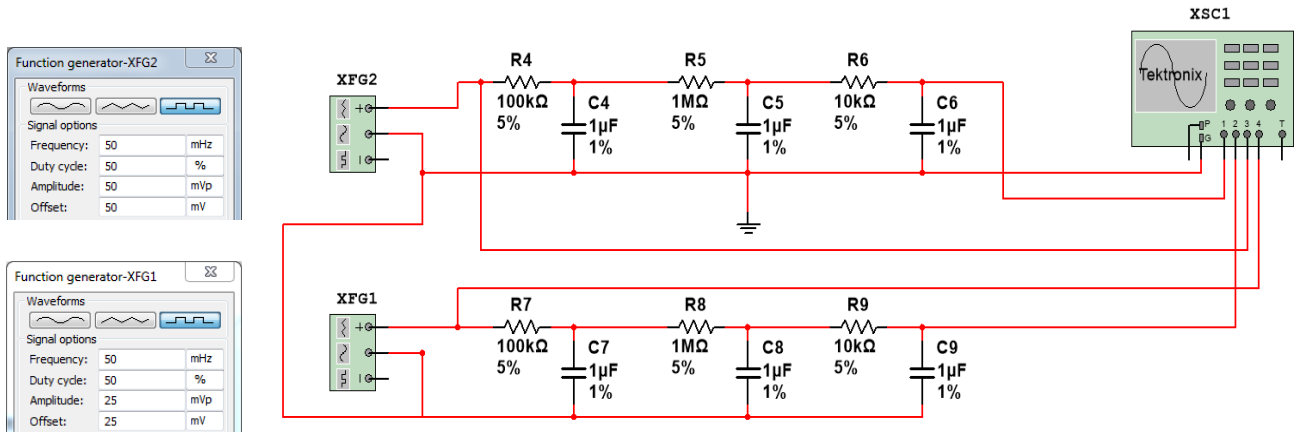


**Figura 21. Retraso total [ms] obtenido con la variación de todos los parámetros tenidos en cuenta.**

Los resultados muestran claramente que una mayor amplitud en la señal escalón de tensión a la entrada (y por lo tanto mayor escalón de corriente, que a su vez significa un aumento más instantáneo de la presión) produce una respuesta más rápida del sistema. Esto se debe a que un salto mayor en la corriente hace que el sistema se establezca más rápidamente que con uno menor. Es lógico que los filtros de señal que hay en la tarjeta de medición producen un menor retraso

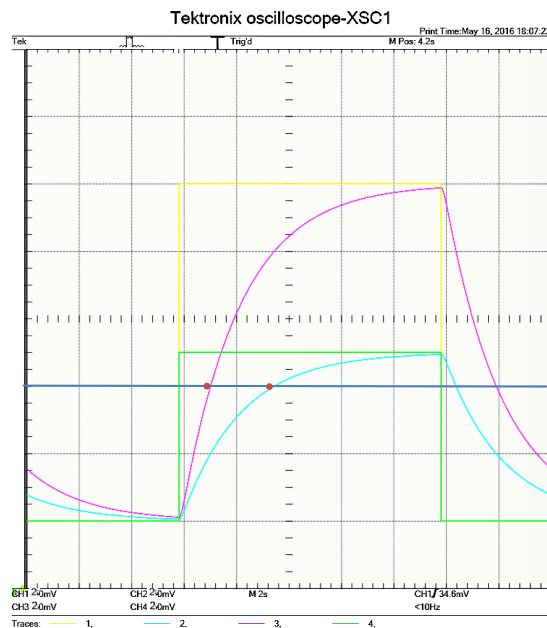
conforme aumenta la amplitud de la señal escalón debido a la naturaleza exponencial de la señal tratada después de su filtrado.

La Figura 22 muestra un circuito que sirve para ilustrar el comportamiento descrito. Este circuito fue tomado de los esquemas electrónicos de los controladores VPI, explicados en la sección siguiente.



**Figura 22. Simulación de dos escalones de tensión como entrada a un filtro pasivo de tercer orden.**

La Figura 23 presenta los datos obtenidos en la simulación del circuito mostrado en la Figura 22. Las trazas verde y amarilla corresponden a la señal de entrada en forma de escalón de tensión para cada uno de los filtros, siendo este escalón de 50 mV y 100 mV respectivamente. Además, las trazas en turquesa y magenta se corresponden con la tensión de salida de dichos filtros, midiendo la tensión entre el último condensador del filtro y masa.



**Figura 23. Señales de entrada y salida de ambos filtros obtenidos con un osciloscopio virtual.**

Esto ejemplifica bastante bien la premisa antes establecida. Si, por ejemplo, se establece un umbral de 40mV como condición de activación del enclavamiento, la señal filtrada producida por el generador de señales mostrado en la parte superior del esquemático (traza magenta) tardaría aproximadamente 1.2s antes de alcanzar dicho umbral. Sin embargo, la señal filtrada producida por el generador de señales inferior (traza turquesa) tardaría unos 3.7s antes de llegar al mismo umbral de tensión.

Como resultado, tendríamos un sistema que respondería más lentamente en casos de que se produjeran pequeñas fugas donde el incremento de presión no sería tan perceptible. Por el

contrario, el sistema sería más rápido en caso de que se produjeran incrementos de presión más bruscos debido a eventos de naturaleza más súbita.

Además, en los tests en los que se consideró el incremento de tensión de 100 a 200 mV (Tablas 5 y 10), el tiempo que el relé tarda en producir la respuesta deseada desde que se produce el aumento de presión es mucho menor de lo esperado basándonos en las explicaciones anteriores. La explicación puede ser que, como ya hay corriente presente en el circuito antes de producir la señal escalón de entrada, los estados transitorios de los componentes (por ejemplo, el cambio de zona de trabajo de los transistores) tendrán menor influencia en la respuesta del sistema. Esto difiere de los otros casos en los que los tests comenzaban teniendo una tensión de 0V en la señal de entrada. Por otra parte, se puede decir que no hay una relación observable en si el offset de la tensión de entrada, más cercano o más alejado de la tensión umbral, tiene un impacto real en el retraso total del sistema. Aun así, según el ejemplo de las Figura 22 y 24, se puede deducir que cuanto menor sea la diferencia entre el voltaje inicial y el umbral, más rápida debería ser la respuesta ofrecida por el sistema.

### 4.3 CONTROLADORES DE LAS BOMBAS IÓNICAS.

Una vez que se ha analizado el controlador TPG 300, todavía es necesario realizar análisis similares con los controladores de las bombas iónicas. Para ser más preciso, se realizarán tests a tres tipos de controladores diferentes: la fuente de alimentación de las bombas iónicas de tipo triodo, usada en el LHC y el CPS -con un voltaje de -5,6 kV-, y las dos usadas en el SPS para bombas iónicas pequeñas de tipo diodo - con un voltaje de 5,6 kV- y para bombas iónicas de tipo triodo de mayor tamaño - con un voltaje de -5,6 kV-.

El objetivo es determinar el retraso que estas fuentes de alimentación generan en la cadena de enclavamientos. Para ello, una SMU fue conectada en paralelo con la resistencia shunt presente en cada uno de los circuitos de las fuentes de alimentación, tal y como se explicará en las secciones siguientes.

Aun así, el banco de pruebas para los tres casos fue igual, tal y como puede observarse en la Figura 24.

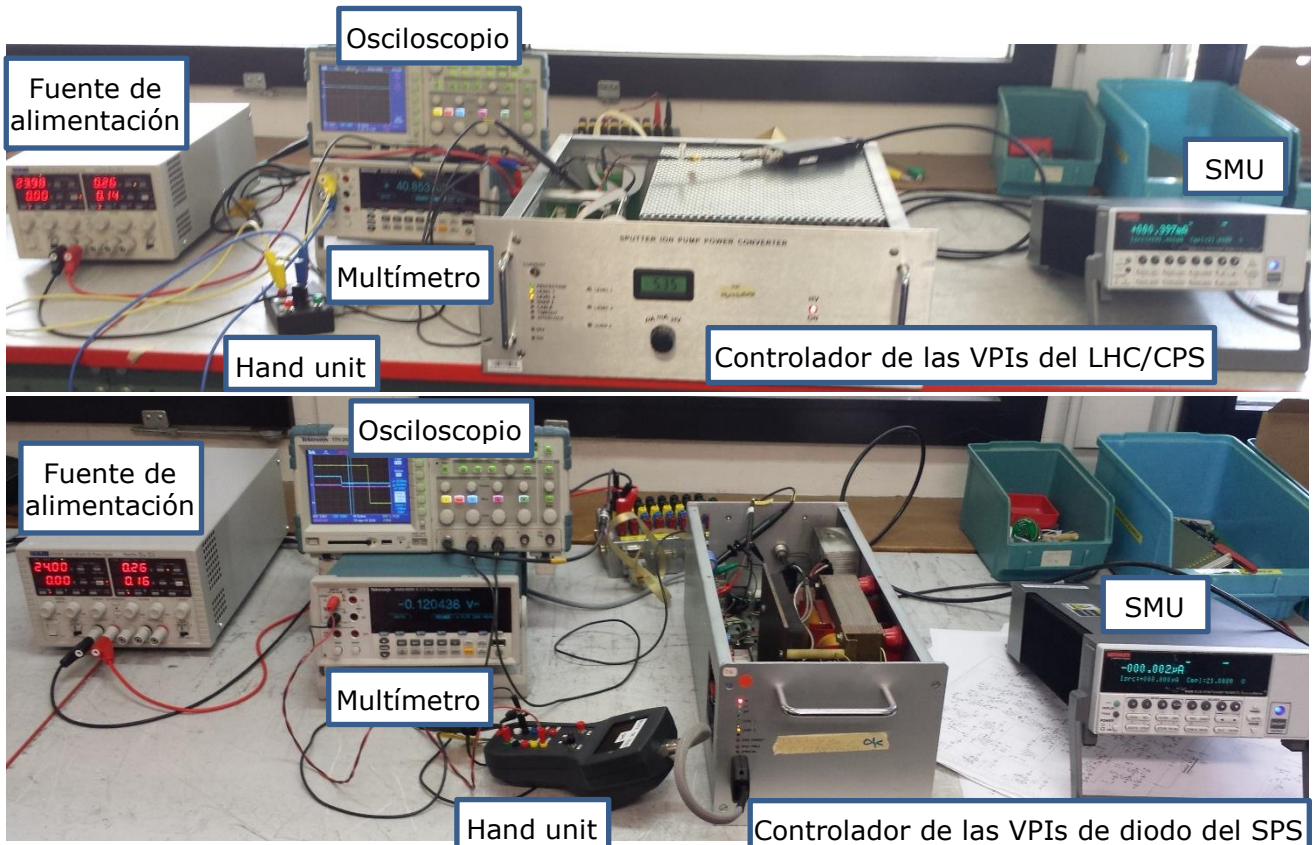


Figura 24. Banco de pruebas para las mediciones del retraso que generan las fuentes de alimentación de las bombas iónicas.

### 4.3.1 Controladores para VPIs del LHC y del CPS.

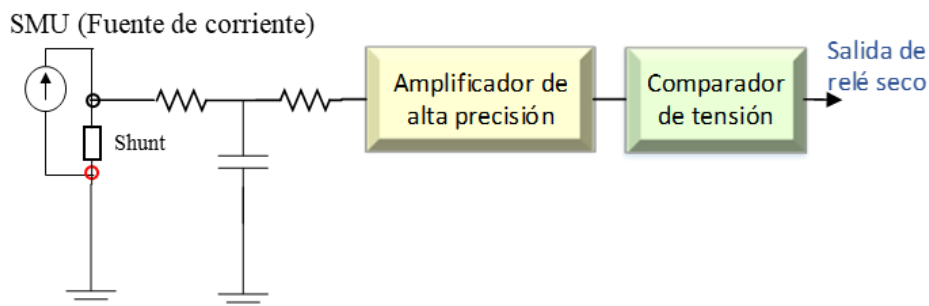
Un controlador puede conectarse a diferentes tipos de bombas iónicas, dependiendo del tamaño de la bomba y de la rapidez de bombeo. Por lo tanto, estos controladores deben configurarse consecuentemente. Para lograr esta configuración, se debe chequear la tensión de salida proporcionada por la fuente de alimentación y ajustarla al valor adecuado mediante el ajuste de un potenciómetro externo. Hay un total de 3 potenciómetros que permiten establecer 3 niveles distintos de protección. El nivel 1 se usa para generar la señal de enclavamiento, mientras que el nivel 2 (normalmente configurado con un umbral mayor) genera la señal de alarma para los usuarios. Por último, el nivel de sobrecorriente permite parar el funcionamiento del controlador, haciendo necesario tener que volver a encenderlo manualmente.

La siguiente tabla muestra cómo debe ajustarse la tensión de control en el nivel 1 para lograr establecer el umbral de presión deseado. Este umbral de presión fue definido a  $1 \cdot 10^{-6}$  -  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar para estos controladores. Como puede observarse, en el LHC y el CPS hay varios tipos de bomba iónicas, y los cinco tipos mayormente utilizados se distinguen según cuatro velocidades de bombeo distintas.

**Tabla 5. Nivel de tensión y presión de enclavamiento vs tipo de VPI del LHC/CPS.**

Nombre	Tipo	I [mA] @ $1 \cdot 10^{-6} / 2 \cdot 10^{-6}$ mbar	V = 40·I [mV]
VPIA/VPIAN	30l/s	1	40
VPIB	Varian Starcell 75 (60l/s)	3	120
VPIZ	Varian triode 350l/s	7	280
VPIC/VPICA	Varian Starcell 400l/s	20	800
VPIY	Vaclon Plus 500 Starcell (400l/s)	20	800

Para la realización de los tests se conectó una SMU en paralelo con la resistencia shunt, tal y como se muestra en la Figura 25. La SMU sirvió para generar un escalón de corriente, simulando un incremento de presión en el sistema. Después se midió el retraso entre la generación de este escalón a la entrada y la activación de la señal de enclavamiento. La fuente de la señal de enclavamiento es un relé que se activa cuando el sistema está por debajo de la presión umbral, desactivándose cuando la presión sobrepasa dicho umbral.



**Figura 25. Parte del esquemático de un controlador de VPIs usado en el LHC y el CPS y la conexión de la SMU 6430 sub-femtoamp remote SourceMeter de Keithley.**

Tal y como se ha comentado antes de la Tabla 5, estos test tuvieron que realizarse 4 veces distintas según la velocidad de bombeo, variando la tensión de referencia del Nivel 1 para cada una de las velocidades de bombeo. También se consideraron diferentes escalones de corriente para ver su posible influencia. Primeramente, se determinó el umbral de corriente a partir del cual ocurre la conmutación del relé asociado a la señal de enclavamiento. Posteriormente, y comenzando con los tests, se decidió realizar tres tipos de salto escalón distintos siempre con una amplitud de 1 mA. El offset de dichos saltos escalón se modificó, haciendo que en cada test estuviera más cercano al umbral de corriente. Además, se consideraron dos tests adicionales con dos escalones de corrientes de mayor amplitud, para ver el impacto que tenían en el

comportamiento del sistema. Todas estas consideraciones resultaron en un test con un total de 380 mediciones.

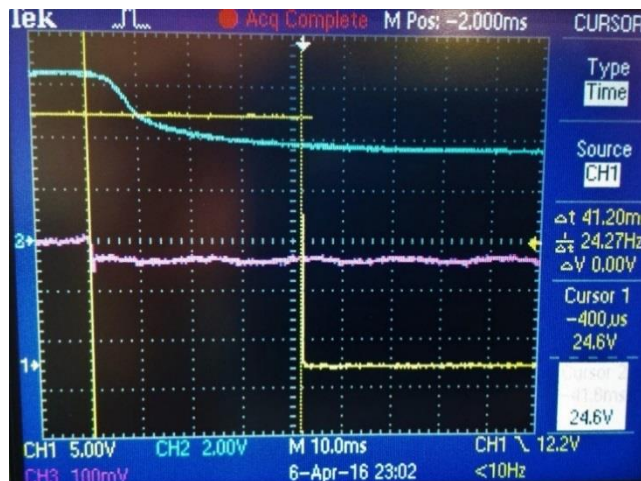
En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para uno de los escalones de corriente considerados; en concreto el de menor amplitud y menor offset con respecto al umbral.

**Tabla 6. Retraso [ms] desde el escalón de entrada hasta la conmutación del relé de salida.**

Fuente de alimentación de VPI (bombas de triodo en LHC y CPS)								
Tipo (L/s)	30		60		350		400	
Nivel de tensión [mV]	40		120		280		800	
Umbral de corriente [mA]	-0,605		-2,625		-6,625		-19,785	
Escalón de corriente [mA]	-0,48 a -1,48 mA	<b>13,38</b>	-2,5 a -3,5 mA	<b>14,20</b>	-6,5 a -7,5 mA	<b>16,76</b>	-19,66 a -20,66 mA	<b>15,76</b>

De los resultados obtenidos, podemos observar una fuerte dependencia de la respuesta de la señal tanto a la amplitud del escalón de entrada como al offset de dicha señal. Este comportamiento bien puede explicarse con el razonamiento dado en el circuito ejemplo de la Figura 22, debido a los filtros pasivos situados a lo largo del circuito de la fuente de alimentación. Por lo tanto, cuanto menor sea la amplitud y mayor sea el offset de la señal entrante con respecto al umbral, más lenta sería la señal filtrada en alcanzar el umbral de corriente, haciendo por supuesto la respuesta más lenta. Para más detalle, refiérase a la explicación dada después de los resultados presentados en la Figura 23.

La Figura 26 muestra los resultados obtenidos en uno de los tests, en concreto, con una configuración pensada para una bomba iónica de 30 L/s y con un escalón de corriente de 0 a -1 mA. En esta figura, el primer canal –en amarillo– medía el voltaje de salida del relé (0-24 V), el segundo canal – en cian– medía la tensión de salida de la fuente de alimentación y finalmente, el tercer canal –en magenta– medía la caída de tensión en el shunt originada por el escalón de corriente.



**Figura 26. Respuesta temporal para una configuración de VPI de 30 L/s. Escalón de corriente de 0 a -1 mA.**

Para clarificar, la tensión de salida proporcionada por el controlador es una información enviada a un PLC y usada para monitorizar el estatus del sistema. Los diferentes valores y rangos y sus significados pueden verse en la Tabla 7. Además, esta tensión de salida también se usa por el PLC para realizar la conversión Voltaje-Corriente-Presión. Primero, la señal entrante en el PLC se convierte a voltios ( $U$ ):

$$U = \frac{ADC_{raw}}{2764.8} \tag{3}$$

Posteriormente se obtiene la corriente ( $I$ ) con la siguiente ecuación:

$$I(U) = EXP\left(\frac{k-U}{\log(e)}\right) \quad (4)$$

donde  $k$  es igual a cero ( $k=0$ ) para este tipo de VPI y  $U$  es el voltaje obtenido previamente.

Finalmente, la presión equivalente ( $P_{tot}$ ) puede obtenerse de la siguiente forma:

$$P_{tot} = K \times I \quad (5)$$

donde  $K$  es un coeficiente dependiente de cada tipo de VPI e  $I$  es la corriente antes obtenida.

Como la tensión de salida del controlador VPI puede medirse también en la unidad de mano, se pensó como coherente el ver los cambios en esta señal durante los tests.

**Tabla 7. Rango de posibles valores en la tensión de salida en los controladores de VPI del LHC/CPS y el significado asociado.**

Alim. type PS Subtype 5 / Alim. LHC Subtype 3	
U < 1V	Error: too low ADC voltage
1V < U < 6V	Valid range
6V < U < 7.25V	UR
7.25 < U < 7.75	OFF
7.75 < U < 8.25	Start-Up Interlock (typical 8.0v) Only type PS
8.25 < U < 8.75	Overcurrent
8.75 < U < 9.25	No protection 30mn Time-Out (typical 9.0v)
9.25 < U < 9.75	open cable (typical 9.5v)
U > 9.75	Error

### 4.3.2 Controladores del SPS.

Hay algunas similitudes entre los controladores usados en el LHC y CPS y los usados en el SPS. Por ejemplo, todos ellos tienen 3 potenciómetros para distintos niveles de protección. Electrónicamente, todos tienen en común una etapa comparadora con un disparador Schmitt, para permitir la comparación entre la señal de entrada y el umbral establecido manualmente. Justo después del comparador se encuentra el relé que da la señal de salida de enclavamiento.

A su vez, también hay algunas diferencias, siendo la más importante que los umbrales de presiones fijados en las instalaciones subterráneas, definidas por un valor de tensión, no son conocidas o no están especificadas. Cuando se comenzó a realizar los primeros tests en estos controladores, se podía leer un umbral de tensión cercano a 280 mV. Por lo tanto, la decisión fue de hacer los tests de las fuentes de alimentación de las VPI en el SPS con los mismos umbrales que los establecidos para los controladores del LHC/CPS. Otra diferencia es que algunos rangos de la tensión de salida son algo diferentes, tal y como se observa en la Tabla 8.

**Tabla 8. Rango de posibles valores en la tensión de salida en los controladores de VPI del SPS y el significado asociado.**

VPCI_WimKo (SPS) Subtype 1&2	
U < 1V	Error: too low ADC voltage
1V < U < 7V	Valid range
7V < U < 7.25V	UR
7.25 < U < 8.25	OFF
8.25 < U < 8.75	Overcurrent
8.75 < U < 9.25	Sparkling
9.25 < U < 9.75	Open Cable
U > 9.75	Error

Con respecto a los cálculos del voltaje, la corriente y la presión, las ecuaciones son iguales a las anteriores (3), (4) y (5). Esta vez, sin embargo,  $k = 1$  para las fuentes de alimentación de las VPI de triodo y  $k = 0$  para las fuentes de alimentación de las VPI de diodo.

### 4.3.2.1 CONTROLADORES PARA LAS VPIS DE DIODO (POSITIVAS) DEL SPS.

El comportamiento del sistema es similar al obtenido en los tests del controlador de VPIs del LHC/CPS. La SMU sirvió para generar el salto escalón de corriente, simulando un incremento de presión en el sistema. Posteriormente se midió el retraso entre dicho escalón y la activación de la señal de enclavamiento. Para la caracterización de este controlador se tomaron un total de 370 mediciones.

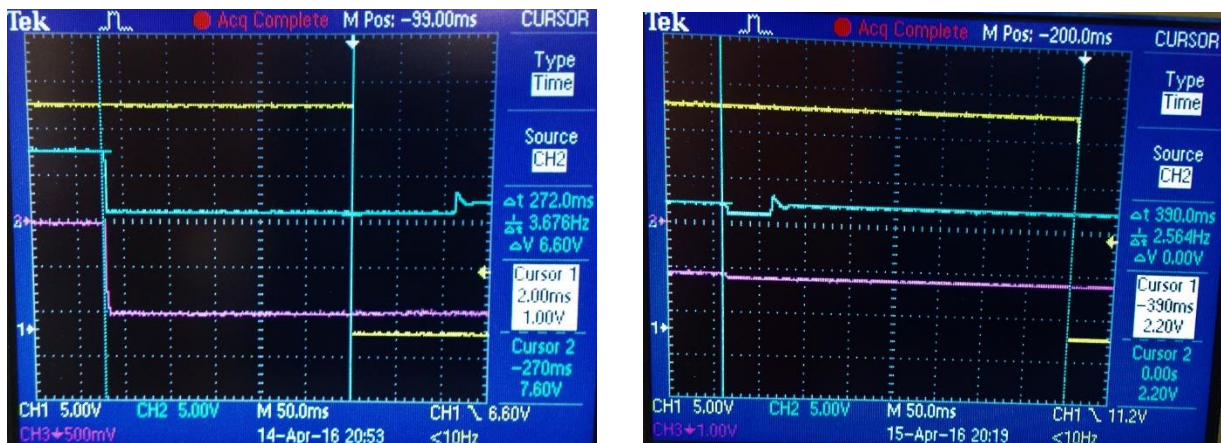
Como en estas VPI no había unos valores predefinidos de voltajes a los que atenerse, los resultados obtenidos se basaron en los valores establecidos en los tests del apartado 4.3.1. Al igual que en el subapartado anterior, en la Tabla 9 se muestran los resultados medios obtenidos para uno de los escalones de corriente considerados; en concreto el de menor amplitud y menor offset con respecto al umbral.

**Tabla 9. Retraso [ms] desde el escalón de entrada hasta la conmutación del relé de salida.**

Fuente de alimentación de VPI (bombas de diodo en SPS)								
Nivel de tensión [mV]	-40		-120		-280		-800	
Umbral de corriente [mA]	-3,24		-4,08		-5,81		-11,755	
Escalón de corriente [mA]	-3,115 a -4,115 mA	<b>69,8</b>	-3,955 a -4,955 mA	<b>78</b>	-5,685 a -6,685 mA	<b>110</b>	-11,63 a -12,63 mA	<b>65</b>

De nuevo, podemos ver la dependencia en el retraso de la señal debido tanto a la amplitud como al offset de la señal escalón, teniendo la misma explicación que antes (refiérase a los comentarios posteriores a la Figura 23).

Las Figuras 27 y 28 muestran los resultados de varios tests para diferentes escalones de corriente. El primer canal –en amarillo– medía la tensión de salida en el relé (0-24 V), el Segundo canal –en cian– medía la tensión de salida de la Fuente de alimentación y, finalmente, el tercer canal –en magenta– medía el escalón de voltaje entrante entre el shunt, proporcionada por el escalón de corriente de la SMU.



**Figuras 27 y 28. Respuesta temporal de los controladores de VPI de diodo en el SPS. Escalón de corriente de 0 a -10 mA a la izquierda y de -11 a -12 mA a la derecha.**

Durante los tests llevados a cabo para este tipo de controladores de VPIs, el comportamiento de la señal de tensión de salida fue bastante característico. Cuando se inyectaba un escalón de corriente de 1 mA, la tensión de salida siempre sufría un cambio repentino desde su valor actual hasta el menor valor de tensión dentro del rango de comportamiento adecuado, manteniéndose así durante unos 50 ms, volviendo después a su valor teórico. Para amplitudes mayores, tomaba incluso más tiempo regresar al valor teórico, unos 380 ms o incluso más.

### 4.3.2.2 CONTROLADORES PARA LAS VPIS DE TRIODO (NEGATIVAS) DEL SPS.

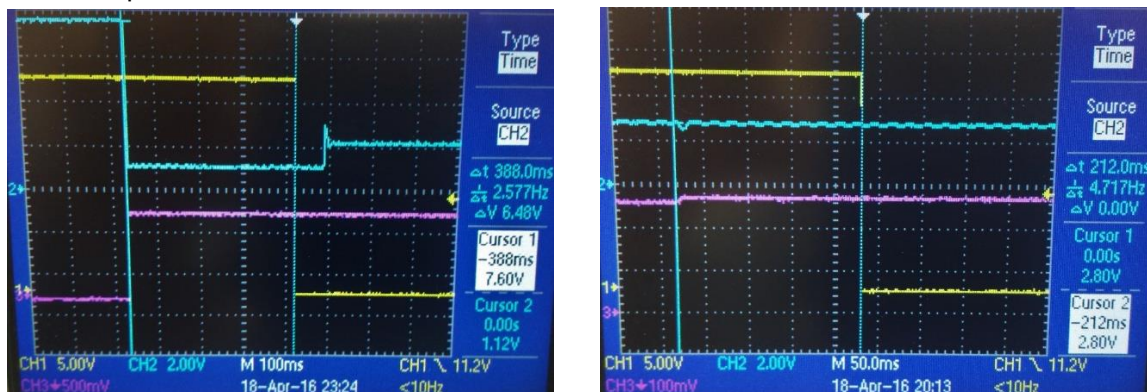
De nuevo, este controlador muestra un comportamiento similar a los controladores anteriores. La conexión del sistema y el equipo es también igual al que se ha especificado en las VPIS anteriores. Para la caracterización de este controlador se tomaron un total de 250 mediciones. Los resultados obtenidos para esta serie de tests se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Retraso [ms] desde el escalón de entrada hasta la conmutación del relé de salida.

Fuente de alimentación de VPI (bombas de triodo en SPS)									
Nivel de tensión [mV]	40		120		280		800		
Umbral de corriente [mA]	2,91		10,91		26,97		79,04		
Escalón de corriente [mA]	2,785 a 3,785 mA	74,6	10,785 a 11,785 mA	84	26,845 a 27,845 mA	77	78,915 a 79,915 mA	81	

Para estos tests, se observó que un escalón de corriente de 0 a 10 mA no era de mucha utilidad ya que solo comprendía un único valor de umbral de corriente.

Las Figuras 29 y 30 muestran los resultados de varios test para diferentes valores de corrientes de entrada. De nuevo, el primer canal –en amarillo- medía la tensión de salida en el relé (0-24 V), el Segundo canal –en cian- medía la tensión de salida de la Fuente de alimentación y, finalmente, el tercer canal –en magenta- medía el escalón de voltaje entrante entre el shunt, proporcionada por el escalón de corriente de la SMU.



Figuras 29 y 30. Respuesta temporal de los controladores de VPI de triodo en el SPS. Escalón de corriente de 0 a 100 mA a la izquierda y de 26,5 a 27,5 mA a la derecha.

Es de destacar que, al contrario que los controladores para las VPI de diodo, para este tipo de controladores, el comportamiento en la señal de tensión de salida fue más sutil. Esta vez, el tiempo necesario para que la señal de tensión se restableciera a su nivel teórico fue mucho menor, y es por eso por lo que se consideró despreciable para ser medido. Sin embargo, para amplitudes mayores ocurrió como en las mediciones del subapartado anterior, siendo mucho mayor el tiempo que tardaba la tensión de salida en volver a su valor teórico (unos 450 ms o más).

## 4.4 SISTEMAS DE ENCLAVAMIENTOS.

El siguiente paso en la cadena de enclavamientos es la conexión entre los controladores que ya se han estudiado y los racks de enclavamientos. El diseño de estos racks es completamente distinto uno de otro, dependiendo del acelerador en el que se usen. Aun así, cada uno de estos racks se encarga de controlar los enclavamientos de las VVGS individualmente (es decir, se usa un rack por válvula).

### 4.4.1 Sistema de enclavamiento para el LHC.

Este rack (Figura 31) consiste de 4 entradas y 6 salidas y tiene una dimensión de 1 unidad de altura. Las 4 entradas corresponden a las salidas de los contactos secos o relés ya sea de los

controladores de VPI o los TPG 300. Cuatro de las salidas se corresponden con señales duplicadas de las entradas, que podrán servir para conectar con otros racks y generar otros enclavamientos. Las dos otras se usan para conectar estos racks con los siguientes en la cadena de enclavamiento, dando el resultado de salida de la lógica de enclavamiento. La premisa para la generación del enclavamiento es la siguiente: de los cuatro dispositivos o controladores que pueden estar conectados a este rack como máximo (dos controladores TPG 300 y dos fuentes de alimentación de VPIs), tres deberían dar un error en la señal local de enclavamiento de presión para la generación de la señal de enclavamiento local LI, para la VVGS en cuestión (conocido como lógica "3 de 4" o "3oo4"). Para comprobar estas condiciones se usa un sistema de lógica programable, implementado mediante una EPROM M24C256B. En la Figura 32 se representa el diagrama de conexionado del Sistema.



Figura 31. Rack de enclavamientos usado en el LHC/L4/AWAKE.

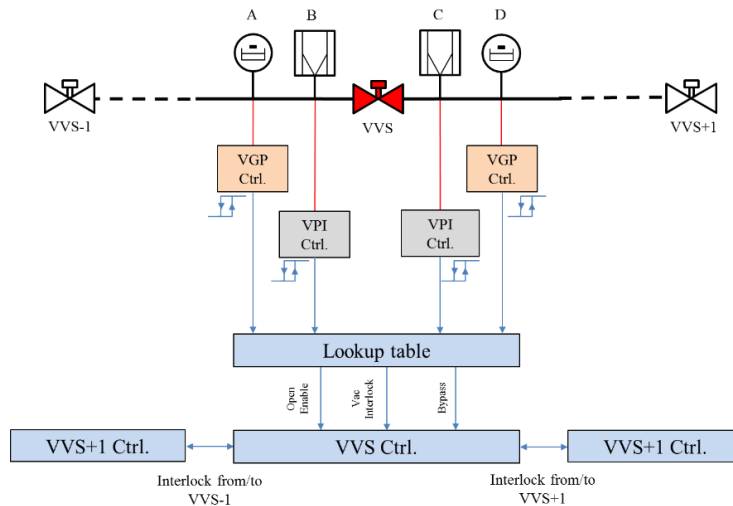


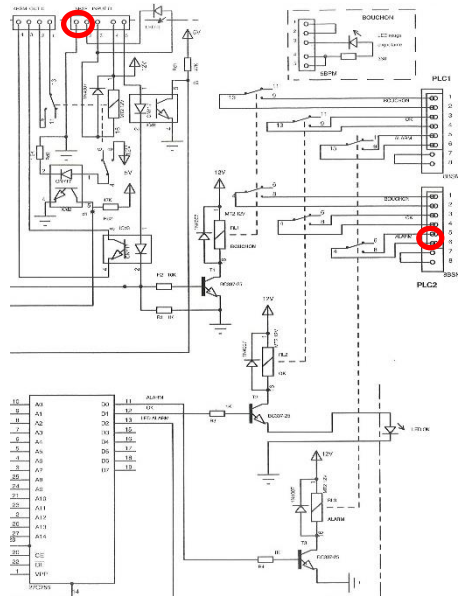
Figura 32. Diagrama de conexionado de los controladores de VPI y TPG 300 al rack de enclavamientos [7]

Para la caracterización del retraso temporal que este rack genera se realizaron dos mediciones distintas. La primera se centró en el retraso producido desde el momento en que una de las señales de entrada cambiaba a un estado de enclavamiento, hasta el momento que esto se veía reflejado en la conexión de salida que duplica el estado de esta entrada. Esta medición se comprobó para cada uno de los 4 pares entrada-salida que este rack ofrece, y los resultados pueden verse en la Tabla 11. Debido a la consistencia y precisión de los resultados, solo se tomaron 8 mediciones para cada uno de los tests, con un total de 32 mediciones.

Tabla 11. Retraso [ms] desde la activación del interruptor hasta cambio en la señal duplicada de salida.

Interruptor activado	Tiempo de bajada del relé [ms]	Retraso [ms] hasta enclavamiento
A	0,4	3,84
B		3
C		1,92
D		2,52

Las segundas mediciones se centraron en el retraso desde que se activó el interruptor de entrada hasta que se producía un cambio en la señal de enclavamiento de salida. Para las mediciones, la señal de salida se mantuvo igual. La señal de salida se comprobó entre los pines 5-6 de la salida PLC1, correspondiendo a la señal de alarma (ver Figura 33).



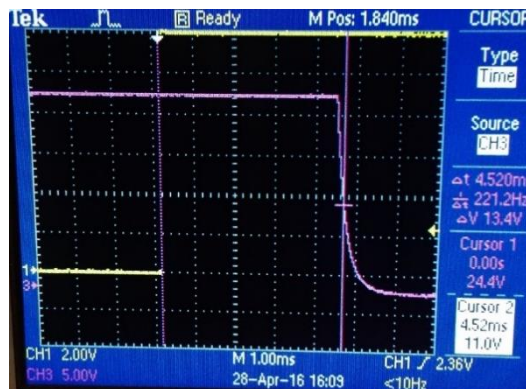
**Figura 33. Sección del rack de enclavamientos del LHC con la conexión de entrada, las conexiones de la EPROM y la salida de alarma.**

Esta medición se realizó para cada una de las posibles configuraciones en cuanto a las condiciones en la generación de la señal de enclavamiento (es decir, para cada una de las 12 configuraciones de entrada que producen la señal de enclavamiento). El estado inicial del test se configuró haciendo que dos de los tres dispositivos necesarios para generar el enclavamiento estuvieran en estado de error. Por lo tanto, cambiando el estado de cualquier otro dispositivo se generaría la señal de enclavamiento. La Tabla 12 presenta el retraso medio obtenido en los tests. De nuevo, debido a la consistencia de los resultados, solo se tomaron 6 mediciones por cada test, con un total de 72 mediciones.

**Tabla 12. Retraso [ms] desde la activación del interruptor hasta el 50 % de caída en la señal de salida.**

Retraso medio [ms] hasta enclavamiento	4,80
--	------

La Figura 34 adjunta muestra uno de los resultados obtenidos en los tests interiores.



**Figura 34. Retraso desde activación del interruptor hasta el cambio en la señal de salida.**

#### 4.4.2 Sistema de enclavamiento para el SPS.

Este sistema consiste de dos racks. El primero (Figura 35) tiene una altura de 1 unidad y consta de 6 entradas y 1 salida. Su objetivo es generar la señal de enclavamiento LI para el control de la VVGS. Las señales de salida de enclavamiento provenientes de los controladores de VPI (tres situados después de la VVGS y tres antes de la siguiente VVGS) se conectan a estas entradas, resultando en la siguiente lógica para la detección de un estado correcto u OK:

$$VAC\_OK = (A \text{ OR } B \text{ OR } C) \text{ AND } (F \text{ OR } G \text{ OR } H) \quad [5]$$

Esto significa que para el sistema esté en estado normal, al menos uno de los controladores de VPI a cada lado deben estar en un estado correcto. Si, de alguno de los lados, uno de estos controladores cambiará su salida a un estado de enclavamiento, esto haría que el sistema cambiara de un estado correcto a uno de alarma.



Figura 35. Rack RXVF-VPI para las conexiones de enclavamientos de las VPI en el SPS.

El segundo rack (Figura 36) tiene una altura de 3 unidades. Tiene multitud de conexiones, pero las más relevantes son las 7 que se destacan a continuación. B1 es la conexión entre el rack de enclavamientos y la VVGS, y es la que permite dar el comando de apertura o cierre a la válvula. B4 es la entrada en la que se conecta la señal de enclavamiento generada por el rack RXVF-VPI. B5 es la conexión entre el rack de enclavamientos y el rack de SVCU. B9 es la entrada de la señal LI generada por el rack de enclavamientos de la VVGS anterior. Finalmente, B11 y B14 son las conexiones de una señal de enclavamiento, llamada Delta de Presión (DP), y que es el enclavamiento proveniente de los controladores TPG 300 antes y después de la VVGS. Estas conexiones pueden verse en la Figura 37 para más detalle.



Figura 36. Rack de enclavamientos usado en el SPS.



### 4.4.3 Sistema de enclavamiento para el CPS.

Este sistema consiste en un rack de 6 unidades de altura. Este sistema tiene 6 tarjetas (Figura 39) y 2 canales por tarjeta, haciendo un total de 12 canales (Figura 40). Cada canal consiste de 4 entradas y 4 salidas.

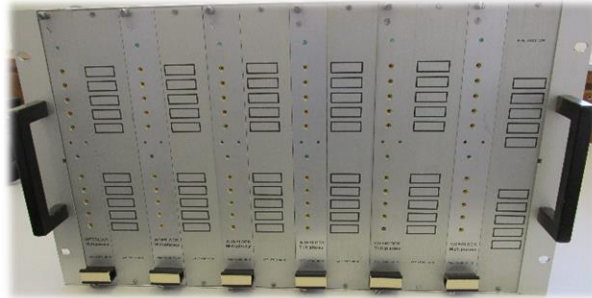


Figura 39. Panel frontal del rack de enclavamientos de funcionalidad Multiplexora (MUX) usado en el CPS, mostrando las 6 tarjetas.



Figura 40. Panel trasero del rack de enclavamientos del MUX usado en el CPS mostrando los 12 canales, 2 por tarjeta.

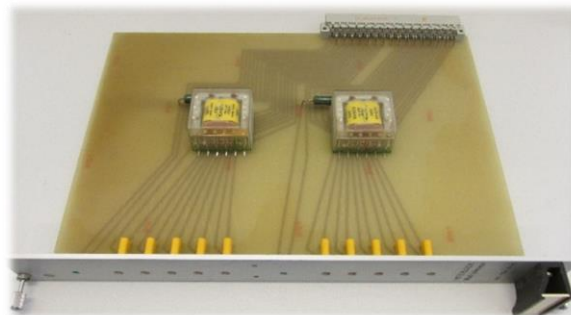


Figura 41. Una de las tarjetas del rack de enclavamientos MUX del CPS, mostrando la lógica cableada.

Generalmente, todas las cuatro entradas son usadas, estando conectadas a las salidas de enclavamiento de cuatro controladores VPI a un lado de la VVGS. Para tener la lógica completa del Sistema es necesario tener otro canal que recoja las señales de las VPI del otro lado de la VVGS, teniendo, por lo tanto, una señal de enclavamiento previa a la VVGS y otra posterior. Por lo tanto, se obtiene la siguiente lógica:

$$VVS VAC_{OK_{PREV}} = ((A \text{ OR } B) \text{ AND } (C \text{ OR } D)) \quad [6]$$

$$VVS VAC_{OK_{NEXT}} = ((E \text{ OR } F) \text{ AND } (G \text{ OR } H)) \quad [7]$$

$$VVS VAC_{OK} = VVS VAC_{OK_{PREV}} \text{ AND } VVS VAC_{OK_{NEXT}} \quad [8]$$

Las cuatro salidas de cada canal son una copia de la misma señal  $VVS VAC_{OK_{channel}}$ . Centrándonos en uno de los canales, por ejemplo, el asociado a la posición posterior a la VVGS, esta señal  $VVS VAC_{OK_{channel}}$  sirve para dar un enclavamiento posterior a la VVGS que concierne, al igual que un enclavamiento previo a la siguiente VVGS.

La Figura 42 da una visión global de las conexiones ya explicadas:

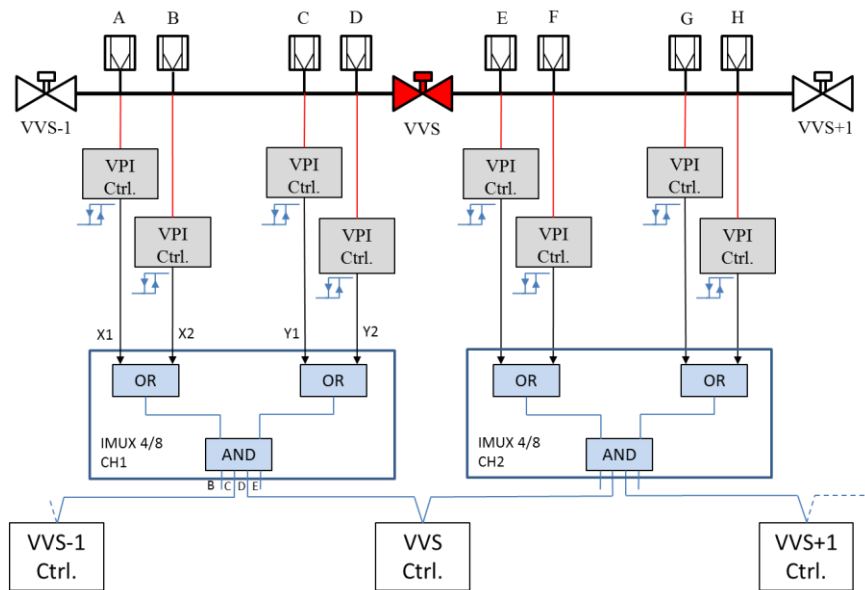


Figura 42. Diagrama de conexionado del rack de enclavamientos con los controladores de VPI. [7]

Los tests de este rack se centraron en el retraso temporal desde la activación del interruptor hasta el cambio en la salida del multiplexor. Este test se realizó para cada posible configuración que produciría la señal de enclavamiento. De nuevo, y debido a la consistencia de los resultados, solo se consideraron 5 mediciones para cada configuración, un total de 60 mediciones. La Figura 43 muestra uno de los resultados obtenidos en las mediciones.

Tabla 14. Retraso [ms] desde la activación del interruptor hasta el 50 % de la señal  $VVS VAC_{OKchannel}$ .

Retraso medio [ms] hasta la conmutación del relé.	17,3
---	------

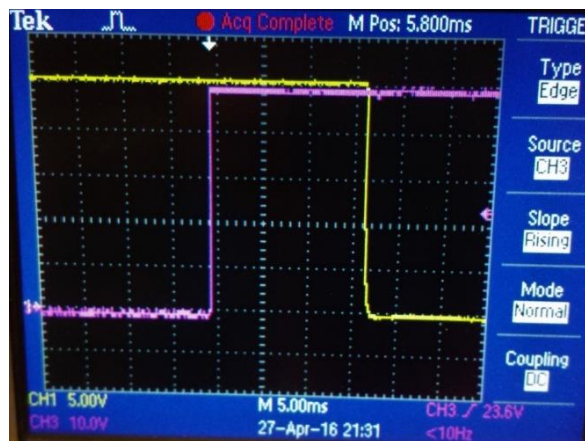


Figura 43. Retraso desde la activación del interruptor hasta el cambio en la salida del rack MUX ( $VVS VAC_{OKchannel}$ ).

### 4.5 SISTEMAS SVCU.

Para cada VVGS hay un controlador llamado SVCU que recibe todas las salidas de los racks de enclavamientos. Normalmente, por cada rack de SVCU puede haber hasta 8 tarjetas SVCU, cada una sirviendo para controlar el estado de una única VVGS.

Para ejecutar el control, estas tarjetas contienen un dispositivo lógico programable complejo o CPLD. Este controlador es el responsable de operar la apertura o cierre de la VVGS, dependiendo

de los diferentes estados de enclavamiento que pueden ocurrir para el mismo sistema. Estas tarjetas también permiten ser operadas tanto manual como remotamente. Además de para controlar el LI, también sirven para gestionar las condiciones en que el enclavamiento no proviene del rack de enclavamientos de la VVGS, sino del enclavamiento de una VVGS anterior o posterior. Una representación general de las conexiones de dicha tarjeta se muestra en la Figura 44.

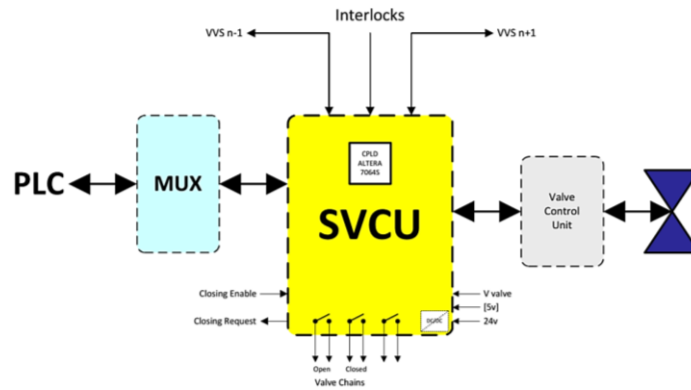


Figura 44. Diagrama de conexión general de una tarjeta SVCU.

#### 4.5.1 SVCU del LHC.

Las tarjetas SVCU usadas en el LHC tienen varias señales de enclavamiento asociadas, como puede observarse en la Figura 45.

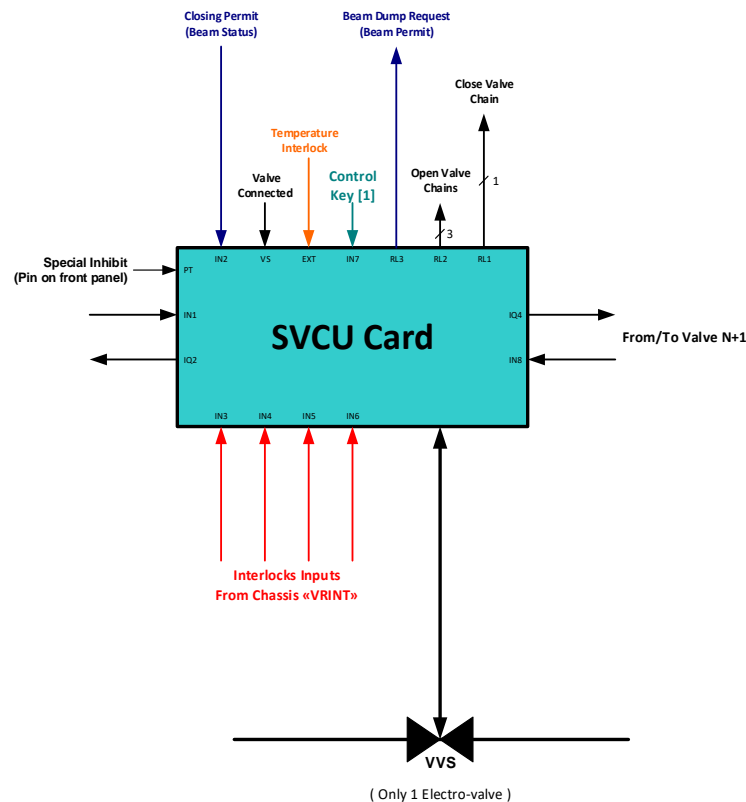


Figura 45. Diagrama general de una tarjeta SVCU usada en el LHC.

Tal y como se deriva de lo explicado en la sección anterior, puede haber varias condiciones que obliguen a producir un enclavamiento en la VVGS asociada a una tarjeta SVCU en concreto:

- El enclavamiento local producido por la señal proveniente del rack de enclavamientos.
- Otro tipo de enclavamiento, que puede producirse por el enclavamiento de la tarjeta SVCU anterior o posterior.

Todos estos enclavamientos producen varias señales de salida. En todos los casos, cuando se recibe una señal de enclavamiento, se envía una orden de cierre a la VVGS. También se envía una señal al BIC con la petición para desechar el haz que haya en circulación. En el caso de que el enclavamiento se haya producido por la señal LI, sendas señales de enclavamiento se envían a las tarjetas adyacentes (anterior y posterior). Estas tarjetas también proveen un sistema de enclavamiento que depende de la temperatura local que se esté midiendo.

Así pues, como hay varias fuentes de enclavamiento que pueden afectar al estatus del sistema, conllevando a un cierre de la VVGS, se tuvo que medir el retraso temporal que se producía en cada una de estas situaciones. Además, también se midió el retraso en la generación de la señal que realiza la petición de desechar el haz.

Los primeros tests se centraron en los enclavamientos producidos por la activación de una señal LI en una tarjeta SVCU, es decir, la señal proveniente del rack de enclavamientos.

Antes de comenzar los tests, se conectó un simulador de VVGS a la salida a válvula de la tarjeta SVCU en cuestión. Esto era necesario para obtener una retroalimentación del estado de la válvula. Además, para comprobar la señal de petición para desechar el haz, todas las tarjetas del rack debían estar en estado OK. Para ello, se usaron una serie de tarjetas de continuidad (que permiten simular el estado correcto de la VVGS) para simular dicho estado. Además, se conectaron un par de "jumpers" o conectores de puente eléctrico a la entrada CH+ y a la salida CH-, para simular que la señal entrante de los otros racks está en un estado correcto (ver Figura 46).

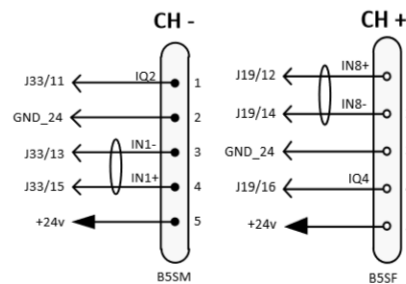


Figura 46. Conexiones CH- y CH+ en el rack SVCUL.

La conexión BIC en el rack de SVCU provee dos pares de pines, siendo 3-4 la señal que confirma la presencia de haz, mientras que 1-2 proporcionan la señal para desechar el haz. Esta última señal cambia de estado cuando alguna de las 8 tarjetas del rack recibe la orden de enclavamiento.

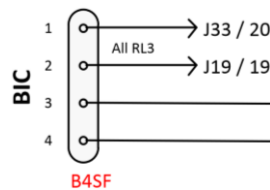


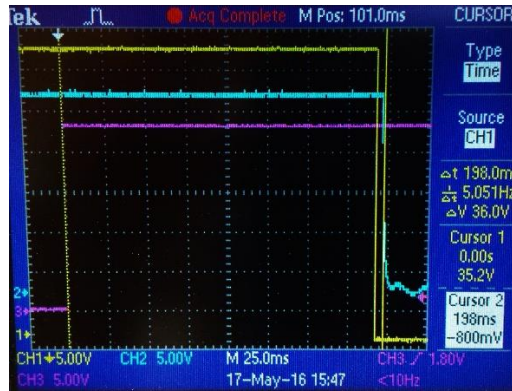
Figura 47. Conexión BIC del rack SVCUL.

La Tabla 15 muestra los retrasos que se generan en las dos señales objetivo (la generada para la orden de cierre de la VVGS y la de petición de desechar el haz), medido este retraso desde que se generó la señal LI en la conexión del rack de enclavamientos.

Tabla 15. Retrasos medios en la orden de cierre de VVGS y de desechado del haz debido a una LI en el rack SVCU del LHC.

Retraso [ms] hasta el cierre de la VVGS debido a una LI	Retraso [ms] hasta desechar el haz debido a una LI
193	198

En la Figura 48, se puede observar un ejemplo de las mediciones obtenidas. La traza magenta representa el interruptor que produce la activación del enclavamiento. La traza cian mide la señal de salida que va al BIC, indicando la petición de desechar el haz. Finalmente, la traza amarilla muestra la caída de tensión en la señal de control de cierre de la válvula de vacío.



**Figura 48. Retraso entre la generación de la LI y el cierre de la VVGS y la petición de desechar el haz.**

La otra serie de mediciones se centró en el retraso de las mismas señales, pero esta vez debido a la recepción de una señal de enclavamiento procedente de la tarjeta siguiente a la que estaba siendo analizada. El control de la señal LI de la otra tarjeta podría haber sido implementada de la misma forma que en las mediciones anteriores. Sin embargo, se pensó en otro método igualmente aceptable. Solo era necesario reemplazar por un interruptor el puente ST1 en la tarjeta de continuidad situada en la posición siguiente a la tarjeta SVCU a analizar. Esto permite inhibir la propagación de la señal que pasa por las 8 tarjetas en el rack, lo que significa que se ha producido una situación de enclavamiento en la tarjeta de continuidad.

**Tabla 16. Retrasos en la orden de cierre de VVGS y de desechado del haz debido a una GI en el rack SVCU del LHC.**

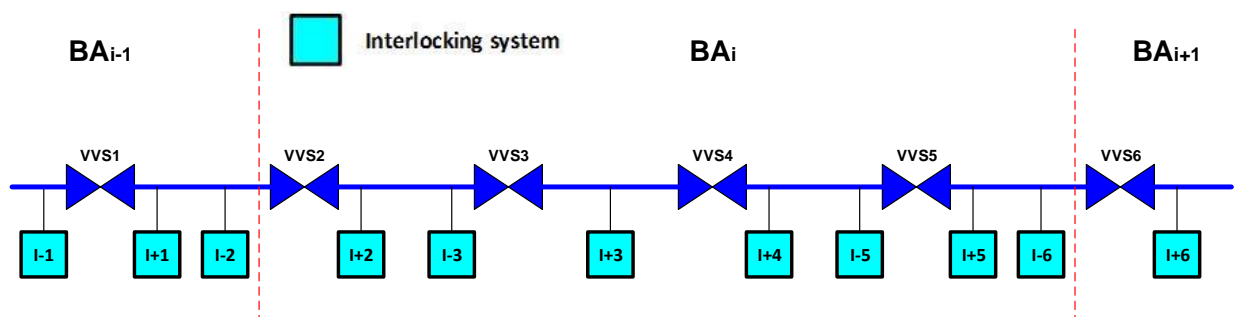
Retraso [ms] hasta el cierre de la VVGS debido a una GI	Retraso [ms] hasta desechar el haz debido a una GI
192	198

Como puede observarse en la Tabla 16, los resultados son prácticamente idénticos a los obtenidos en el test previo, teniendo también una respuesta similar a la de la Figura 48.

#### 4.5.2 SVCU del SPS.

Junto a la señal LI, y de forma similar a la señal de enclavamiento proveniente de una tarjeta SVCU colindante en el caso del rack del LHC, en el Sistema de control de vacío del SPS existe una señal llamada GI. Esta es generada por una tarjeta SVCU que recibe una señal LI y después propaga esta GI a todas las tarjetas SVCU que controlen una VVGS en el mismo sector o BA. Esto produce una situación en la que, si una tarjeta SVCU recibe una señal LI para cerrar su válvula, todas las VVGS del sector o BA también se cerrarán.

La disposición general del sistema de enclavamiento, ejemplificando la distribución en un BA puede verse en la Figura 49. Como se ha explicado en el párrafo anterior, un LI en el BA<sub>i</sub> cerrará todas las VVGS presentes en el mismo BA. Sin embargo, las VVGS en BA<sub>i-1</sub> y BA<sub>i+1</sub> no se cerrarán.



**Figura 49. Diagrama de la distribución de los sistemas de enclavamiento del SPS.**

Como puede verse en la Figura 50, las tarjetas SVCU tienen varias señales de enclavamiento.

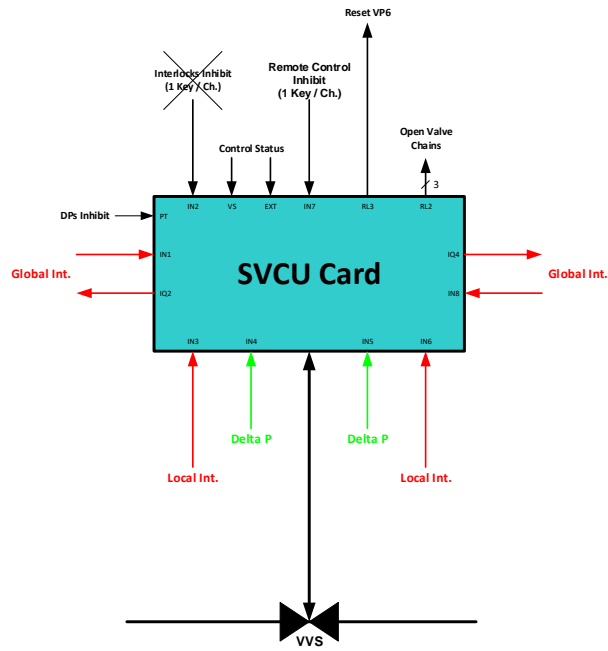


Figura 50. Diagrama general de una tarjeta SVCU usada en el SPS.

De nuevo, como hay diversas fuentes de enclavamiento que pueden afectar al estatus del sistema cerrando la VVGS, se tuvo que medir el retraso temporal producido por cada caso.

Como puede verse en la Figura 51, la diferencia de este sistema es que la VVGS está conectada directamente al rack de enclavamiento, y no está comandada por el rack de SVCU.

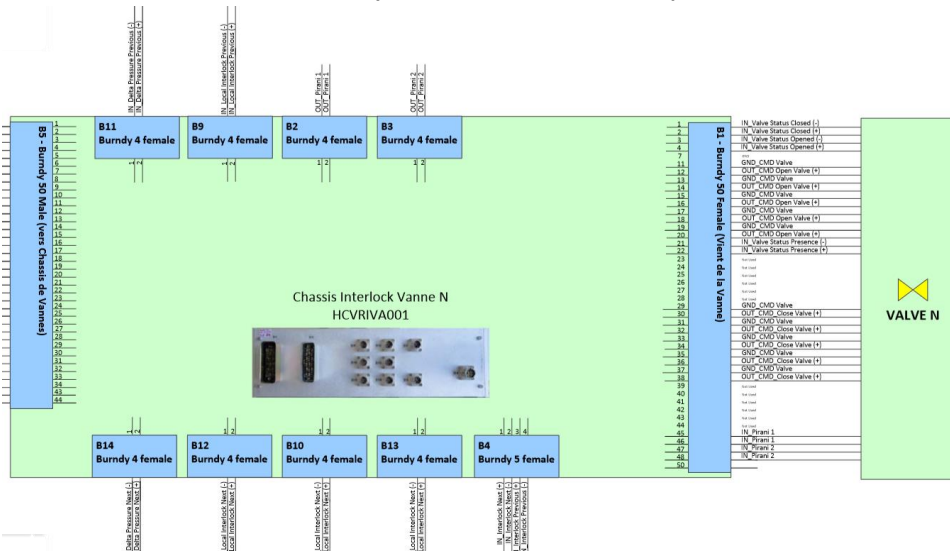


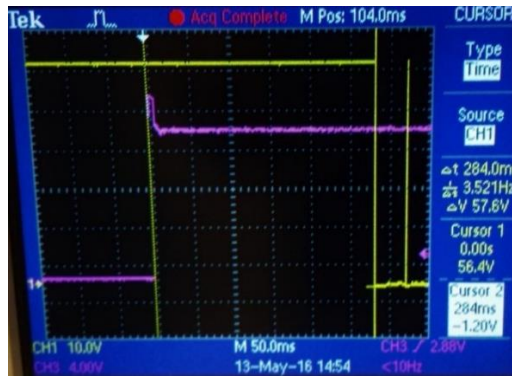
Figura 51. Diagrama de conexionado entre el rack de enclavamientos del SPS y la VVGS.

Para los siguientes tests, se realizó un cortocircuito entre los pines de la señal "IN\_Valve Status Presence" para simular la presencia de la VVGS.

Los primeros tests estuvieron relacionados con los enclavamientos generados debido a la activación de la señal LI en una tarjeta SVCU, midiendo el retraso hasta la activación de la señal de cierre de la VVGS. Los resultados se muestran en la Tabla 17 y un ejemplo puede verse en la Figura 52.

Tabla 17. Retraso de la orden de cierre de la VVGS debido a una LI en el rack SVCU del SPS.

Retraso [ms] hasta el cierre de la VVGS debido a una LI
284



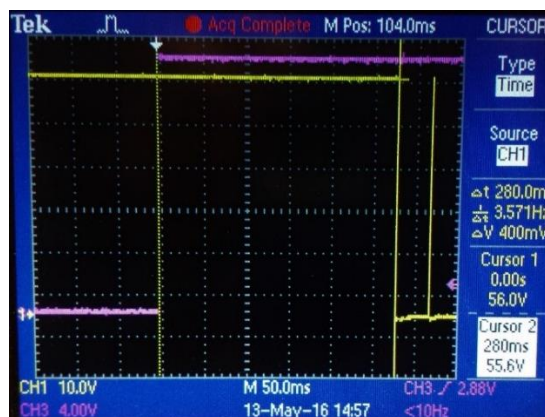
**Figura 52. Retraso entre la generación de la LI y la orden de cierre de la VVGS.**

La otra serie de mediciones se dedicaron a medir el retraso entre la señal GI y la señal de cierre de la VVGS. Esta vez, para tener el control de la LI en otra tarjeta habría sido necesario otro rack de enclavamientos (y los conectores necesarios). Por lo tanto, se usó el mismo método que el usado en las segundas mediciones del rack de SVCU del LHC. Sin embargo, esta vez fue necesario conectar el simulador completo de la válvula al conector B1 del rack de enclavamiento. Esto es debido a que antes de la conexión del simulador, el sistema no proporcionaba ningún tipo de cambio en la señal de cierre de la válvula. La explicación es que, para este tipo de enclavamiento, es no solo necesario saber de la presencia de la válvula, sino que también hay que saber el estado abierto o cerrado de la válvula.

El retraso temporal obtenido en las mediciones se muestra en la Tabla 18 y en la Figura 53.

**Tabla 18. Retraso de la orden de cierre de la VVGS debido a una GI en el rack SVCU del SPS.**

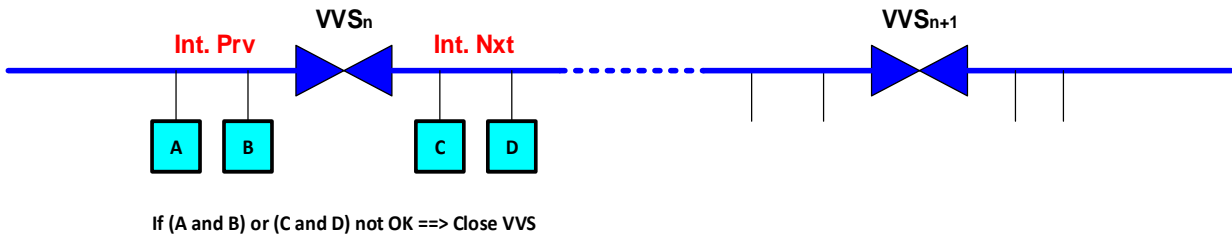
Retraso [ms] hasta el cierre de la VVGS debido a una GI
276



**Figura 53. Retraso entre la generación de la LI en la tarjeta SVCU+1 (posterior a la tarjeta en análisis y que genera una GI) y la orden de cierre de la VVGS.**

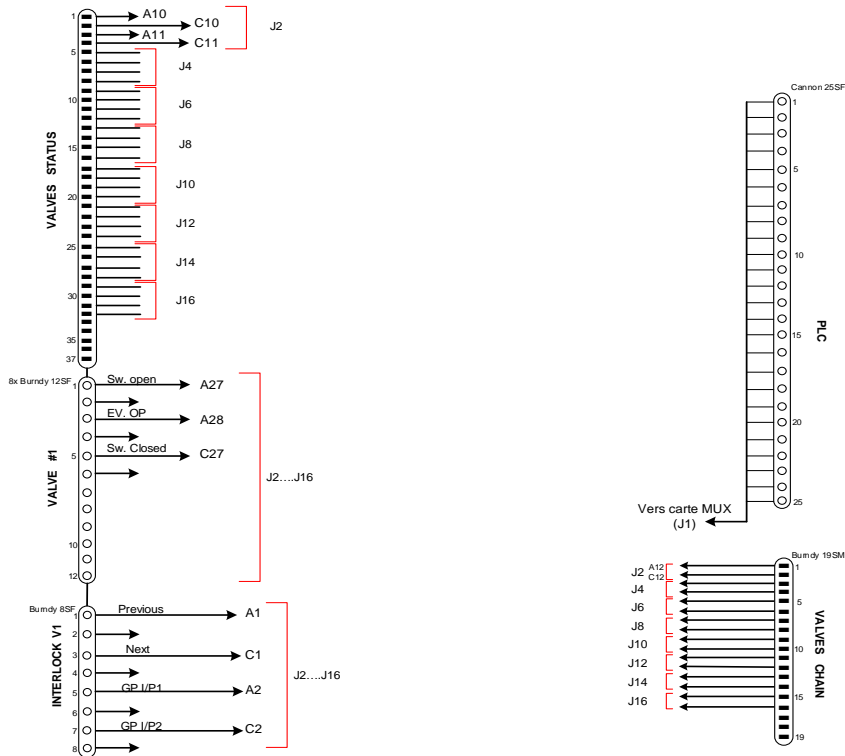
### 4.5.3 SVCU del CPS.

Comparado con los otros sistemas de control ya explicados, el implementado en el CPS es mucho más simple. Para la generación de la señal LI y por lo tanto la orden de cierre de la VVGS es suficiente con que haya una señal de enclavamiento proveniente ya sea del rack de enclavamiento anterior o posterior a la VVGS. Para que la orden de cierre se desactive, los enclavamientos en ambos lados deben de estar correctos, pudiendo reabrir la VVGS.



**Figura 54. Diagrama de la distribución de los sistemas de enclavamiento del CPS.**

Por lo tanto, solo hay que realizar una serie de mediciones para caracterizar el retraso temporal, siendo estas mediciones iguales a las primeras realizadas para el rack de SVCU del LHC (concerniendo a las señales LI provenientes del rack de enclavamientos). Para las mediciones, se siguió el mismo procedimiento que para el rack del LHC. Como se explicó antes, para producir un enclavamiento es suficiente con que se active una de las LI, por lo que para poder llevar a cabo los tests, la otra señal deberá permanecer siempre en un estado correcto (OK). Para ello, se realizó un cortocircuito entre los pines 1 y 2 en la conexión de entrada del enclavamiento de la VVGS, correspondiendo a la señal "Previous LI". El enclavamiento LI se produjo mediante la señal "Next LI" entre los pines 3 y 4 (ver Figura 55).



**Figura 55. Conexiones de salida del rack SVCU del CPS.**

Las mediciones obtenidas pueden verse en la Tabla 19. La Figura 56 presenta los resultados de uno de los tests realizados.

**Tabla 19. Retraso de la orden de cierre de la VVGS debido a una LI en el rack SVCU del CPS.**

Retraso [ms] hasta el cierre de la VVGS debido a una LI
196

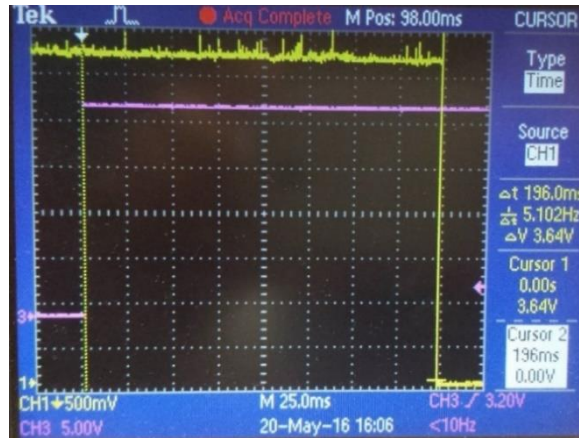


Figura 56. Retraso entre la generación de la LI y la orden de cierre de la VVGS.

#### 4.6 CONCLUSIÓN DE LAS MEDICIONES.

Tras la caracterización de todos los sistemas en la cadena de enclavamientos de todos los aceleradores de partículas en estudio, puede realizarse un cálculo del retraso total en la señal de enclavamiento. Los resultados finales pueden observarse en la Tabla 20, al igual que gráficamente en la Figura 57. Para estos cálculos se tuvieron que considerar las configuraciones que se acercaran más a la realidad del sistema. En general, el proceso de cierre en muchas de las válvulas empleadas en el CERN tiene una dinámica relativamente lenta (varios segundos), por lo que los resultados obtenidos están dentro de lo esperado.

Para el LHC, la configuración de filtros usada en los controladores TPG 300 es normalmente la "media". Además, el umbral de presión está normalmente establecido en el rango de los  $10^{-6}$  mbar, con algunas pocas excepciones en  $10^{-5}$  mbar. Como se explicó en la sección 4.1, la lógica de los enclavamientos para la generación de la orden de cierre de la VVGS depende tanto de los controladores TPG 300 como de las fuentes de alimentación de las VPIs. Por lo tanto, el retraso generado vendrá dado por el sistema más lento, que en este caso es el controlador TPG 300.

Para el caso del SPS, la lógica de enclavamientos depende básicamente del controlador de VPIs. Por lo tanto, tuvo que calcularse la media del retraso total obtenido en las fuentes de alimentación de diodo y de triodo usadas para las VPIs, con un umbral de tensión de 120mV y teniendo en cuenta únicamente el retraso producido por 3 señales escalón de corriente (las tres de diferente amplitud y con menor offset posible).

Para el caso del CPS, la lógica de enclavamiento también depende únicamente de los controladores de VPIs. Por lo tanto, solo se tuvo en consideración para el cálculo del retraso medio las 2 señales escalón de diferente amplitud y con menor offset posible.

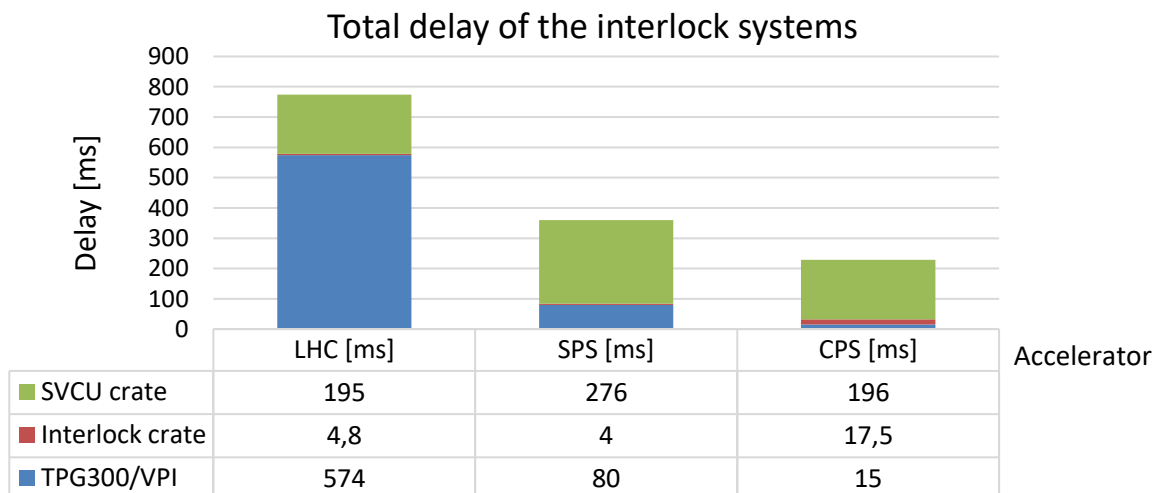


Figura 57. Retraso total generado por todas las tarjetas, racks y controladores en la cadena de enclavamientos, dependiendo de la máquina o acelerador en los que dichos sistemas son usados.

**Tabla 20. Retraso total [ms] en la cadena de enclavamientos de los tres aceleradores.**

Acelerador	Retraso total [ms]
LHC	<b>773.8</b>
SPS	<b>360</b>
CPS	<b>227.5</b>

Con esta caracterización temporal fue posible determinar la latencia de las señales en la cadena de enclavamientos y por lo tanto se pudo definir la característica de la respuesta que se da en la señal de cierre de la válvula desde que se produce un aumento de presión en el sistema. Este cierre, que tiene una dinámica relativamente lenta (varios segundos), evita que las perturbaciones y el aumento de presión se propaguen a otros sectores colindantes, con el objetivo de proteger lo más posible el resto del sistema.

Con todo esto, se puede observar que los controladores que conforman las tarjetas aportan un retraso considerable a la consecución de la generación del enclavamiento del sistema. Por ello, se puede plantear la posibilidad de sustituir estos sistemas electrónicos por sistemas PLCs. Estos podrían encargarse de recibir las señales de enclavamiento provenientes de los controladores de los sensores Penning y bombas VPI y procesar la lógica de enclavamiento.

Así, se pudo definir un límite superior de referencia que el nuevo sistema planteado no debería superar para que se pueda considerar realmente una mejora en el sistema de control. El retraso que generan los racks SVCU es de algo más de 200 ms, por lo que al usar una solución PLC, el nuevo sistema planteado no debería presentar un retraso mayor al que existe actualmente.

## **5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE CONTROL BASADO EN PLC.**

En esta parte del proyecto se definirá el proceso de diseño y desarrollo de un nuevo prototipo para el control de las VVGS (válvulas sectoriales de vacío) en el CPS, SPS y LHC. Con este nuevo sistema se pretende sustituir los distintos racks SVCU y de enclavamientos actualmente en uso para conseguir usar un único diseño del sistema de control de válvulas de vacío para todos los aceleradores.

### **5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL.**

En apartados anteriores ya se ha descrito de forma detallada la configuración y comportamiento actual del sistema de control de las válvulas de vacío. De los resultados obtenidos en las mediciones de los apartados anteriores, se puede proponer el desarrollo de un nuevo sistema que permita tener una arquitectura y diseño hardware común para todos los aceleradores. Obviamente, el nuevo sistema no deberá introducir más retraso que el sistema actual para que se pueda justificar su utilización.

La solución elegida usará sistemas de PLCs, que permitirán potencialmente la posibilidad de la unificación hardware, reemplazando a los racks SVCU y de enclavamientos, y una potencia cómputo mayor para las aplicaciones lógicas básicas a las que se destinarán.

### **5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.**

Como se ha comentado, el propósito de este nuevo sistema es variado. Primeramente, el uso de la tecnología PLC ofrece la posibilidad de construir una arquitectura de control común para todos los aceleradores. Esto puede lograrse sustituyendo los racks actuales por un PLC dedicado que procese toda la lógica asociada. Además, este nuevo sistema está enfocado para ser una solución más modular, flexible y fiable que la usada en los racks actuales (que incluso usan algunos componentes obsoletos).

El desarrollo de este nuevo sistema se centrará únicamente en el control de las VVGS, sin incluir las posibles señales de alarma que usan otros sistemas integrados. Estas señales de alarmas podrían introducirse cuando el bus de campo PROFINET se implemente en la arquitectura propuesta.

Para la implementación hardware, es necesaria una conexión desde las VVGS y relés de salida de los controladores de vacío al sistema PLC. Esta configuración se implementará usando un sistema de control PLC basado en la estación E/S remotas (Remote I/O) SIMATIC ET200SP de SIEMENS, que incluye capacidades de procesamiento gracias a una CPU interna. Varios racks de interfaz serán necesarios para aumentar la densidad de conexión, reduciendo así el número de sistemas PLCs necesarios. Esta interfaz se logrará gracias a unos circuitos electrónicos básicos con sistemas optoacopladores, que servirán como aislamiento galvánico de las señales y además permitirán dar indicaciones visuales con LEDs del estado de las VVGS y los controladores de vacío.

Con respecto a la implementación software, el código desarrollado se basará en las CPUs S7-1500, usando el software "Totally Integrated Automation (TIA) Portal". El lenguaje de programación utilizado será el lenguaje de alto nivel SCL, haciendo la estructuración y depuración del código más cómodo. Esta filosofía de programación debería además permitir latencias o retrasos muy pequeños, permaneciendo por debajo del umbral definido en las mediciones presentadas en los apartados anteriores para los racks SVCU y de enclavamientos.

Los distintos racks de PLCs usados en cada sector se conectarán mediante el bus de campo PROFINET, formando potencialmente una arquitectura en anillo con el actual PLC Maestro que existe en cada uno de los sectores, permitiendo así el uso del protocolo MRP (Media Redundancy Protocol).

Por último, se pretende que cada estación remota (ET 200SP permita una conexión a una pantalla táctil HMI para permitir el control manual in-situ de las válvulas cuando haya intervención, permitiendo además tener una visión global del estado de cada controlador y válvula de vacío.

### 5.3 ARQUITECTURA HARDWARE.

#### 5.3.1 Cadena de enclavamientos.

La implementación propuesta implica la conexión de las salidas de los controladores de vacío al sistema PLC. Esta conexión se logrará mediante unos racks de interfaz ("Interface crates") que permitan el aislamiento galvánico de cada señal que se gestione. También se ha mencionado ya en el apartado anterior que este sistema estará basado en el sistema de periferia descentralizada SIMATIC ET 200SP, con CPU integrada, que permitirá el procesamiento de las señales y la gestión de la lógica de control. Un diagrama de la arquitectura propuesta puede verse en la Figura 58.

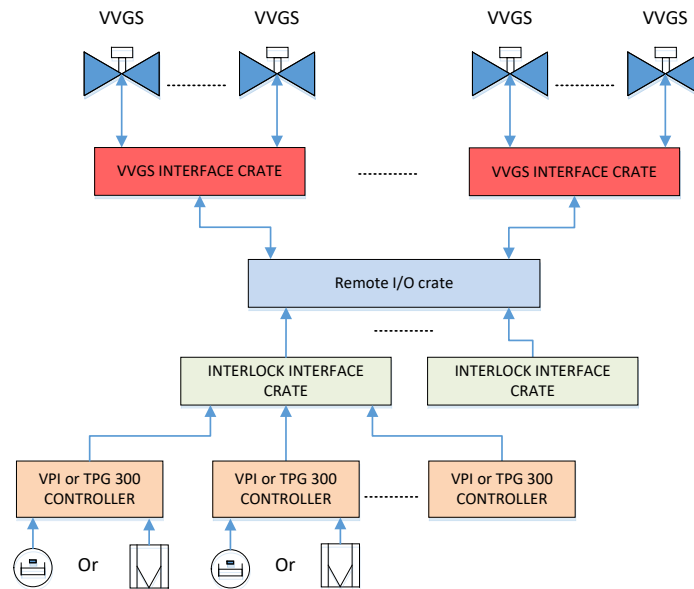


Figura 58. Diagrama del diseño propuesto para el nuevo sistema de control de las válvulas de vacío.

#### 5.3.2 Implementación completa.

El sistema descrito hasta ahora se centra en la implementación local del sistema de control de la cadena de enclavamientos. Este sistema también ha de ser integrado en un sistema de control más general. En la Figura 7 del apartado 1.2 puede observarse el sistema implementado actualmente, que incluye conexiones directas con señales de entrada y salida digitales de los racks SVCU a un Maestro PLC SIMATIC S7-400. Este Maestro tiene varias funciones principales: comunicación entre distintas cadenas de enclavamientos, adquisición de los estados del sistema, procesamiento de capas más altas de enclavamientos, comunicación remota gracias a la Red Técnica, interfaz del estado y control remoto de la aplicación SCADA, etc.

Para conseguir un sistema similar, se ha propuesto la implementación presentada en la Figura 59. Así, tendremos una conexión de los distintos racks de PLCs y el Maestro PLC mediante el bus de campo PROFINET. La arquitectura en anillo que se propone podría además permitir el uso de tecnologías como el protocolo MRP (Media Redundancy Protocol) o la funcionalidad Shared Device. El protocolo MRP hace posible que el sistema lidie con posibles fallos de comunicaciones. La funcionalidad Shared Device permite el acceso a uno de los dispositivos de periferia descentralizada desde dos controladores distintos únicamente con el interfaz PROFINET.

Además, un panel HMI podría ser implementado localmente para cada rack PLC para permitir el control local en caso de intervención o mantenimiento.

Por último, cada rack de periferia tendrá una conexión directa con entradas y salidas digitales al rack del sector previo y siguiente, para permitir una transmisión directa de la señal de enclavamiento a otros sectores. También tendrá cuatro conexiones para el sistema de control BIC (se explicará más adelante).

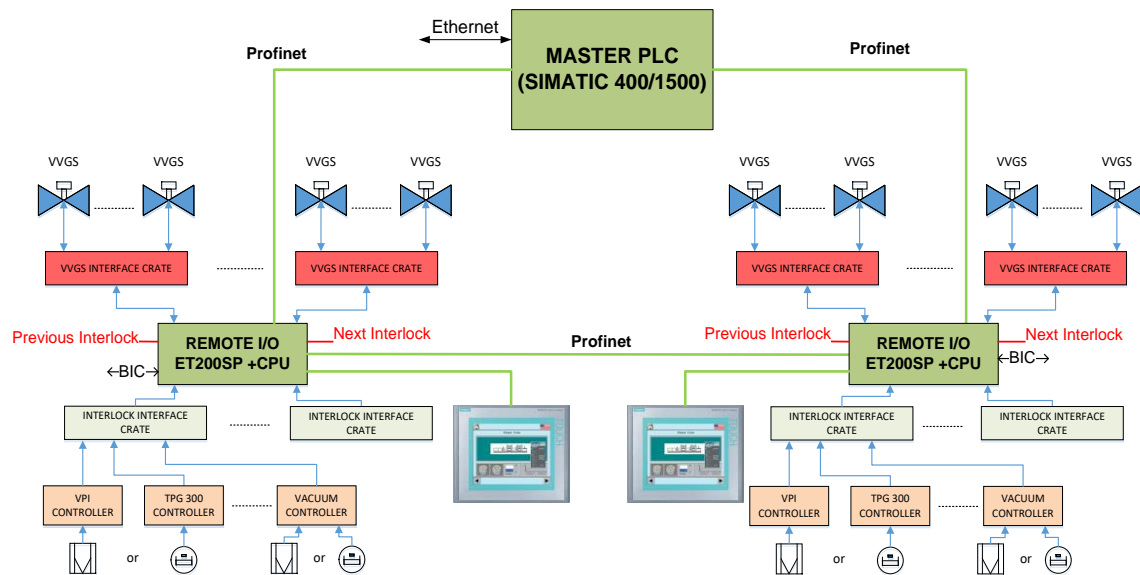


Figura 59. Arquitectura propuesta para el nuevo sistema de control de VVGS.

## 5.4 INTERFACES DEL SISTEMA, DEPENDENCIAS Y COMPORTAMIENTO.

### 5.4.1 Interfaces por sector.

El Sistema de control de VVGS en cada acelerador tiene una implementación y lógica diferente, así como una distinta disposición y uso de pines en los conectores de VVGS. Por lo tanto, el número de señales en el sistema de control de cada acelerador es diferente. Durante la etapa de desarrollo del primer prototipo no se unificaron las diferencias que hay entre los distintos aceleradores, por lo que las estimaciones son únicas y diferentes para cada acelerador. En la segunda versión del prototipo, que será explicado en secciones siguientes, el diseño (y, por lo tanto, el número de señales) se unificó para los tres aceleradores.

#### 5.4.1.1 CPS.

Para las estimaciones, se consideró **un máximo de 34 VVGS por sector** con la configuración actual (2DI + 1DO por cada VVGS).

- **Módulos DI/DO:** Un mínimo de 9 módulos DI + 3 DO (16 señales/modulo) por sector para la generación de enclavamientos (conexión para los controladores) y el control de VVGS.
- **PCB para el control de VVGS** para proporcionar una conversión de 24 a 48V, con aislamiento mediante optoacopladores y LEDs indicativos del estado de la VVGS.
- **PCB para las fuentes de enclavamiento (controladores de vacío)** para proporcionar aislamiento mediante optoacopladores y LEDs indicativos del estado del controlador.
- **Interfaz PROFINET:** para comunicación entre los racks de PLC y el Master PLC.

#### 5.4.1.2 SPS.

Para las estimaciones, se consideró **un máximo de 20 VVGS por sector** con la configuración actual (3DI + 2DO por cada VVGS).

- **Módulos DI/DO:** Un mínimo de 16 módulos DI + 4 DO (16 señales/modulo) por sector para la generación de enclavamientos (conexión para los controladores) y el control de VVGS. Considerando restricciones de espacio, esto resulta en 2 racks de 8 módulos DI + 2 DO cada uno.
- **PCB para el control de VVGS** para proporcionar una conversión de 24 a 48V, con aislamiento mediante optoacopladores y LEDs indicativos del estado de la VVGS.

- **PCB para las fuentes de enclavamiento (controladores de vacío)** para proporcionar aislamiento mediante optoacopladores y LEDs indicativos del estado del controlador.
- **Interfaz PROFINET:** para comunicación entre los racks de PLC y el Master PLC.

**5.4.1.3 LHC.**

Para las estimaciones, se consideró **un máximo de 38 VVGS por sector** con la configuración actual (3DI + 2DO por cada VVGS).

- **Módulos DI/DO:** Un mínimo de 20 módulos DI + 4 DO (16 señales/modulo) por sector para la generación de enclavamientos (conexión para los controladores) y el control de VVGS. Considerando restricciones de espacio, esto resulta en 2 racks de 10 módulos DI + 2 DO cada uno.
- **PCB para el control de VVGS** para proporcionar una conversión de 24 a 48V, con aislamiento mediante optoacopladores y LEDs indicativos del estado de la VVGS.
- **PCB para las fuentes de enclavamiento (controladores de vacío)** para proporcionar aislamiento mediante optoacopladores y LEDs indicativos del estado del controlador.
- **Interfaz PROFINET:** para comunicación entre los racks de PLC y el Master PLC.

**5.4.2 Dependencias.**

El sistema PLC a desarrollar también deberá tener conexión con el controlador BIC. Esta conexión se consigue mediante unos sistemas ya existentes. El rack VR\_BIC genera señales redundantes provenientes del rack SVCU (o el nuevo rack PLC) correspondientes a las señales de permiso de usuario, que se conectan con el siguiente rack, el CIBU, antes del sistema BIC. Normalmente, la conexión al rack VR\_BIC concierne una señal que informa de si hay presencia de haz en el acelerador, y otra señal asociada a las órdenes para desechar el haz que esté circulando. Un diagrama de dichas conexiones puede verse en la Figura 60.

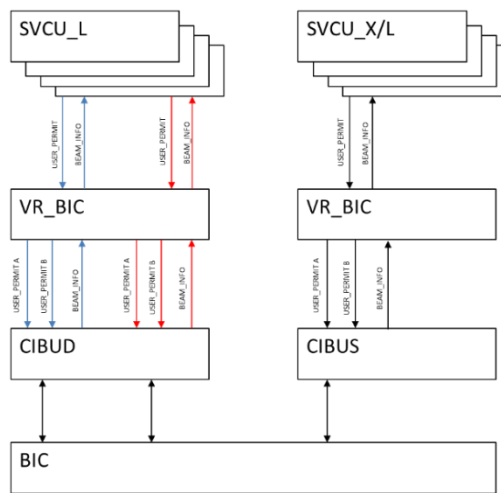


Figura 60. Interfaz al sistema BIC en LHC/LINAC 4/AWAKE.

**5.4.3 Comportamiento de enclavamientos.**

**5.4.3.1 CPS.**

Para la generación de la señal de control LI y, por lo tanto, la activación de la señal de cierre de la válvula, es suficiente tener una señal de enclavamiento proveniente de dos controladores adyacentes de los cuatro que se consideran a un lado y a otro de la VVGS. Para que el comando de cierre se desactive, la lógica de salida ha de volver a cambiar al estado neutral que se tiene con todos los controladores en estado correcto.

La lógica de enclavamiento es la siguiente:

$$VVGS\ VAC\_OK = ((A\ AND\ B)\ OR\ (C\ AND\ D))\ OR\ ((E\ AND\ F)\ OR\ (G\ AND\ H)) \quad [1]$$

Por lo tanto, la única señal presente en el sistema es:

- **LI provenientes de los controladores anteriores o posteriores a la VVGS.**

#### 5.4.3.2 SPS.

En este sistema se puede producir la situación de cierre de la VVGS de varias formas:

- El enclavamiento local producido por el estado erróneo de los controladores (pueden ser los 3 controladores después de la VVGS en cuestión o los 3 controladores previos a la siguiente VVGS).
- El enclavamiento o cierre de válvulas anteriores o posteriores del mismo BA (señal GI).

Todas estas posibilidades producen varios resultados. En todos los casos, cuando se recibe una señal de enclavamiento, se produce el cierre de la VVGS. Además, se produce la propagación del enclavamiento (GI en el sistema anterior) que cerrará todas las válvulas del octante. En este sistema, también hay dos señales provenientes de los controladores de los sensores de vacío que impiden la apertura de la VVGS si ambos controladores se encuentran en un mal estado.

La lógica de enclavamiento es la siguiente:

$$VVGS\ VAC\_OK = (A\ OR\ B\ OR\ C)\ AND\ (F\ OR\ G\ OR\ H) \quad [2]$$

$$Open\ Enable = D\ AND\ E \quad [3]$$

Por lo tanto, las señales presentes en este sistema son:

- **GI de VVGS anteriores o posteriores.**
- **LI de los controladores posteriores a la válvula de vacío.**
- **LI de los controladores anteriores a la siguiente válvula de vacío.**
- **Señal "Delta de presión" de los controladores previos a la válvula.**
- **Señal "Delta de presión" de los controladores posteriores a la válvula.**

#### 5.4.3.3 LHC.

Hay diferentes condiciones que pueden producir la situación de cierre de la VVGS:

- El enclavamiento local producido por el resultado de la lógica de enclavamiento (lógica N-1 o 3oo4).
- La situación de enclavamiento de la válvula anterior o posterior.

Todas estas situaciones producen varios resultados. En todos los casos, cuando se da una situación de enclavamiento, se envía un comando de cierre a la VVGS. También se envía una señal al sistema de interfaz del BIC para la orden de desechar el haz de partículas. Si además este enclavamiento es local, señales de enclavamiento global (GI) se envían a las válvulas adyacentes (anterior y posterior) para su cierre.

Además, la lógica de cierre y apertura también depende de la temperatura local medida con termopares. El comportamiento asociado es como sigue: si la válvula está abierta y este enclavamiento producido por la temperatura está en un estado erróneo, la válvula permanecerá abierta y se cerrará dependiendo de la lógica de enclavamiento. Sin embargo, si la válvula está cerrada, ésta no se podrá volver a abrir hasta que la señal asociada a la temperatura pase a un estado correcto

También hay otras señales que condicionan el comportamiento del sistema:

- **Open Enable (OE):** Si la válvula está cerrada, ésta no se puede reabrir hasta que no haya ninguna fuente de enclavamiento activa (es decir, hasta que todos los 4 controladores asociados a la lógica de la válvula estén en estado correcto).

- **Close Enable (CE):** Si no hay presencia de haz, el sistema debe permitir el cierre de válvulas.

La lógica de enclavamiento es la siguiente:

*Redundancia tres sobre cuatro (3 out of 4)*

[4]

Por lo tanto, las señales presentes en este sistema son:

- **Enclavamientos de las válvulas adyacentes.**
- **LI de los controladores previos y posteriores a la válvula**
- **Enclavamiento asociado a la temperatura local medida mediante termopares.**
- **Open Enable.**
- **Close Enable proveniente del rack BIC.**
- **Petición hacia el rack BIC para desechar el haz de partículas.**

#### **5.4.4 Comportamiento de las VVGS.**

Para el sistema explicado, se diseñará e implementará un PCB en cada rack de interfaz con las VVGS para proporcionar un aislamiento eléctrico entre la señal procedente de los módulos DI/DO del rack PLC y la VVGS correspondiente. Además, este rack tendrá la opción de mostrar el estado de cada VVGS a través de algunos LED.

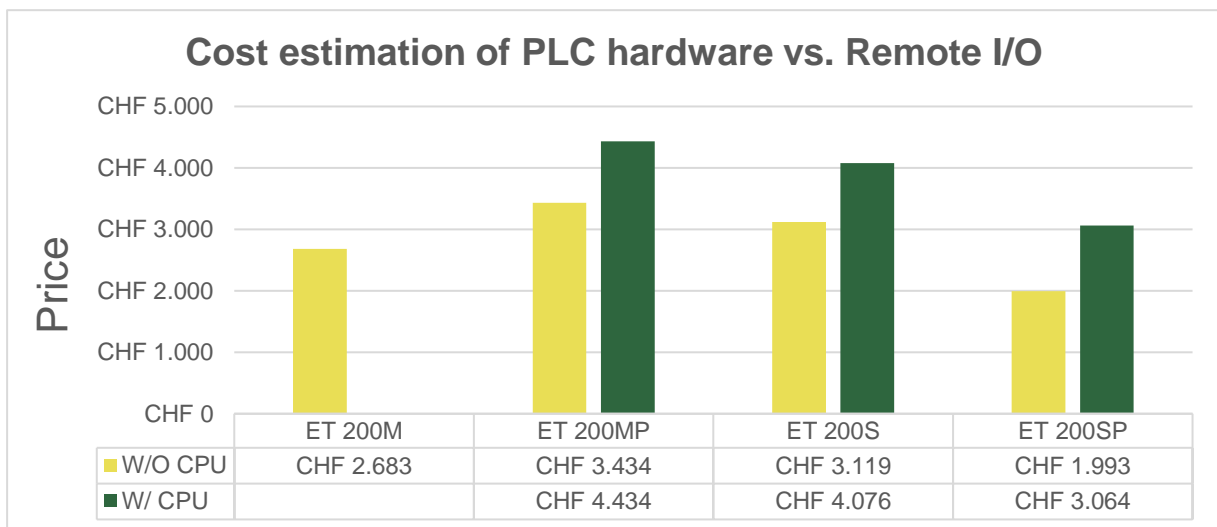
Hay muchos solenoides diferentes en uso para cada acelerador, por lo que para la caracterización se ha elegido el estándar, con las siguientes especificaciones eléctricas: 48V, 14W. Por lo tanto, el sistema diseñado en la PCB debe ser capaz de proporcionar una corriente nominal de 0,3A por VVGS aproximadamente. Las VVGS utilizadas en el LHC y CPS por lo general tienen un requisito de entrada monoestable, mientras que las VVGS en el SPS a menudo son de naturaleza bi-estable. En los solenoides monoestables estándar de 2 vías, el operador de reposición de dicha válvula es inestable, por lo que se necesita un suministro eléctrico continuo para mantener el estado de la válvula cambiado. La válvula se restablece automáticamente tan pronto como se elimina el voltaje. En las válvulas biestables sólo se necesita un breve impulso de potencia eléctrica para cambiar el estado de abierto a cerrado, y se necesita otro impulso para cambiar el estado de nuevo.

## 6. DESARROLLO HARDWARE.

Durante el apartado anterior se ha mostrado el proceso de análisis del sistema actual, para ver los requerimientos a nivel hardware (número de señales DI/DO requeridas). También se ha definido la arquitectura hardware propuesta, así como los comportamientos que deberán tener los elementos del nuevo sistema. Así pues, al tener definidas características básicas del sistema, fue posible pasar al diseño de una primera versión del prototipo.

### 6.1 RACK DE PLC.

El primer paso fue decidir cómo se diseñaría la parte principal del sistema. Se tomaron diferentes consideraciones sobre cómo implementar un sistema que pudiera procesar toda la lógica de enclavamiento y actuar sobre el cierre y la apertura de la VVGS. Concretamente, se tuvieron en cuenta diferentes opciones relacionadas con los PLCs de SIEMENS. La decisión de centrarse sólo en los productos SIEMENS se tomó debido a que, principalmente con los PLC maestros SIEMENS S7-400, son los sistemas actuales en uso en el sistema de control de vacío. Dado que el objetivo principal era leer el estado de las entradas digitales y actuar en salidas digitales, se consideró que la familia de E/S remotas de SIEMENS era la mejor opción. Dentro de la familia de periferia descentralizada, SIEMENS ofrece 4 opciones distintas: ET200M, ET200MP, ET200S, ET200SP. Con el fin de elegir la solución óptima, se tuvieron en cuenta varios aspectos: la estimación de costes del hardware necesario (se puede ver en la Figura 61), el tamaño del rack necesario, el número de módulos y el número total de entradas y salidas digitales necesarias y disponibles, el método de conexión del cableado, el tiempo de vida estimado en el mercado del producto (mayor cuanto más reciente, más expansión y mayor uso), las capacidades de la CPU, las posibilidades de conexionado de buses de campo, etc.



**Figura 61. Estimación del coste de los componentes hardware por cada rack de PLC.**

Con todas estas consideraciones, se consideró al sistema ET200SP como la mejor solución.

En general, el uso de PLCs tiene algunas ventajas añadidas en contraste con la tecnología actual en uso. Con los PLCs, nos beneficiamos de la modularidad hardware y flexibilidad de software que ofrecen (en caso de que se implementen nuevos controladores, si se desea modificar el diseño o la lógica de control, etc.). Con esta solución, también podemos controlar el estado de cada controlador de vacío y VVGS, cosa que no se tiene en el sistema actual.

El primer prototipo del rack de PLC es un rack de 3U Europa (estándar Eurocard) con el sistema de periferia remota ET200SP (6ES7512-1DK01-0AB0), que incluye funcionalidades de CPU y memoria de trabajo para programa y datos. También ofrece hasta 3 conexiones para PROFINET con un switch de puerto y un servidor web integrado. Con la interfaz usada de adaptador de bus Fast Connect (FC) para PROFINET, la protección contra EMC y cargas mecánicas se incrementa hasta 5 veces en comparación con la interfaz normal RJ45. El sistema completo tiene 10 módulos

DI + 2 DO (considerando el número máximo indicado en la Sección 7.3.3) para conectar las entradas de los controladores de vacío y el VVGS y para las señales de cierre y apertura de las VVGS. Estos módulos DI o DO están conectados a las BaseUnits (BU) correspondientes del sistema PLC. La primera de las BU del sistema de periferia distribuida tiene la característica de que abre un grupo de potencial, permitiendo la alimentación de la tensión suministrada (24V) a todos los módulos del mismo grupo de potencial. La capacidad de carga de corriente máxima que ésta BU puede proporcionar para todo el grupo potencial es de 10 A. El resto de las BU, conectadas a la derecha, sirven como conductoras del grupo potencial. Todas las BU ofrecen una capacidad máxima de carga de corriente de 2A por terminal de proceso (del conector 1 al 16).

En el prototipo alfa, tendremos un consumo aproximado de corriente de 0,3 A por terminal de proceso y un consumo máximo de corriente total de 3,5 A.

Por lo tanto, para la alimentación de esta estación de E/S remotas, el rack tiene una fuente de alimentación de 24 VCC con una corriente nominal máxima de 7,5A (véase Anexo).



Figura 62. Rack de PLC.

El coste estimado para la producción y ensamblado completo de este rack puede verse en la Tabla 21.

Tabla 21. Estimaciones de coste del rack de PLC.

Chasis y cableado	€ 888
Fuente de alimentación	€ 115
Hardware de PLC	€ 1455
<b>Total hardware</b>	<b>€ 2458</b>
<b>Total mano de obra</b>	<b>€ 1280</b>
<b>Coste total</b>	<b>€ 3738</b>

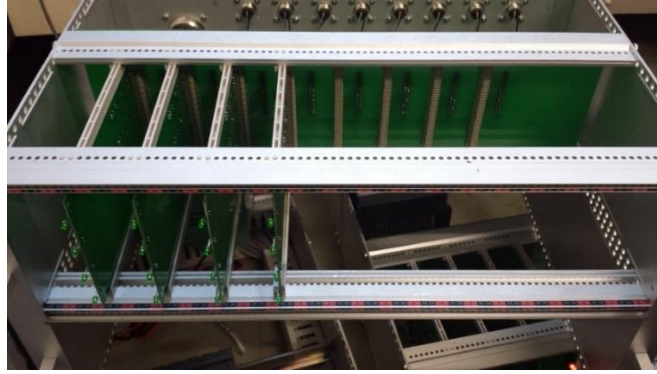
## 6.2 INTERFAZ DE ENCLAVAMIENTOS.

### 6.2.1 Rack de interfaz de enclavamientos.

Se trata de un rack Europa de 6U cuyo objetivo es ofrecer un aislamiento galvánico básico entre las señales provenientes de los controladores de vacío y las entradas al rack PLC. También permiten comprobar visualmente el estado individual de todos los controladores de vacío conectados al rack a través de LEDs en la parte delantera del rack. Con este rack podemos conectar hasta 32 controladores de vacío. En total, podemos tener hasta 8 tarjetas PCB. Cada tarjeta proporcionará aislamiento galvánico y estado visual de 4 controladores de vacío.

Además, este rack tiene una fuente alimentación de 24 VDC – 2A, para alimentar todos los relés de contacto seco de los controladores de vacío

En este rack, la parte de arriba se deja para el conexionado de las tarjetas PCB a la PCB trasera. En la parte de abajo se sitúa la fuente de alimentación de 24 VDC (Figura 63).



**Figura 63. Rack de interfaz de enclavamientos.**

El coste estimado para la producción y ensamblado completo de este rack puede verse en la Tabla 22.

**Tabla 22. Estimaciones de coste del rack de interfaz de enclavamientos.**

Chasis y cableado	€ 962.2
Fuente de alimentación	€ 177.5
Materiales extra para el rack	€ 253.3
Tarjetas PCB	€ 397.8
<b>Total hardware</b>	<b>€ 1791</b>
<b>Total mano de obra</b>	<b>€ 1280</b>
<b>Coste total</b>	<b>€ 3071</b>

### 6.2.2 Backplane del rack de interfaz de enclavamientos.

Esta PCB se ha ideado para tener un diseño común para los dos racks de interfaz (enclavamientos y VVGS). Cuenta con una conexión directa desde los controladores de vacío a la PCB a través de varios conectores de cable a placa y de montaje con taladros. Esta PCB permite la conexión de hasta 8 tarjetas de enclavamiento. En esta PCB, se conectan dos fuentes de alimentación diferentes, una de las cuales proviene de la fuente de alimentación de 24 VDC del rack de PLC y otra de una fuente de alimentación local de 24 VDC dentro del rack de enclavamientos.

### 6.2.3 Tarjetas PCB del rack de interfaz de enclavamientos.

El propósito de estas tarjetas es proporcionar aislamiento galvánico a las señales de los relés de contacto seco de los controladores de vacío y las fuentes de alimentación de la bomba de iones. También ofrecen una fuente visual para comprobar individualmente su estado a través de un LED. Estas PCBs tienen un circuito simple de optoacoplamiento y LED verde ON-OFF por controlador de vacío, con un total de 4 controladores por tarjeta. Cuando el LED está encendido, indica que el contacto seco en el controlador está cerrado, permitiendo así el retorno de los 24 V suministrados localmente por esta caja. Si el contacto se abre, indica un estado de enclavamiento y el LED se apaga.

## 6.3 INTERFAZ DE LAS VVGS.

### 6.3.1 Rack de interfaz de VVGS.

Se trata de un rack Europa de 3U cuyo objetivo es ofrecer un aislamiento galvánico básico entre las señales de las VVGS y las entradas y salidas del rack PLC. También permiten comprobar visualmente el estado individual de todas las VVGS a través de LEDs en la parte delantera del rack. En total, podemos tener hasta 8 tarjetas PCB. Cada tarjeta proporcionará aislamiento galvánico y estado visual de 1 VVGS.

Además, este rack tiene una fuente alimentación de 24 VDC – 7.5A, para alimentar las bobinas de cierre y/o apertura de las válvulas.



**Figura 64. Rack de interfaz de VVGS.**

El coste estimado para la producción y ensamblado completo de este rack puede verse en la Tabla 23.

**Tabla 23. Cost estimates of the VVGS interface crate**

Chasis y cableado	€ 840.4
Fuente de alimentación	€ 161.6
Materiales extra para el rack	€ 253.3
Tarjetas PCB	€ 416.5
<b>Total hardware</b>	<b>€ 1672</b>
<b>Total mano de obra</b>	<b>€ 1280</b>
<b>Coste total</b>	<b>€ 2952</b>

### 6.3.2 Backplane del rack de interfaz de VVGS.

Como se ha comentado antes, el diseño de esta PCB es común para ambos racks de interfaz (enclavamientos y VVGS). Cuenta con conexión directa desde los conectores de las VVGS a la PCB a través de varios conectores de cable a placa y de montaje con taladros. Esta PCB permite la conexión de hasta 8 tarjetas VVGS. En esta PCB, se conectan dos fuentes de alimentación diferentes, una de las cuales proviene de la fuente de alimentación de 24 VDC en el rack de PLC y otra de La fuente de alimentación local de 24 VDC dentro del rack de interfaz.

### 6.3.3 Tarjetas PCB del rack de interfaz de VVGS.

De forma similar a las PCB de interfaz de enclavamientos, el propósito es proporcionar aislamiento galvánico a las señales provenientes de la VVGS. Estas PCBs también ofrecen una fuente visual para comprobar su estado a través de un LED. Cada tarjeta permite la gestión del comando de apertura y cierre de una VVGS con 2 optoacopladores que proporcionan 48 V en la salida. Además, hay 3 circuitos de aislamiento, uno para cada estado del VVGS (abierto, cerrado y presencia). En cada PCB hay un LED verde que indica la presencia (ON) del VVGS o no (OFF), y un LED bicolor para indicar el estado de apertura (verde) o de cierre (rojo) de la válvula.

## 6.4 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA Y DE SEGURIDAD.

Con respecto a este tema, el objetivo ha sido diseñar un sistema que pueda continuar funcionando nominalmente en caso de un apagón. Para ello, las fuentes de alimentación conmutadas de todos los racks (rack de PLC, de interfaz de enclavamientos e interfaz de VVGS) se conectarán a un sistema externo ya existente de alimentación ininterrumpida de CA (SAI).

Dado que el consumo de tensión y corriente de cada rack es diferente (véase el Anexo para el cálculo del consumo de corriente), se necesitarán diferentes fuentes de alimentación. En el caso

del rack de enclavamientos, la energía será suministrada por dos fuentes. Habrá una fuente de alimentación local de 24V con una corriente de salida nominal de 2A para la entrada de los optoacopladores y los contactos de los relés secos del controlador de vacío. Además, se suministran 24 V desde el rack PLC para la salida de los optoacopladores, incluyendo las indicaciones visuales de los LEDs y las señales de entrada digitales para el PLC. En el caso del rack para VVGS, la potencia también se suministrará a partir de dos fuentes. Habrá una fuente de alimentación local de 48V con una corriente de salida nominal de 7,5A para la alimentación de las bobinas de cierre y/o apertura de las VVGS. Además, se suministran 24 V desde el rack PLC para las indicaciones visuales de los LEDs y las señales de entrada digitales de la presencia y el estado abierto o cerrado de la VVGS. Por último, para el rack PLC, existe una sola fuente de alimentación de 24V con una corriente nominal de 7,5A que alimentará el sistema ET200SP y los módulos, además de la electrónica en las PCB de los racks de interfaz. Para el desarrollo de la versión prototipo, no se han considerado otras medidas de seguridad. Sin embargo, para mayor protección, se podrían implementar módulos de seguridad (SIL 3) que reemplazaran los módulos estándar utilizados en el prototipo. Esto podría permitir tener estados de posición seguros de las salidas de los módulos (útiles para la naturaleza bi-estable de VVGS en SPS). El único inconveniente es que el número de DI y DO por módulo de seguridad son más limitados, por lo que el número de VVGS que se pueden controlar por rack se reduciría drásticamente, necesitando un mayor número de racks con PLC.

En la ficha de especificaciones de los componentes no se incluye información alguna sobre las tasas de fallo. Para los optoacopladores, se contactó con el fabricante Vishay, que proporcionó los siguientes datos: 120 FIT. Mean Time To Failure (MTTF)  $8,33 \times 10^6$  h @ CI=60%,  $E_a=0,8\text{eV}$  y  $T_j=55^\circ\text{C}$ .

Para determinar la tasa de fallo de los demás componentes hay dos opciones. La primera y menos conveniente es realizar unos tests de fallo por cuenta propia. La segunda opción y más conveniente como aproximación, es basar los cálculos de las tasas de fallo en el Manual Militar de los Estados Unidos (Military Handbook 217F [10] y [11]). Esta opción solo nos permite obtener predicciones o estimaciones del comportamiento de los componentes, sin tener en cuenta parámetros como la temperatura de funcionamiento del componente, las interferencias electromagnéticas, que no son conocidos con precisión.

### • **Resistencias**

Para el cálculo de la tasa de fallo en las resistencias tenemos que  $\lambda_p = \lambda_b \pi_R \pi_Q \pi_E$  fallos/ $10^6$  horas

Considerando cada parámetro en el cálculo estimado de la tasa de fallo, se tiene que:

$$\lambda_b = 3.25 \cdot 10^{-4} \exp\left(\frac{T+273}{343}\right)^3 \exp\left(S\left(\frac{T+273}{273}\right)\right), \pi_R = 1, \pi_Q = 5, \text{ and } \pi_E = 2.$$

para todas las resistencias usadas, donde T es la temperatura ambiente y S es el cociente de potencia operativa y potencia nominal. Considerando un estrés máximo del 70% y una temperatura ambiente de 30 °C:

$$\lambda_p = 0.014 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 2 = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ fallos/hora}$$

### • **Transistores**

Para el cálculo de la tasa de fallo en los transistores tenemos que  $\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_Q \pi_E$  fallos/ $10^6$  horas

Considerando cada parámetro en el cálculo estimado de la mayor tasa de fallo, se tiene que:

$$\lambda_b = 0.00074, \pi_{T,max} = 8.1, \pi_A = 0.7, \pi_R = 1, \pi_S = 0.29, \pi_Q = 1, \text{ y } \pi_E = 6. \text{ Por lo que,}$$

$$\lambda_{p,max} = 0.00074 \cdot 8.1 \cdot 0.7 \cdot 1 \cdot 0.29 \cdot 1 \cdot 6 = 7.3 \cdot 10^{-9} \text{ fallos/hora}$$

con una temperatura de unión de 150° y un factor de sobretensión de 0.529 (ver Anexo para más cálculos).

- **Fusibles**

Para el cálculo de la tasa de fallo en los fusibles tenemos que  $\lambda_p = \lambda_b \pi_E$  fallos/10<sup>6</sup> horas

Considerando cada parámetro en el cálculo estimado de la mayor tasa de fallo, se tiene que:

$$\lambda_b = 0.01 \text{ y } \pi_E = 2. \text{ Por lo que,}$$

$$\lambda_p = 0.01 \cdot 2 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ fallos/hora}$$

- **Diodos**

Para el cálculo de la tasa de fallo en los diodos tenemos que  $\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E$  fallos/10<sup>6</sup> horas

Considerando cada parámetro en el cálculo estimado de la mayor tasa de fallo, se tiene que:

$$\lambda_b = 0.0038, \pi_{T,max} = 21, \pi_S = 0.054, \pi_C = 1, \pi_Q = 1, \text{ y } \pi_E = 6. \text{ Por lo tanto,}$$

$$\lambda_{p,max} = 0.0038 \cdot 21 \cdot 0.054 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 6 = 1.23 \cdot 10^{-9} \text{ fallos/hora}$$

con una temperatura de unión de 150° y un factor de sobretensión de 0.0165 (ver Anexo para más cálculos).

- **Optoacopladores**

Según los datos proporcionados por Vishay, el componente usado tiene un FIT de 120, y un Mean Time To Failure (MTTF) de 8,33x10<sup>6</sup> h, por lo que la tasa de fallo estimada es la inversa del MTTF:

$$\lambda_p = 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ fallos/hora}$$

- **LEDs**

Para el cálculo de la tasa de fallo en los LEDs tenemos que  $\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E$  fallos/10<sup>6</sup> horas

Considerando cada parámetro en el cálculo estimado de la mayor tasa de fallo, se tiene que:

$$\lambda_b = 0.00023, \pi_{T,max} = 4.8, \pi_Q = 1, \text{ y } \pi_E = 2. \text{ Por lo tanto,}$$

$$\lambda_{p,max} = 0.00023 \cdot 4.8 \cdot 1 \cdot 2 = 2.21 \cdot 10^{-9} \text{ fallos/hora}$$

con un factor de temperatura estimado de 85°.

## 7. DESARROLLO SOFTWARE.

En paralelo al diseño, desarrollo y testeo de la parte hardware del prototipo, también se definió la estructura básica del código software. Como ya se ha dicho en el apartado anterior, este código se desarrolló en SCL, usando el software TIA Portal de SIEMENS. En este código se consideraron solo las tareas básicas definidas en el apartado 5.4 (básicamente consistente en la gestión de la lógica de control del sistema de enclavamientos y actuación acorde a la situación). Un diagrama de flujo con la estructura del código puede verse en la Figura 65.

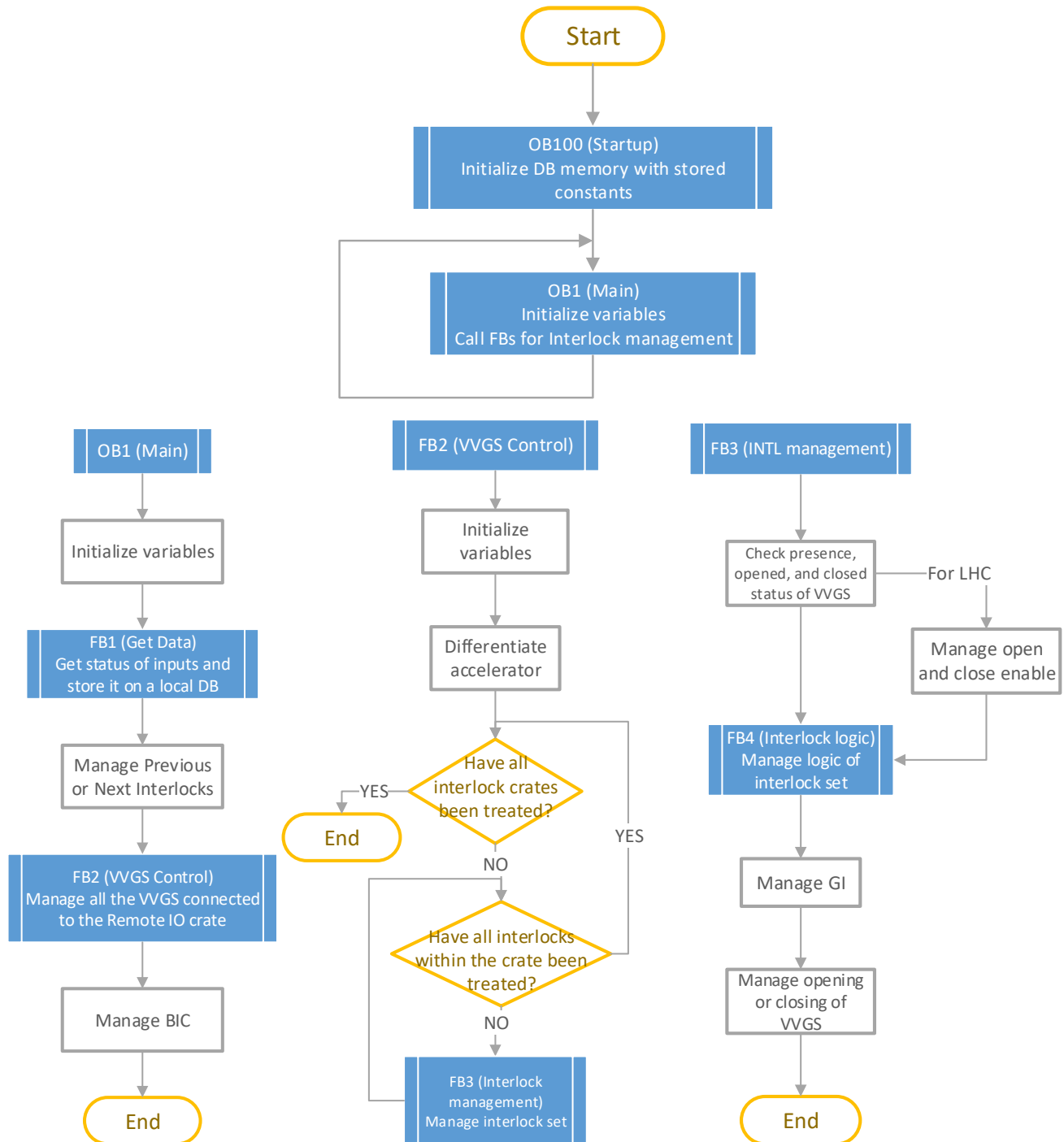
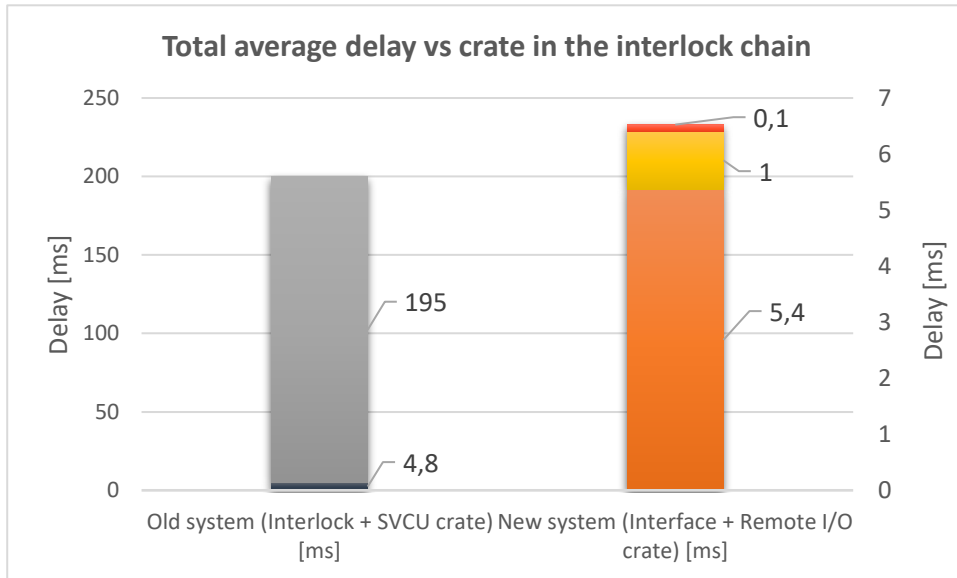


Figura 65. Diagrama de flujo del código software.

### 7.1 TESTS.

Una vez que se desarrolló una primera versión del código, el sistema se sometió a unas pruebas para comprobar el correcto comportamiento de las funcionalidades básicas (correcta implementación y gestión de la lógica local, y la propagación de los enclavamientos a válvulas anteriores y posteriores).

Además, los tres racks se probaron en conjunto para determinar la posible latencia que este nuevo sistema podría introducir como conjunto cuando se implementaran dentro de la cadena de enclavamientos. Los resultados obtenidos por el primer prototipo pueden observarse en la Figura 66 y la Tabla 24, junto con una comparación del retraso que introduce el sistema actual de control de las válvulas (racks de enclavamientos y SVCU a reemplazar).



**Figura 66. Retraso medio total de la cadena de enclavamientos introducida por los elementos en el sistema actual y el propuesto (desglose).**

**Tabla 24. Retraso medio total de la cadena de enclavamientos introducida por los elementos en el sistema actual y el propuesto.**

	Sistema actual (racks de enclavamiento+SVCU)	Sistema propuesto (racks de interfaz + PLC)
Retraso total [ms]	199.8	6.5

Los resultados obtenidos son sólo preliminares, y los resultados de la versión final pueden variar dependiendo de los cambios y las nuevas implementaciones en el sistema. Por ejemplo, una mejora adicional del código hará que el sistema sea más eficiente. Cuando el código adicional para la comunicación con el PLC maestro o con otras E / S remotas en la configuración de anillo, se espera que el tiempo de respuesta sea más lento. Lo mismo se espera en caso de que se implemente la interfaz con un panel HMI local.

## 8. CONCLUSIONES Y MEJORAS.

### 8.1 SEGUNDA VERSIÓN. DISEÑO COMÚN DEL SISTEMA DE CONTROL.

Considerando las observaciones de las secciones anteriores con respecto a las diferencias en los diseños de los sistemas de control de los aceleradores, se realizaron algunos cambios en el diseño para la segunda versión del prototipo. Con respecto a la interfaz del sistema con las VVGS, finalmente se consideró usar 3DI y 2 DO para todas las VVGS de todos los aceleradores. Para lograr un hardware común en el rack de PLC, habrá por tanto un total de 13 módulos DI y 5 DO (16 señales/modulo) por cada rack para la generación de enclavamientos y el control de las VVGS. Todos estos módulos estarán alimentados por la misma unidad base (BaseUnit) que abre el grupo potencial (mateniéndose el mismo número de grupos potenciales por rack PLC: uno). Con esta configuración, habrá un consumo máximo de 5.54 A (ver Anexo para los cálculos). Por lo tanto, ahora el rack de PLC pasa a tener una fuente de alimentación de 7,5 A.

### 8.2 NUEVA VERSIÓN DEL PROTOTIPO.

En las figuras siguientes, se muestra la segunda versión del prototipo que se realizó. Aquí se tuvieron en cuenta todas las modificaciones que eran necesarias realizar, desde la adición de los módulos DI y DO restantes, el rediseño de los circuitos electrónicos y de la disposición en las PCBs, así como las nuevas fuentes de alimentación necesarias. En esta versión, todos los racks se desarrollaron al completo, usando las 8 PCBs en cada rack de interfaz y con todos los nuevos módulos y cableado incluidos en el nuevo diseño.



**Figura 67. Segunda versión desarrollada del prototipo de control de VVGS completo.**

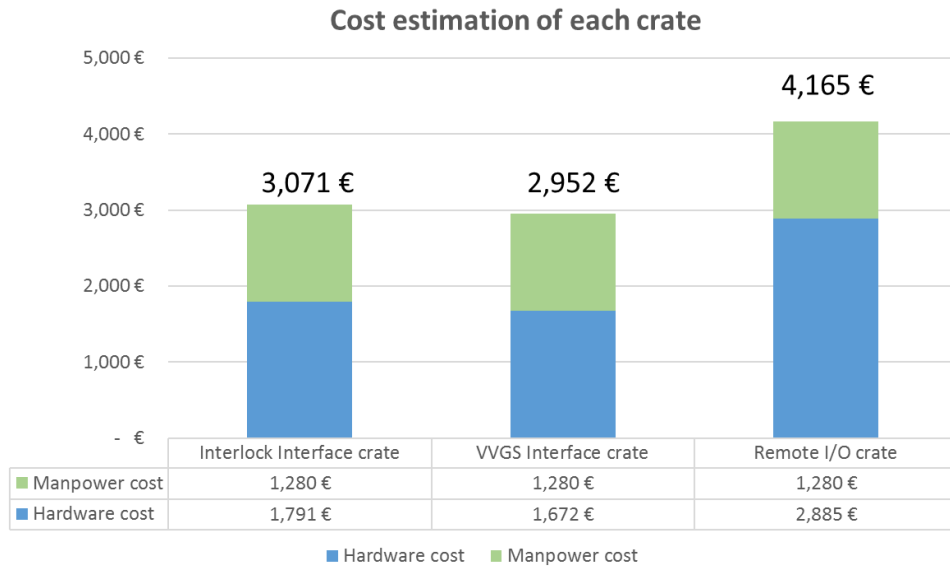
Con los cambios hardware mencionados, la nueva estimación de coste para el rack de PLC puede observarse en la Tabla 25.

**Tabla 25. Estimación de costes para el rack de PLC.**

<b>Total hardware</b>	<b>€ 2885</b>
<b>Total mano de obra</b>	<b>€ 1280</b>
<b>Coste total</b>	<b>€ 4165</b>

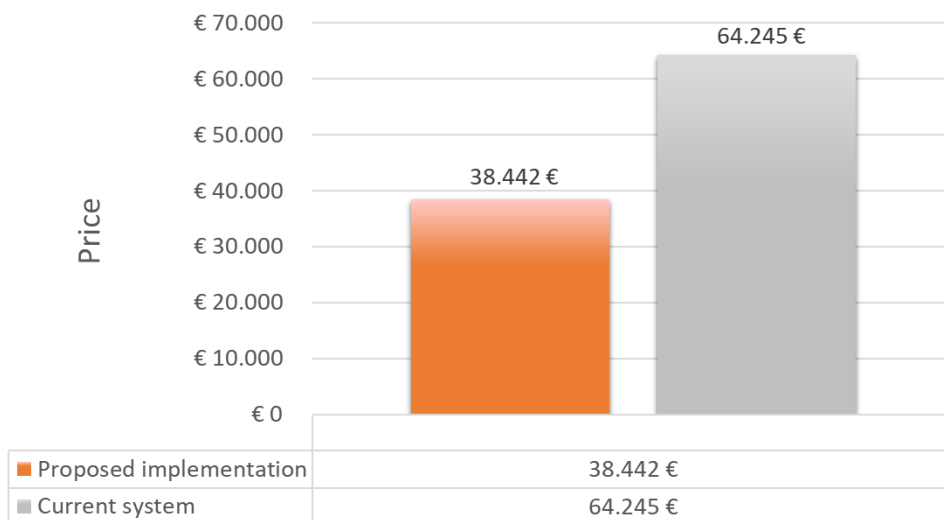
### 8.3 OBSERVACIONES GENERALES SOBRE EL COSTE.

En la Figura 68 se puede observar la estimación para el coste total de desarrollo de cada rack.



**Figura 68. Coste total para la producción de los racks para el nuevo sistema propuesto.**

Para hacer una breve comparación del coste estimado para la implementación de este sistema en uno de los sectores en el LHC, hemos tomamos el del rack 55 (Sector 5). Las estimaciones de costes se pueden ver en la Figura 69. Para esta configuración se controlan un total de 38 VVGS, con la necesidad de utilizar 2 racks de PLCs, con 5 racks de interfaz de cada tipo (racks de interfaz de enclavamientos y VVGS).



**Figura 69. Coste total de la implementación de los sistemas en el Sector 5. Sistema actual vs. propuesto.**

También hay costes adicionales que no se han incluido en las estimaciones anteriores como, por ejemplo, el coste de la mano de obra necesaria para reemplazar los racks actuales por los nuevos. Otro coste incluye los materiales y la mano de obra necesaria para producir el cableado para la conexión entre racks.

## 9. TRABAJO FUTURO.

### 9.1 CAMBIO A UN DISEÑO COMÚN DEL SISTEMA DE CONTROL.

Como se estableció en los objetivos, uno de las finalidades principales durante el desarrollo de este hardware, es lograr tener un sistema cuyos racks se pueda intercambiar sin importar el acelerador (CPS, SPS o LHC). Sin embargo, para manejar un verdadero diseño común, nos enfrentamos a varios problemas que lo convierten en una tarea muy ardua.

Uno de los principales problemas que tenemos que afrontar es la diferencia en el pin-out de los conectores de las VVGS para cada máquina. Para el CPS y el LHC, se utiliza un conector Burndy 12, mientras que en el SPS se utiliza un conector Burndy 50. Además, aunque las VVGS en el CPS y el LHC utilizan el mismo conector, el pin-out y el número de señales que utilizan es diferente. Esto deja tres opciones posibles para intentar solucionar el problema:

1. Desarrollar tres racks de interfaz de VVGS distintos, uno para cada acelerador.
2. Desarrollar un rack de interfaz de VVGS común y utilizar adaptadores para los conectores dependiendo del acelerador.
3. Desarrollar un rack de interfaz de VVGS común y cambiar gradualmente el pin-out de las VVGS hasta tener uno común.

Otro problema al que nos enfrentamos es la forma en que la lógica de enclavamiento se gestiona dependiendo de la máquina. Con el diseño actual, puede argumentarse que para el LHC y el CPS tenemos 8 conjuntos enclavamientos por rack (en CPS, el estado de 4 VPIs son compartidos, produciendo dos señales de enclavamiento distintas, una para la VVGS anterior y otra para la VVGS siguiente). Sin embargo, para el SPS sólo gestionamos 4 conjuntos de enclavamiento por rack. Además, en el CPS normalmente se tienen que gestionar 4 por cada conjunto de enclavamientos. Todas estas consideraciones se mencionan para mostrar las diferencias en la arquitectura tenemos actualmente. Por ejemplo, con la configuración propuesta de conexiones para la caja de IO remota, podríamos ser capaces de administrar:

- 24 conjuntos de enclavamientos y 24 VVGS para el LHC.
- 12 conjuntos de enclavamientos y 12 VVGS para el SPS.
- 24 conjuntos de enclavamientos y un máximo de 32 VVGS para el CPS (en caso de que todos los conjuntos de enclavamientos gestionen 4 VVGS, solamente 8 conjuntos de enclavamientos serían realmente usados para el control de las 32 VVGS).

NOTA: En estas estimaciones se incluye además el uso del conector AUX para válvulas, usada para los enclavamientos de temperatura en el LHC, y para control adicional de VVGS en el CPS.

Para resolver la cuestión de la multiplicidad para CPS, se podría considerar el desarrollo de un rack auxiliar adicional cuya función sea duplicar las señales de control de cierre o apertura de las válvulas. Esto nos permitiría tener más conjuntos de enclavamiento por cada rack de PLC. Sin embargo, también significaría no poder conocer el estado de cada una de las 4 VVGS. Una solución a este problema podría ser tener una lógica cableada adicional en el rack auxiliar propuesto (por ejemplo, tener la presencia de las VVGS cableadas en serie).

### 9.2 TARJETAS DE CONTINUIDAD Y SEPARACIÓN.

Con la implementación actual del sistema, la única posibilidad de simular un estado correcto de los controladores de vacío o de las VVGS es utilizar un conector de cortocircuito para simular el primero para el primer y un simulador de VVGS para el segundo. Con estas nuevas tarjetas que se plantean será posible simular la totalidad de la columna de controladores de vacío (cuatro) o

una VVGS (tarjetas de continuidad). También permitirá la posibilidad de detener la cadena de enclavamientos y / o válvulas cuando sea necesario (tarjetas de separación).

Para la simulación de los controladores de vacío solo es necesario realizar un puente entre la alimentación de los relés de contacto seco y el retorno a tierra. Así se simula un contacto siempre cerrado.

Para la simulación de las VVGS, se propone la siguiente convención:

- Para tarjetas de continuidad: Tener un estado correcto en la presencia y en la señal de abierto.
- Para tarjetas de separación: Tener un estado correcto en todas las señales (presencia, cerrado y abierto).

### **9.3 IMPLEMENTACIÓN DE PROFINET.**

Con el sistema actualmente implementado, la única forma de comunicarse entre los sistemas de periferia distribuida es mediante las conexiones NEXT y PREVIOUS cableadas (solo comunican si hay señal de enclavamiento GI). Para una comunicación adecuada entre las estaciones remotas y con el maestro PLC, se debe implementar la red PROFINET propuesta. Algunas de las ventajas que esto aportaría sería la posibilidad de monitorear en la aplicación SCADA el estado de cada señal que entra en juego en la cadena de control de enclavamientos de forma remota e individual (estado tanto de VVGS como de controladores de vacío). La arquitectura de anillo propuesta también permite que se permita el uso del protocolo MRP y la funcionalidad de Shared Device.

### **9.4 HMI PARA CONTROL LOCAL.**

Finalmente, se propone el desarrollo de una aplicación SCADA para integrarla en paneles locales de HMI, permitiendo así el control local del sistema (cierre intencionado de válvulas de vacío, etc.). Según se ha propuesto, podría haber hasta una pantalla HMI por cada rack de PLC, permitiendo la supervisión y control locales de las VVGS conectadas y el estado de los controladores de vacío. En este panel HMI se podrían implementar diferentes niveles de autorización, para medidas de seguridad adicionales.

## 10. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] "THE CONTROL SYSTEM OF CERN ACCELERATORS VACUUM [LS1 ACTIVITIES AND NEW DEVELOPMENTS]", P. Gomes, F. Antoniotti, F. Bellorini, S. Blanchard, J.P. Boivin, J. Gama, G. Girardot, G. Pigny, B. Rio, H. Vestergard CERN, Geneva, Switzerland L. Kopylov, S. Merker, M. Mikheev; IHEP, Protvino, Russia, Octubre 2013.
- [2] "Measurements, alarms and Interlocks in the vacuum control system of the LHC", G. Pigny, F. Antoniotti, J.P. Boivin, N. Chatzigeorgiou, J. Gama, P. Gomes, P. Krakowski, H. Pereira, H. Vestergard CERN, Geneva, Switzerland, Octubre 2015.
- [3] "Fundamentals of Vacuum Technology",  
[http://www3.nd.edu/~nsl/Lectures/urls/LEYBOLD\\_FUNDAMENTALS.pdf](http://www3.nd.edu/~nsl/Lectures/urls/LEYBOLD_FUNDAMENTALS.pdf)
- [4] "The analysis, tests and measurements of the ion pump controller electronic system used for vacuum control in particle accelerators at CERN", Agnieszka Chmielińska, CERN Septiembre 2013
- [5] Technical Note SVCU card "Sector Valve Control Unit card" for LHC, CPS and SPS, M. Roda, CERN, Febrero 2014.
- [6] Pfeiffer Vacuum GmbH. (s.f.). *Plug-In Boards for Total Pressure Gauge Controller TPG 300 Operating Instructions*. Asstar.
- [7] *Vacuum System Interlocks & alarms*, G. Pigny, CERN, Junio 2015.
- [8] Vacuum Interlock Chain Delay Measurements, M. Quero, CERN, Junio 2016.
- [9] Specifications for vacuum sector valve control system based on PLC remote I/O, M. Quero, CERN, Noviembre 2016.
- [10] Military Handbook Reliability Prediction Of Electronic Equipment (MIL-HDBK 217F), Department of Defense, USA, Diciembre 1991.
- [11] Methodology to Prepare an MTTF Prediction after the MIL-HDBK 217F at CERN, V. Schramm, CERN, Marzo 2017.
- [12] Controladores Industriales Inteligentes. Módulo 1: Controladores Lógicos Programables (PLC). Máster en Ingeniería de Sistemas Industriales, UNED.

## 11. ANEXO.

### 11.1 CÁLCULOS.

- **Factor de sobretensión máximo:**  $V_S = V_{CE} / V_{CEO} = 22.48 / 40 = 0.529$
- **Temperatura de unión de transistores and diodos:**  $T_J = T_A + (R_{\theta JA} \times P_D)$ ;  
P a temperatura ambiente es 0.625. Considerando la máxima Resistencia térmica de la unión a temp. Ambiente como  $R_{\theta JA} = 200 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , tenemos una temperatura de unión de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- **Factor de estrés eléctrico máximo:**  $V_S = V_{applied} / V_{rated} = 1.65 / 100 = 0.0165$
- **Consumo de corriente para la segunda versión del prototipo.**

#### Tarjetas de interfaz VVGS:

- DI/DO y LED:  $13.5\text{mA} \times 3 + 10\text{mA} \times 5 = 90.5 \text{ mA}$  por tarjeta. Fuente: rack PLC (PLC 24VDC)
- Comando VVGS:  $300\text{mA} \times 2 = 0.6 \text{ A}$ . Fuente: VVGS PS (Local 48VDC)

#### Rack de interfaz de VVGS:

- (24 V) Fuente: rack PLC.  $8 \times 90.5\text{mA} = 0.724 \text{ A}$
- **(48 V) Total por la fuente en el rack VVGS.**  $8 \times 0.6\text{A} = 4.8 \text{ A}$

#### Tarjetas de interfaz de enclavamientos:

- LED:  $13.5\text{mA} \times 4 = 54 \text{ mA}$  por tarjeta. Fuente: rack PLC (PLC 24VDC)
- Rack INTL:  $10\text{mA} \times 4 = 40 \text{ mA}$ . Fuente: rack INTL (Local 24VDC)

#### Rack de interfaz de enclavamientos:

- (24 V) Fuente: rack PLC.  $8 \times 54\text{mA} = 0.432 \text{ A}$
- **(24 V) Total por la fuente en el rack INTL.**  $8 \times 40\text{mA} = 0.32 \text{ A}$

#### Rack PLC:

- Por rack INTL y VVGS:  $0.724 + 0.432 = 1.156 \text{ A}$
- 3 racks:  $1.156 \times 3 = 3.468 \text{ A}$
- Total:  $3.468 + 0.6 + 0.09 \times 13 + 0.06 \times 5 = 5.538 \text{ A}$