



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

***PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN Y DISEÑO DE SCADA
PARA UNA PLANTA MODELO DE CAPTURA DE CO₂***

Herbalejo Joaquín

Trabajo final de Ingeniería Mecatrónica

Director: Mgtr. Ing. Magaldi, Guillermo Luciano

Codirector: Esp. Ing. Demichelis, Juan Pablo

Asesores:

Dr. Ing. Belzunce, Pablo Santiago

Ing. Martínez, Guillermo

Villa Mercedes, San Luis

2025

DERECHO DE AUTOR

© 2025, Joaquín Herbalejo.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

A toda mi familia, por acompañarme incondicionalmente en todo momento. A todos y cada uno de ustedes, por su colaboración y apoyo para que yo pudiera estudiar.

Por sostenerme afectivamente en toda circunstancia, e inculcarme el valor de este camino de aprendizaje como tal: con aciertos y obstáculos, pero aprendizaje al fin. Tanto en el sentido de responsabilidad por la oportunidad que me han dado, como en el disfrute de una etapa maravillosa. Gracias, este logro es mío y de ustedes.

En particular, le dedico este trabajo a mi padre y mi madre, quienes siempre se esforzaron porque jamás faltara nada en mi hogar, y me abrieron las puertas a formarme profesionalmente a la distancia. Sé que han hecho un esfuerzo enorme, y para mí es el regalo más grande que me podrían haber hecho.

Para vos pá, mi ejemplo de que todo progreso se construye con esfuerzo, dedicación y perseverancia. Llegamos, y sin dudas valió la pena. Este es solo el comienzo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer encarecidamente a todo el equipo de docentes que me acompañó en el desarrollo de este trabajo: director, codirector y asesores, quienes se predispusieron genuinamente a guiarme y ayudarme en las distintas etapas del proyecto.

Una mención especial para Juan Pablo, quien como director de carrera lleva adelante su trabajo para potenciar las oportunidades de cada estudiante. Gracias por tu empuje, tu apertura y disposición a escuchar nuevas propuestas y buscarle la vuelta a todo. Y por allanarme el camino, contra viento y marea para recibirme este día.

Quiero también destacar la predisposición de Laura y Pablo, a quienes estoy enormemente agradecido por abrirme las puertas del box, por compartir su trabajo y conocimientos, y acompañarme en la iniciativa de realizar un trabajo conjunto.

Una mención especial para Maxi Romero, quien a pesar de no figurar entre los participantes de este trabajo, fue mi principal referente técnico para lograr el funcionamiento del SCADA.

Quiero agradecerles a todos los amigos que coseché en este camino: a los de siempre y a los más recientes, por acompañarme en la que fue la mejor etapa de mi vida. Por todos los momentos compartidos, de estudio y diversión, y por hacerme sentir parte, aun viniendo de lejos.

A mis familiares de Villa Mercedes, mis tíos que me recibieron con los brazos abiertos desde el primer día y me sostuvieron con su afecto. Gracias por acompañarme en la aventura de comenzar una vida solo y lejos de casa, pero siempre rodeado de cariño.

A la Universidad Nacional de San Luis, por darme las herramientas, el espacio y la oportunidad de formarme profesionalmente. Siento un enorme orgullo de pertenecer a esta institución que me vio crecer desde el 2020, acompañado de excelentes profesionales de enseñanza.

A la Fundación YPF, por apostar a mi futuro desde el comienzo de este camino formativo. A Belu, Ro y todo el equipo: estoy muy agradecido por el acompañamiento a lo largo de estos años, por todas las experiencias que me brindaron como becario y el empuje para afrontar nuevos desafíos y descubrir mi potencial desde un lugar distinto. Me ayudaron a construir una perspectiva

de mi futuro profesional que antes no imaginaba, y me llena de entusiasmo saber que hay tantos lugares donde puedo aportar valor con mi profesión.

Y finalmente doy gracias a dios, por bendecirme con tantas gracias en vida. Por el privilegio de tenerlo todo y más.

"No tengan miedo de soñar cosas grandes. No se contenten con una vida pequeña, vuelen alto."- Papa Francisco

RESUMEN

El presente trabajo tiene por finalidad proyectar la automatización de una planta modelo de captura de CO₂ para centrales térmicas de ciclo combinado tomando como referencia una central térmica tipo de 400 MW, y un proceso de captura de CO₂ con sólidos por ciclos de absorción/desorción. A partir de dicha referencia, se establecen las condiciones operativas que rigen el funcionamiento de la planta modelo.

El mismo se enfoca en la proyección del sistema automatizado, como así también la simulación de la planta en forma representativa a partir de un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA). Particularmente, se puntualiza sobre la selección de equipamiento necesario para el funcionamiento y automatización de la planta modelo, a lo que se suma el planteo de una lógica operacional. Asimismo, se abordó el diseño de la arquitectura del sistema SCADA, integrando el equipamiento e infraestructura involucrados en el esquema del proceso automatizado. El mismo ha sido desarrollado desde cero utilizando software específico para tal fin.

El desarrollo de este trabajo final de grado se enmarca dentro del proyecto de investigación “Diseño, modelado y simulación de procesos químicos para la disminución de gases contaminantes”, dirigido por la Dra. Ing. María Laura Rodríguez, PROICO 14-1623. Por lo tanto, el trabajo representa una iniciativa de colaboración interdisciplinar, en el que se han combinado ambas especialidades de ingeniería (Mecatrónica y Química) a beneficio mutuo; en vista de aportar utilidades que permitan enriquecer al proyecto citado.

Palabras clave — Absorción, automatización, CO₂, desorción, SCADA.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: Propuesta	17
1.1 Introducción	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo general	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Alcances y limitaciones	20
1.4 Marco teórico	21
1.4.1 Cambio climático en el mundo y en Argentina:	21
1.4.2 Proceso de captura de CO ₂ :.....	24
1.4.3 Enmarcación del proyecto a la industria 4.0	26
1.4.4 Fundamentos del SCADA como herramienta de supervisión y control	27
1.4.5 Red de comunicación industrial	33
1.4.6 Consideraciones para el desarrollo de sistemas SCADA	41
1.5 Justificación	44
1.6 Estado del arte.....	45
CAPÍTULO 2: Estudio y demarcación del proceso	49
2.1 Análisis del modelo:	49
2.2 Layout de la planta.....	51
2.3 Condiciones operativas de planta	54
2.3.1 Operación en absorción	54
2.3.2 Operación en desorción	56
CAPÍTULO 3: Propuesta de automatización.....	59
3.1 Instrumentación Industrial de proceso.....	59
3.1.1 Descripción de tecnologías.....	62
3.1.1.1 TDLS - Espectroscopía de Laser de Diodo ajustable.	62

3.1.1.2 Caudalímetros de Vórtice:.....	63
3.1.1.3 Caudalímetros de Tubo de Pitot promediador:	64
3.1.1.4 Termorresistencias (RTD).....	65
3.1.1.5 Sensor de presión diferencial resonante:	68
3.1.1.6 Válvulas de Control:.....	70
3.1.1.7 Actuadores Eléctricos:	72
3.1.1.8 Transmisores de temperatura:	73
3.1.2 Especificaciones técnicas:.....	74
3.2 Infraestructura de comunicación:	81
3.2.1 Selección de Protocolos:	81
3.2.1.1 Protocolo HART:.....	81
3.2.1.2 Protocolo Profinet	83
3.2.2 Selección de equipos para red:	86
3.3 Estrategia operativa y secuencia de automatización.....	94
3.3.1 Etapa de absorción.....	94
3.3.2 Etapa de desorción:.....	99
CAPÍTULO 4: Desarrollo del sistema SCADA	103
4.1 Consideraciones preliminares de diseño.....	103
4.2 Contenido del SCADA	106
4.2.1 Pantalla Inicio:.....	107
4.2.2 Pantalla Proceso:	108
4.2.3 Pantalla Alarmero:.....	112
4.2.4 Pantalla Gráficos:	114
4.3 Secuencia de desarrollo del SCADA.....	116
CAPÍTULO 5: Recursos y Análisis de Costos.....	134
5.1 Recursos Humanos:	134
5.2 Recursos físicos:.....	135

5.3 Recursos Económicos:	136
5.3.1 Equipamiento de Campo	136
5.3.2 Infraestructura de Red	138
5.3.3 Determinación de llave asociada	140
CAPÍTULO 6: Estudio de Impacto Ambiental	142
6.1 Objetivo del análisis	142
6.2 Marco normativo – legal.....	142
6.3 Línea de base ambiental.....	142
6.4 Identificación y evaluación de impacto	144
6.5 Medidas de mitigación potenciales	151
6.6 Plan de seguimiento y monitoreo	151
6.7 Conclusiones	153
CAPÍTULO 7: Propuestas de mejora y avances	154
7.1 Adquirir Licencia de PULSE:.....	154
7.2 Programación del Supreme Report:.....	154
7.3 Incluir etapas restantes del proceso:.....	155
7.4 Implementación física piloto:.....	156
7.5 Incorporación de funciones IoT al SCADA:	156
CAPÍTULO 8: Conclusiones	158
Glosario.....	159
Referencias Bibliográficas	160
Anexo A - Videos descriptivos del SCADA	166
Anexo B - Listado de variables del SCADA	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Matriz energética de Argentina	22
Fig. 2. Estructura de emisiones GEI de Argentina vs LATAM y el mundo	23
Fig. 3. Distribución de potencia instalada en Argentina	24
Fig. 4. Fases del proceso de captura de CO ₂ por absorción/desorción	26
Fig. 5. Principio de funcionamiento de sistemas SCADA	29
Fig. 6. Esquematización de los componentes de hardware para un sistema SCADA	30
Fig. 7. Representación de la evolución de los sistemas SCADA	31
Fig. 8. Modelo de Pirámide CIM	34
Fig. 9. Esquema de topología en bus	37
Fig. 10. Modelo Purdue vs. pirámide CIM	42
Fig. 11. Arquitectura de sistemas SCADA respecto de modelo Purdue	43
Fig. 12. Planta de carbón Boundary Dam en Canadá	45
Fig. 13. Representación de la planta HIF Haru Oni	48
Fig. 14. Representación del proceso de fabricación de biocombustibles en HIF Haru Oni	48
Fig. 15. Modelo de captura de CO ₂ postcombustión para una central térmica	50
Fig. 16. Diferenciación de las etapas del Modelo de captura de CO ₂ postcombustión	51
Fig. 17. Representación del layout de planta	54

Fig. 18. Diagrama de flujos de la fase de absorción	56
Fig. 19. Diagrama de flujos de la fase de desorción	58
Fig. 20. Esquema de la disposición tipo para instrumentación en los conductos de gas	61
Fig. 21. Principio de funcionamiento de la tecnología TDLS	63
Fig. 22. Componentes y funcionamiento de un caudalímetro de vórtice	64
Fig. 23. Disposición y características de un caudalímetro de tubo de Pitot promediador	65
Fig. 24. Componentes de una termorresistencia	66
Fig. 25. Curva de relación de resistencias entre metales conductores	67
Fig. 26. Configuraciones de puente Wheatstone	68
Fig. 27. Disposición de puente Wheatstone convencional	68
Fig. 28. Componentes de un sensor de presión diferencial resonante	69
Fig. 29. Lira pitgail	70
Fig. 30. Tipos de válvulas de 3 vías	71
Fig. 31. Representación esquemática de una válvula tipo mariposa	72
Fig. 32. Detalle de los componentes de un actuador eléctrico Rotork IQ3 Pro	73
Fig. 33. Transmisores de temperatura por montaje en cabezal	74
Fig. 34. Principio de funcionamiento del Protocolo HART	82

Fig. 35. Esquemas de comunicación punto a punto y multipunto	83
Fig. 36. Evolución de nodos instalados, Protocolo PROFINET	83
Fig. 37. Esquema de integración entre proxy PROFINET con protocolos externos	86
Fig. 38. Esquema de conexión de la red de comunicación	87
Fig. 39. Esquema tipo grafcet para etapa de absorción	98
Fig. 40. Esquema tipo grafcet para etapa de desorción	102
Fig. 41. Estándar ISA 101 para el diseño de Interfaces	104
Fig. 42. Inicializaciónware PULSE desde máquina virtual ORACLE	105
Fig. 43. Menú principal de PULSE workstation y modalidades de uso	106
Fig. 44. Pantalla de Inicio diseñada en PULSE	108
Fig. 45. Pantalla de Proceso diseñada en PULSE	109
Fig. 46. Despliegue de ventana popup desde el tag de válvula FG1	110
Fig. 47. Detalle de alarma y notificación de advertencia	111
Fig. 48. Popup para válvula FG1	112
Fig. 49. Popup para válvula SA1	112
Fig. 50. Vista de la pantalla Alarmero	113
Fig. 51. Historial de alarmas en pantalla Alarmero	114

Fig. 52. Pantalla de gráficos en tiempo real	115
Fig. 53. Pantalla de gráficos históricos	116
Fig. 54. Detalle de la pantalla de la herramienta Project	116
Fig. 55. Recordatorio de versión demo que figura al iniciar el programa	117
Fig. 56. Alerta por caída de servicio	117
Fig. 57. Pantalla del modo desarrollador	118
Fig. 58. Detalle de la pestaña Graphics y expansión de la carpeta Displays	119
Fig. 59. Display del popup de válvula SA-1	120
Fig. 60. Detalle de botones y deslizadores creados con animaciones	121
Fig. 61. Detalle de botones y deslizadores creados con animaciones	121
Fig. 62. Gestor de variables en Database	122
Fig. 63. Propiedades del Database	123
Fig. 64. Gestor de alias para variables INI	124
Fig. 65. Editor de Workflows y detalle del editor de condiciones de regla	125
Fig. 66. Parametrización de bloques para diagrama de absorción	126
Fig. 67. Asignación de parámetros al botón START	126
Fig. 68. Listado de Workflows realizados	127

Fig. 69. Detalle y configuración de un bloque de activación de workflow	128
Fig. 70. Configuración de gráficos con herramienta Pulse Trend Graph	129
Fig. 71. Configuración de parámetros en la pestaña Pens	129
Fig. 72. Vinculación del gráfico con Database desde la pestaña Pens	130
Fig. 73. Configuración de un rango de valores en Database	130
Fig. 74. Configuración de la herramienta Pulse Alarm Explorer	131
Fig. 75. Configuración de alarmas en Database	132
Fi. 76. Configuración de Toolbar	132
Fig. 77. Herramienta Datascope	133
Fig. 78. Gráfico de relación presupuestaria	139
Fig. 79. Balance de consumos y eficiencia de una CTCC con y sin CCS	148
Fig. 80. Gráfico de impacto energético y ambiental	151
Fig. 81. Listado de variables analógicas en PULSE	169
Fig. 82. Listado de variables analógicas en PULSE	169
Fig. 83. Listado de variables digitales en PULSE	169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción y codificación de Instrumentación Industrial	59
Tabla 2. Especificaciones técnicas de Medidor de concentración de gases	74
Tabla 3. Especificaciones técnicas de Válvula de control tipo Mariposa	75
Tabla 4. Especificaciones técnicas de Válvula de control de 3 vías	76
Tabla 5. Especificaciones técnicas de Actuador eléctrico	76
Tabla 6. Especificaciones técnicas de Sensor de presión	77
Tabla 7. Especificaciones técnicas de Caudalímetro de vórtice	77
Tabla 8. Especificaciones técnicas de Caudalímetro de tubo de Pitot	78
Tabla 9. Especificaciones técnicas de Termorresistencia 1	78
Tabla 10. Especificaciones técnicas de Termorresistencia 2	79
Tabla 11. Especificaciones técnicas de Transmisor de temperatura	79
Tabla 12. Especificaciones técnicas de Lira Pitgail	80
Tabla 13. Análisis comparativo entre cableado de cobre y fibra óptica	87
Tabla 14. Especificaciones técnicas de PLC	89
Fig. 15. Modelo de captura de CO ₂ postcombustión	90
Tabla 16. Especificaciones técnicas de Switch PROFINET	91
Tabla 17. Especificaciones técnicas de Proxy	91
Tabla 18. Especificaciones técnicas de Cable Ethernet	92
Tabla 19. Especificaciones técnicas de cableado de cobre	92
Tabla 20. Especificaciones técnicas de ficha conectora RJ45	93

Tabla 21. Especificaciones técnicas de borne de tornillo	93
Tabla 22. Entradas y salidas durante la fase de absorción.	94
Tabla 23. Etapas y condiciones de transición de la fase de la fase de absorción	96
Tabla 24. Entradas y salidas durante la fase de desorción	99
Tabla 25. Etapas y condiciones de transición de la fase de desorción	100
Tabla 26. Desglose de tareas y tiempo de dedicación	134
Tabla 27. Recursos utilizados para desarrollar el trabajo	135
Tabla 28. Desglose de presupuesto para equipamiento de campo	136
Tabla 29. Desglose de presupuesto para infraestructura de red	138
Tabla 30. Valores de referencia para el funcionamiento de una CTCC	143
Tabla 31. Impactos asociados a la vida útil de la planta CCS	144
Tabla 32. Consumo energético del sistema de automatización	148
Tabla 33. Indicadores de seguimiento y monitoreo sugeridos	151

CAPÍTULO 1: Propuesta

1.1 Introducción

Las condiciones actuales del contexto energético mundial exigen un avance sostenido hacia procesos que logren aumentar la eficiencia global de las instalaciones industriales y que, al mismo tiempo, minimicen los impactos ambientales derivados de su operación [1]. En particular, las centrales térmicas de ciclo combinado representan hoy en día una parte significativa de la matriz de generación eléctrica, lo cual deriva en la constante emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera [2]. Frente a este escenario, la incorporación de tecnologías de captura de CO₂ se plantea como una alternativa viable para reducir la huella de carbono del sector, posicionándose como una herramienta de transición hacia sistemas energéticos más sostenibles [3]. Sin embargo, más allá de los desafíos tecnológicos propios de los procesos de captura, el desempeño de este tipo de plantas depende en gran medida de su capacidad para operar bajo condiciones estables, seguras y predecibles a lo largo del tiempo.

En este sentido, la digitalización y automatización de procesos operan como un habilitador clave, permitiendo monitorear en tiempo real las variables críticas del sistema y asegurar la reacción temprana frente a posibles eventos operacionales. El uso de plataformas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), acompañado de una arquitectura de comunicaciones industrial adecuada, otorga una visión integral del comportamiento de la planta y posibilita la implementación de estrategias que maximicen la efectividad del proceso de captura. La integración de estas herramientas dentro de una planta industrial no debe analizarse únicamente desde la perspectiva del control, sino también en tanto aportan beneficios directos en términos ambientales, principalmente al evitar paradas no programadas, minimizar la variabilidad de operación y, consecuentemente, reducir el consumo energético específico del sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la proyección de un sistema de automatización para una planta modelo de captura de CO₂ mediante ciclos de absorción/desorción con absorbentes sólidos. Para ello, se definen primeramente tanto los componentes del sistema de campo (sensores, actuadores, instrumentos y redes de comunicación) como la infraestructura de supervisión mediante software SCADA. Adicionalmente, se desarrollan estrategias operativas orientadas a mejorar la estabilidad del proceso, las cuales se representan mediante una simulación funcional del sistema. De este modo,

se busca poner en evidencia el aporte que puede ofrecer el diseño automatizado dentro de este tipo de instalaciones, no solo como herramienta de control, sino como parte fundamental de una solución orientada a reducir el impacto ambiental de las centrales térmicas.

Con base en lo anterior, el trabajo integra conocimientos adquiridos a lo largo del trayecto formativo del estudiante en diversos aspectos de la Ingeniería, y de la mecatrónica en particular. Asignaturas como Automatización Industrial, Redes de Datos y SCADA, entre otras, han cobrado particular relevancia como herramientas para lograrlo. Como resultado, se pudo diseñar un sistema funcional, escalable y capaz de ser implementado a futuro, junto al esquema de automatismo proyectado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proyectar la automatización y sistema SCADA para la supervisión y control de los procesos operativos de una planta modelo de captura de CO₂. Se apunta a desarrollar un sistema eficiente orientado a la adquisición de datos, el control de variables críticas y seguridad del proceso, mediante la integración de sensores, actuadores e infraestructura específica contemplados para el sistema automatizado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar y determinar el equipamiento necesario para la automatización del proceso de captura de CO₂.
- Analizar y ajustar el proceso involucrado para su automatización, en relación a sus parámetros operativos.
- Determinar la secuencia de automatización del proceso, con foco en una estrategia operativa.
- Analizar los parámetros críticos del proceso de captura de CO₂ que deban ser monitoreados y controlados por el sistema SCADA.
- Desarrollar el diseño de la arquitectura del sistema SCADA, integrando el equipamiento e infraestructura involucrados en el esquema del proceso automatizado.
- Simular representativamente el proceso automatizado en software SCADA bajo diversas condiciones operativas supuestas.
- Evaluar los requisitos de infraestructura necesarios para la implementación potencial del esquema de automatización y sistema SCADA.
- Realizar un análisis económico y funcional de la automatización del proceso, enfocado en costos y tiempos de operación.

1.3 Alcances y limitaciones

Este trabajo aborda la proyección del sistema automatizado para la planta modelo, determinando sus componentes e infraestructura requerida, y cómo estos se vinculan. Asimismo, se desarrolla una simulación representativa de la planta y el proceso involucrado mediante software SCADA. No está contemplado el desarrollo de la programación del sistema automatizado ni tampoco son abordados los sistemas de control para los componentes implicados, limitando a definirse una estrategia operativa y funcional desde la propia interfaz del software SCADA. Teniendo en cuenta que el proyecto se basa en una planta modelo, no se consideran implementaciones físicas ni ensayos al respecto.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Cambio climático en el mundo y en Argentina:

El cambio climático resulta, sin lugar a dudas, uno de los tópicos de mayor relevancia y protagonismo a nivel mundial de los últimos años. Y es que la evolución exponencial del calentamiento global se ha vuelto alarmante, y requiere tomar cartas en el asunto. Conceptualmente, dicho calentamiento responde al incremento de la temperatura del planeta en manos de las emisiones contaminantes liberadas a la atmósfera como consecuencia de las actividades humanas. La mayor parte de esas emisiones corresponden a lo que normalmente se conoce como gases de efecto invernadero (GEI) [4].

Ahora bien, el efecto invernadero es un proceso natural en sí mismo, que le permite a la atmósfera retener parte del calor emanado por el Sol. Es un fenómeno necesario, puesto que de otro modo la temperatura media de la Tierra sería de -18°C . Sin embargo, al potenciar dicho efecto con la emisión de GEI, el planeta retiene más calor del necesario y su temperatura media comienza a aumentar. En la actualidad, se ha generado un incremento de dicho valor medio en $1,1^{\circ}\text{C}$ respecto de la época preindustrial, a fines del siglo XIX [4].

Si bien existen diferentes tipos de GEI, el dióxido de carbono (CO_2) es el generado en mayor cantidad, con una proporción superior al 70% por sobre el total de emisiones globales. Según estadísticas del 2021, el monto generado representa unos 55.000 millones de toneladas de CO_2 equivalentes [5].

Son muchas las actividades involucradas en la emisión de GEI, pudiendo identificarse como principales fuentes de contaminación a la industria de manufactura y construcción, transporte, producción de energía, ganadería, agricultura y residuos, entre otros. Sin embargo, entre tantos actores involucrados es sin dudas la producción, generación y consumo de energía la principal causal de emisión, representando más del 75% del acumulado global [5]. Este es el resultado de una matriz energética conformada, mayoritariamente, en base a recursos fósiles y no renovables, como ser el carbón, petróleo o gas natural para la producción de energía.

Al analizar la situación en Argentina, se advierte la disposición de múltiples recursos energéticos que van desde fuentes de energía no renovables (como los hidrocarburos) hasta los más variados recursos ambientales, como ser el viento y la radiación solar, tal y como se observa en la Figura 1. A pesar de ello, más del 85% de la matriz energética del país está representada exclusivamente por hidrocarburos, que inherentemente producen emisiones GEI [6].

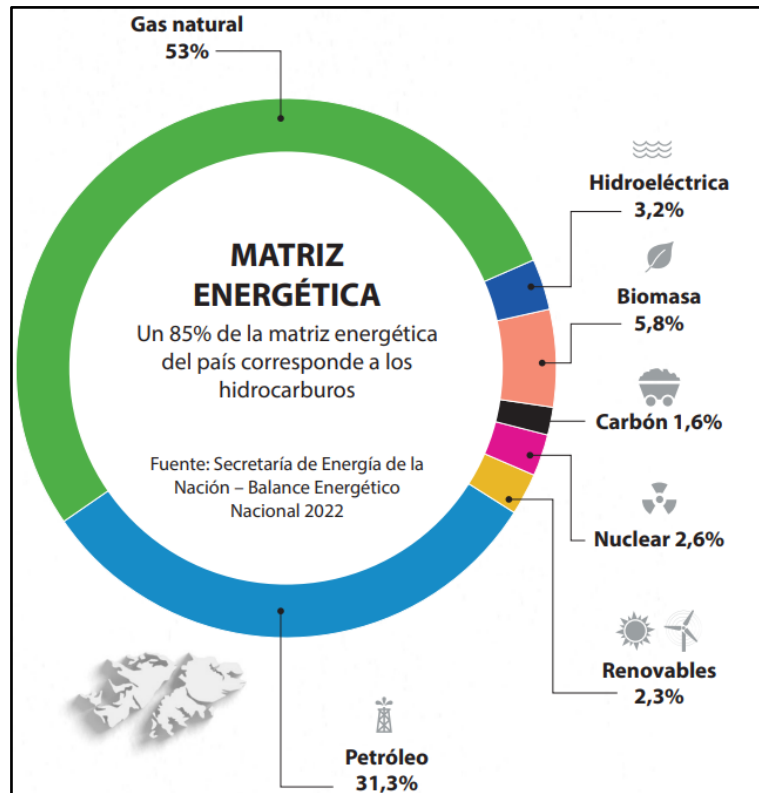


Fig. 1. Matriz energética de Argentina [Fuente: IAPG].

Respectivamente, la producción de energía eléctrica denota una participación de más del 50% sobre el total de emisiones GEI del país, habiendo superado las 200 Mt de CO₂ durante el 2022 [7]. En la Figura 2 se contrasta la proporción de emisiones a nivel mundial, LATAM y Argentina [8].

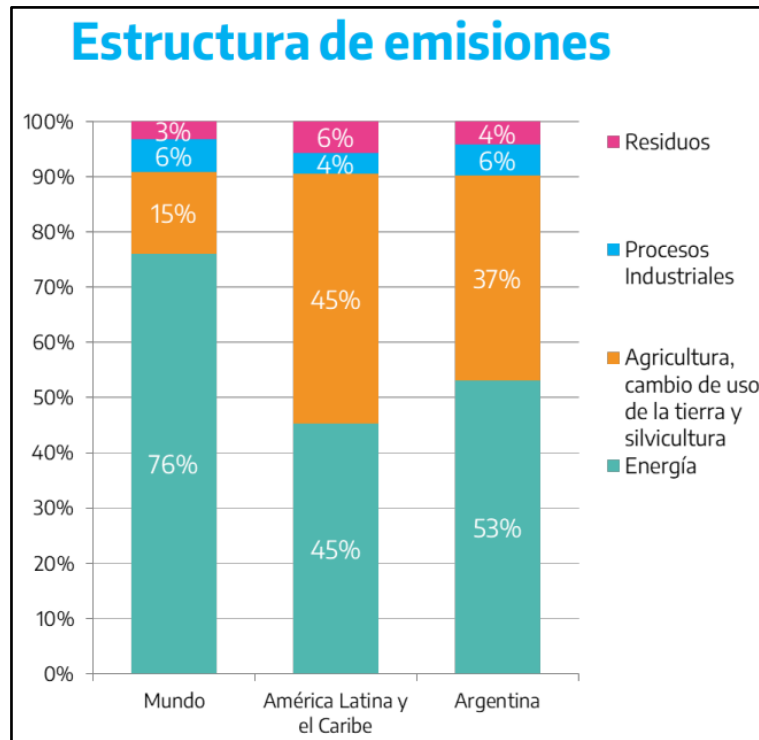


Fig. 2. Estructura de emisiones GEI de Argentina vs. LATAM y el mundo [Fuente:Subsecretaría de Planeamiento Energético de la Nación].

El caso particular de Argentina es que las centrales termoeléctricas representan más de la mitad de la potencia instalada a escala nacional, valiéndose de activos no renovables que emiten CO₂ al ambiente. En la Figura 3 puede constatarse la distribución de potencia instalada por fuente a julio de 2024 [9]. En relación a esto, surge la necesidad de implementar nuevas tecnologías y procesos que permitan capturar dichas emisiones de CO₂, en vistas de mitigar la contaminación ambiental por generación de GEI. A nivel global, las instalaciones comerciales y operativas para la captura de CO₂ (CCS) se encuentran en plena expansión, proyectando una capacidad instalada de 5600 MTpa hacia 2050 [10].

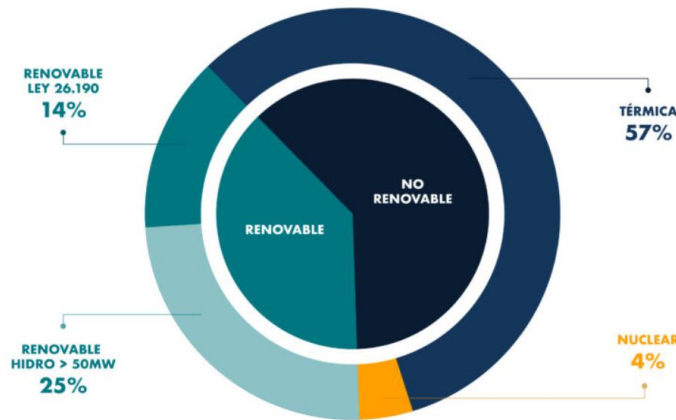


Fig. 3. Distribución de potencia instalada en Argentina [Fuente:Alpes Energy].

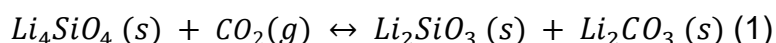
1.4.2 Proceso de captura de CO₂:

En línea con el objetivo de descarbonizar los sectores energético e industrial, la captura y almacenamiento de carbono (CCS) es considerada una tecnología crucial. Existen diversos sistemas plausibles de implementar, pudiéndose optar por procesos de precombustión, oxicomustión o postcombustión. En el caso de este último, lo que se hace es separar el CO₂ de los gases de combustión generados desde la actividad industrial, siendo la alternativa más sencilla de implantar debido a su adaptación sobre el final de la línea operativa. Asimismo, el secuestro de CO₂ puede realizarse mediante tratamientos de absorción, adsorción, membranas o eliminación criogénica, entre otras variantes. El proceso más desarrollado a escala comercial es el uso de disolventes, mediante la depuración por aminas, sin embargo, aparece la gran desventaja de requerir cantidades considerables de vapor a baja presión para regenerar el disolvente. Por tanto, surge la necesidad de explorar otras alternativas que permitan capturar el CO₂ [10].

En línea con el proyecto de investigación PROICO 14-1623, este trabajo aborda un proceso de captura con material sólido a partir de ciclos de absorción y desorción, haciendo uso de Ortosilicato de Litio como absorbente. Dicho compuesto se dispone en columnas, donde reacciona junto con el CO₂, proveniente de una corriente de gas de combustión (*Fluegas*). Esta resulta de las operaciones industriales, como ser en centrales termoeléctricas.

Dicho esto, la operación consta de dos fases para completar un ciclo de captura. Cabe aclarar que cada columna de reacción debe operar en ambas fases, por lo que actúan de forma intercalada para completar cada ciclo de absorción-desorción. Durante la fase de absorción, ingresa *Fluegas* al recinto y se absorbe la mayor parte de CO₂. Luego, se extrae el gas depurado y se expulsa a la atmósfera como corriente de aire reducido al mínimo de CO₂, podría decirse aire limpio. Es decir, el proceso funciona como una operación de filtrado del *Fluegas*, donde el filtro es el absorbente sólido.

El sólido se transforma en un carbonato de litio a través de la siguiente reacción:



A continuación, se produce la fase de desorción, tal que el sólido agotado es calentado a alta temperatura (+700°C) para liberar dicho componente, ocurriendo la reacción inversa y obteniendo como resultado una corriente gaseosa rica en CO₂. Esta es evacuada de la columna, pudiendo ser almacenada para su posterior utilización o deposición. Por consiguiente, en esta etapa se ha logrado capturar el CO₂ proveniente del *Fluegas*, evitando su dispersión en el medioambiente, a la vez que se ha depurado el absorbente para reiniciar el ciclo.

En la siguiente Figura se representan, esquemáticamente, las dos fases del proceso.

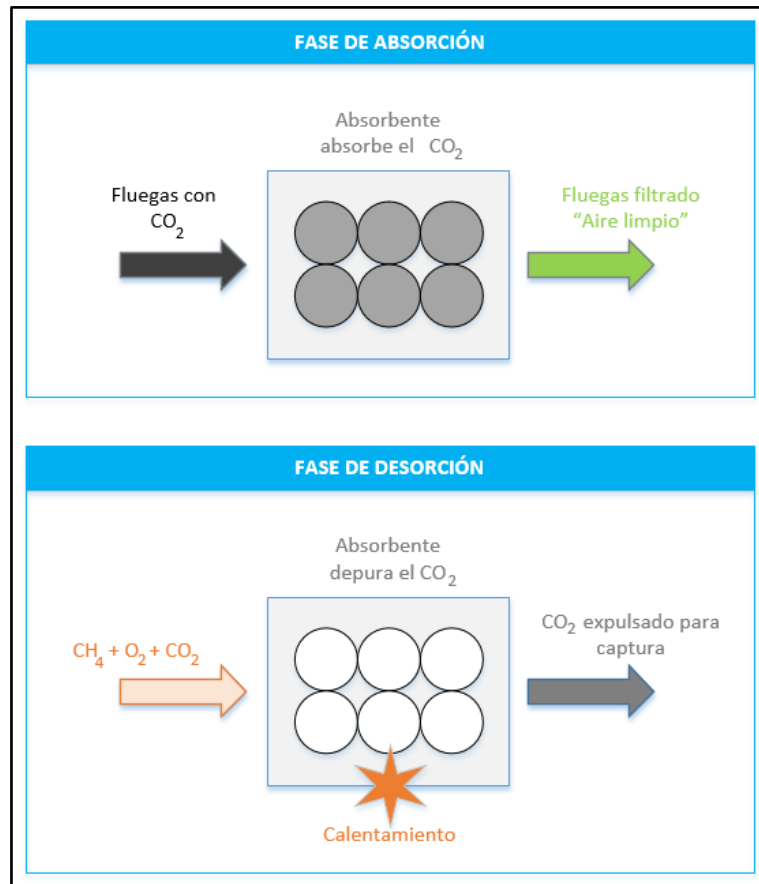


Fig. 4. Fases del proceso de captura de CO₂ por absorción/desorción.

1.4.3 Enmarcación del proyecto a la industria 4.0

Gracias a los avances tecnológicos del último tiempo, la industria 4.0 se ha vuelto un fenómeno global que interpela a todas las industrias de la actualidad. Por tanto, resulta una concepción imperativa de tener en cuenta a la hora de pensar en cualquier proceso o desarrollo con características industriales. Sería impensado proyectar cualquier iniciativa de este tipo sin considerar ciertos pilares característicos de la llamada cuarta revolución industrial. Al menos si lo que se espera es un proyecto competitivo y sostenible en el tiempo.

A modo sintético, la industria 4.0 abarca la digitalización e integración del sector industrial, a través de un conjunto de tecnologías abocadas a vincular los procesos productivos en virtud de maximizar la eficiencia y productividad. Ello implica la automatización de la mayoría de estos procesos y actividades, minimizando la intervención humana con la llegada de protagonistas como la robótica, sistemas inteligentes y el internet de las cosas, entre otros [11].

Este trabajo busca enmarcar el proceso de estudio dentro de la industria 4.0, poniendo de manifiesto la relevancia en el uso de sensores, la supervisión y control, y la propia automatización del mismo.

Respecto a esto último, los sensores desempeñan un rol fundamental para digitalizar todo proceso industrial, al permitir la recolección de datos en tiempo real. De este modo, y a partir de la interconexión entre diferentes equipos de campo, se facilita la operación conjunta, pudiendo automatizar el proceso [12]. Para este proyecto en particular, al trabajar con gases se contemplan múltiples sensores que permitan medir variables como temperatura, presión, concentración y caudal. Más adelante, se describirán diferentes tecnologías puestas al servicio de la medición de estas variables.

Ahora bien, al pensar en la automatización del proceso no sólo debe contemplarse la operación remota de los equipos, sino también la capacidad de tomar decisiones basadas en datos. Por lo tanto, se deben implementar dispositivos capaces de ejecutar lógicas de control para la operación de válvulas y actuadores. En este aspecto, la utilidad de controladores PLC y actuadores inteligentes como infraestructura del proceso se vuelve fundamental. Y para ello también es necesario establecer una red de comunicación industrial sólida y acorde a la demanda de información durante la actividad operativa. En tanto, la utilización de sistemas SCADA se vuelve fundamental como herramienta de integración, supervisión y control del proceso para velar por el correcto funcionamiento del equipamiento implicado.

1.4.4 Fundamentos del SCADA como herramienta de supervisión y control

Conceptualmente, se entiende por SCADA a cualquier software que permita acceder a datos remotos de un proceso para poder controlar él mismo. Para ello, es necesario integrar todos los sistemas que constituyen un ambiente industrial a través de una red computacional, que permita administrar, controlar y dar mantenimiento a dichos sistemas [13].

En sus inicios, los sistemas SCADA se basaban en tableros con indicadores analógicos, luces, perillas y pulsadores para interactuar con el proceso. Con el avance de la tecnología, en la actualidad estos sistemas se valen de múltiples componentes electrónicos que adoptan la capacidad de telemetría, al permitir la interconexión de sistemas separados para monitorear todas las variables involucradas en un proceso industrial. En este aspecto, la funcionalidad del software radica en actuar como interfaz entre los niveles de control y gestión de procesos. Existen una

serie de objetivos que determinan la utilidad de los sistemas SCADA como herramienta de supervisión y control [13]:

Economía: evita o minimiza la dependencia humana en la supervisión de procesos, lo que permite optimizar recursos y tiempos de operación.

Accesibilidad: la implementación del software habilita el acceso y configuración a diferentes parámetros de interés con solo navegar en el mismo.

Mantenimiento: es posible establecer alertas y avisos programados de revisión, como así también recibir información en tiempo real sobre el estado de cada componente del sistema, almacenarlos y presentarlos a conveniencia.

Ergonomía: implementar un SCADA contribuye a amenizar operaciones industriales ante la comodidad de centralizar el sistema y operar sin necesidad de realizar esfuerzo físico o someterse a condiciones adversas.

Gestión: la posibilidad de recopilar información y generar archivos históricos, gráficos de proceso y demás herramientas estadísticas son una gran ventaja para controlar procesos y establecer indicadores para su seguimiento.

Flexibilidad: Es posible realizar modificaciones y actualizaciones al sistema sin necesidad de incurrir en intervenciones sobre el equipamiento de campo.

Conectividad: apunta a poder interconectar diferentes equipos y sistemas sin importar su fabricante, estableciendo una red de comunicación integral de todos los procesos implicados.

Todo sistema SCADA trabaja en torno a la adquisición, comunicación y presentación de datos como base fundamental para el posterior monitoreo y control de procesos. En primera instancia, a nivel de campo, es necesario contar con sensores y equipamiento capaz de recopilar información. Por su parte, luego se debe establecer una red de comunicación para vincular diferentes equipos e interfaces. El último escalón radica en presentar información al operador, que habilite a la interacción hombre-máquina. Posteriormente, el operador puede interpretar el estado del área controlada y, en caso de ser necesario, intervenir en consecuencia. Esta es una breve descripción sobre el principio básico de funcionamiento y constitución de un SCADA. A modo representativo, resulta útil observar el esquema de la Figura 5. El usuario accede al sistema de proceso a través de las herramientas de visualización y control. Generalmente, se tiene una PC, la cual está comunicada a través de una red como ser Ethernet. En el extremo opuesto, a través de sensores se obtienen datos desde el sistema, informando al operador para intervenir mediante los elementos actuadores. La comunicación hacia los elementos del sistema se da vía

buses de campo. Mientras tanto, toda la información involucrada en el proceso se almacena para disponer de datos en el momento necesario.

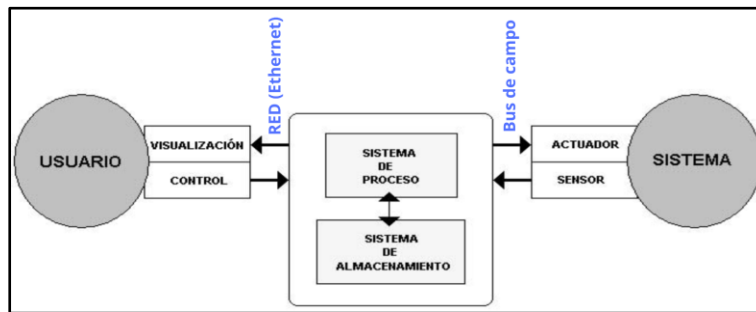


Fig. 5. Principio de funcionamiento de sistemas SCADA [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

Ahora bien, a fines prácticos resulta conveniente analizar la arquitectura del sistema SCADA en base a dos ramas diferenciadas: hardware y software.

Por el lado del hardware debe considerarse todo el equipamiento físico orientado a obtener y procesar datos [13]. Aquí se distinguen 2 grupos de interés:

- **Captadores de datos:** equipos que recolectan información y la procesan para su utilización. Se los denomina servidores del sistema.
- **Utilizadores de datos:** hacen uso de la información proporcionada para su análisis, se los identifica como clientes.

Dicho esto, entre el equipamiento de hardware básico para todo SCADA se destacan los siguientes elementos:

HMI - Interfaz hombre máquina: es el punto de integración entre operario y proceso, abarcando su representación gráfica y control. Suelen utilizarse paneles táctiles y pantallas que permiten visualizar, en forma simplificada, al sistema bajo control. Pueden instalarse en varios sectores o puntos estratégicos, para monitorear y controlar en simultáneo el funcionamiento de la planta.

MTU - Unidad Central: permite centralizar el mando del sistema, intercambiando información en tiempo real entre diferentes subestaciones o puntos de control. Entre sus principales funciones se destacan:

- Gestionar comunicaciones
- Recopilar datos de cada RTU
- Comunicar información recolectada

- Análisis y visualización de datos
- Gestionar mandos y medidas de seguridad

El MTU suele representar un centro de control, que recopila, archiva y distribuye datos del proceso productivo.

RTU - Unidad remota: representa cada estación de trabajo, abarcando al conjunto de elementos para la supervisión y control de dicha célula productiva. Se trata de subconjuntos que luego deben vincularse al centro de control. Los dispositivos más utilizados son el PLC y el propio RTU, aunque también se consideran dispositivos electrónicos inteligentes.

Sistema de Comunicación: permite el intercambio de información entre servidores y clientes del sistema, integrando el control de procesos desde los distintos equipos montados para tal fin. Se refiere a la red propiamente dicha, que como se ha visto anteriormente, contempla conexiones como Ethernet, buses de campo, etc.

En la Figura 6 se esquematizan estos componentes de hardware a modo ilustrativo.

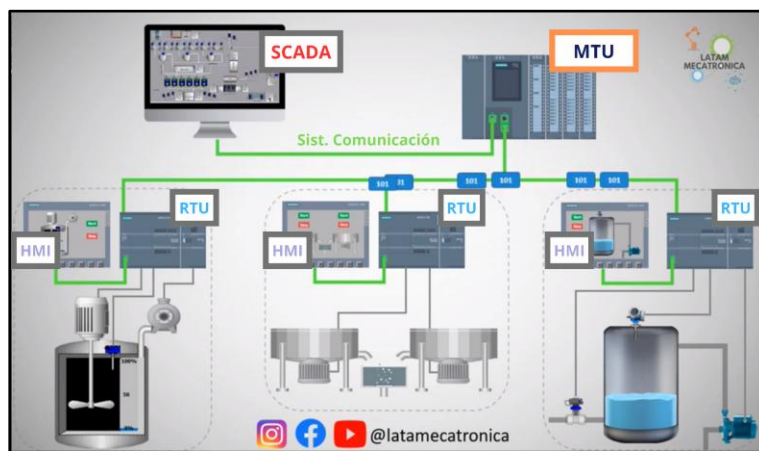


Fig. 6. Esquemización de los componentes de hardware para un sistema SCADA [Fuente: <https://youtu.be/BNwmOGLt9jc?si=VvDR6RgU0jHI6xT0> (Accedido: 15-feb-2025)].

En cuanto al software como componente, este comprende toda la programación del sistema en 3 niveles:

- SCADA y HMI
- Sensores y actuadores
- Sistema de interconexión

Anteriormente se expuso cómo los sistemas SCADA han evolucionado de ser simples tableros hacia una red interconectada, que incorpora todo el equipamiento citado. Pues bien, conforme el avance en el tiempo, surge una clasificación de los SCADA basada en *generaciones*.

En primer lugar, aparecen los **sistemas monolíticos**, o de primera generación. Su funcionamiento está limitado al monitoreo e indicadores de proceso, pues carece de un servicio de red en común, por lo que se tiene un sistema independiente que no se relaciona con otro. Se obtienen datos desde los RTU a partir de una copia de seguridad.

En segundo lugar, aparecen los **sistemas distribuidos** (2da generación). Estos permiten distribuir funciones de control mediante conexión a una LAN. Gracias a ello es posible procesar e intercambiar datos en tiempo real para realizar controlar operaciones.

La tercera categoría o generación corresponde a los **sistemas en red**. En este caso se cuenta con una red WAN que integra múltiples canales de datos desde diferentes nodos. Suelen emplearse conexiones por cable Ethernet o fibra óptica, a la vez que el control de operaciones está gobernado por PLC's en cada nodo.

Por último, los **sistemas IoT** son los de mayor relevancia en el último tiempo, con el distintivo de minimizar la infraestructura de red al utilizar la computación en nube. Esto simplifica la integración de dispositivos y las tareas de mantenimiento, sin perder la posibilidad de trabajar en tiempo real.

En la Figura a continuación se representan las 3 primeras generaciones, en orden ascendente de izquierda a derecha.

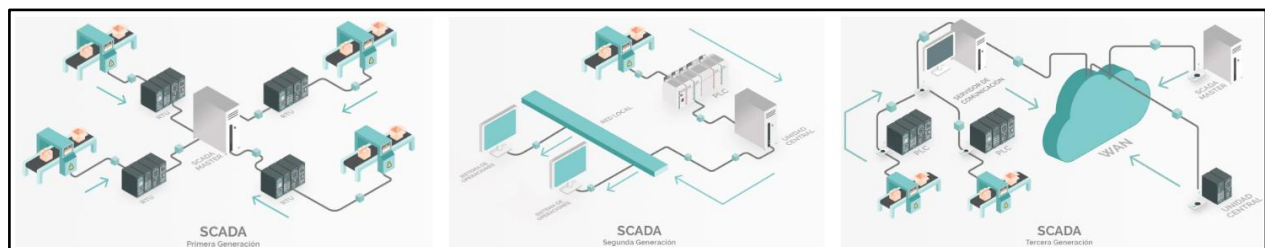


Fig. 7. Representación de la evolución de los sistemas SCADA [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

Habiendo visto esto cabe resaltar que la elección de uno u otro tipo de sistema va a depender de su aplicación, por lo que no puede determinarse arbitrariamente que una configuración resulte mejor o peor que otra. A continuación, se describen una serie de criterios a considerar a la hora de seleccionar y diseñar un sistema SCADA:

- **Disponibilidad:** se refiere a que tan confiable resulta el sistema para mantenerse operativo. Un aspecto clave en esto es el concepto de redundancia y tolerancia a fallas para evitar interrupciones de servicio.
- **Robustez:** indica la capacidad de mantener el sistema operativo aún habiendo ocurrido una falla o accidente. Se deben identificar áreas críticas y crear planes de contingencia al respecto.
- **Seguridad:** apunta a proteger el sistema contra vulnerabilidades de acceso o perjuicio. En este apartado se consideran medidas de ciberseguridad.
- **Prestaciones:** define la capacidad de respuesta del sistema ante diferentes cargas de trabajo. Incluso en condiciones adversas, el sistema debería ser capaz de registrar todo lo que ocurra sin incurrir en pérdidas de datos.
- **Mantenibilidad:** alude a la facilidad para diagnosticar y corregir fallas, como así también a la posibilidad de realizar actualizaciones y mantenimiento preventivo. Un buen recurso es utilizar interfaces complementarias al proceso en sí, que permitan monitorear el estado de servidores, PLC's, etc.
- **Escalabilidad:** define la capacidad de expansión y flexibilidad para incorporar (o quitar) equipamiento sin mayor complicación.

En base a estos parámetros, y sea cual sea el tipo de sistema a implementar, podría decirse que un SCADA debe agrupar ciertos componentes en general al servicio del usuario. A continuación, se describen los mismos:

- **Configuración:** el sistema debe habilitar la adaptación del entorno de trabajo a diferentes necesidades, organizar diferentes estructuras de pantalla, jerarquizar usuarios, información crítica, etc. De este modo, se apunta a customizar la visualización y control de proceso a conveniencia (personal y práctica según la actividad industrial).
- **Interfaz gráfica:** Es lo que permite al usuario crear pantallas, combinando imágenes, textos y objetos, desde librerías específicas para la operación que se desee controlar.
- **Alarmas y eventos:** para monitorear parámetros de las variables implicadas en el sistema, deben llamar la atención del operador ante situaciones críticas o cualquier eventualidad desfavorable. La principal finalidad es evitar detenciones, o bien forzar el arranque/parada si fuera necesario.

- **Variables:** suelen emplearse variables con valor asignado en función de cómo se comporte el sistema. Si por ejemplo existe un medidor de presión, seguramente se utilicen variables que indiquen valores máximos y mínimos, dentro de rango, peligro, etc.
- **Eventos:** se refiere a situaciones que definen un estado del sistema, como ser puesta en marcha, cambio de matrices, detenciones, activación de mecanismos, etc. Estos sucesos ocurren de manera automática y registran lo que sucede en el mismo.
- **Tendencias:** permiten analizar la evolución de las variables definidas en el sistema. Suelen emplearse escalas de valores, gráficos históricos en tiempo real, gráficos de área, etc.
- **Registro y archivado:** se trata de un archivo temporal de valores, basado en un patrón y hasta cierto límite de almacenamiento. En el caso de alarmas por ejemplo, se suele guardar información sobre el evento, momento en que ocurrió y usuario/s activo/s. En algunos casos se pueden realizar copias de seguridad y descargar las mismas.
- **Recetas:** son configuraciones automáticas del sistema, normalmente encapsuladas en un paquete de datos que es almacenado y recuperado. Esos datos son luego enviados a los controladores que ejecutan la actividad industrial. Así, se guardan configuraciones como ser velocidades, temperaturas, presiones, cantidades, etc específicas para cada actividad o producto. Por ejemplo, si se producen 3 tipos de piezas diferentes en una misma línea, entonces existirán 3 recetas para cada una de ellas. También se pueden preestablecer recetas de seguridad que liberen mecanismos, apaguen motores, etc.
- **Control de procesos:** alude a la posibilidad de programar tareas que respondan a ciertos eventos del sistema, como activar equipos, alarmas, enviar mensajes de alerta, etc. Para ello es necesario programar en lenguajes de alto nivel diferentes esquemas o flujos de trabajo.
- **Generación de informes:** comprende una herramienta de utilidad para la toma de decisiones, que genera información en base a las funcionalidades de adquisición y registro de datos. Se trata de reportes a modo de tableros en los que se agrupan visualizaciones como estado de proceso, producción histórica, registro de alarmas, cálculo de costos, mantenimiento, gestión de stock, etc.

1.4.5 Red de comunicación industrial

Para poder automatizar el proceso, monitorear y controlar el mismo resulta necesario establecer una red o sistema de comunicación industrial. Se tomará como parámetro el modelo CIM (Computer Integrated Manufacturing) a fin de desarrollar un esquema de integración y

coordinación de las operaciones de la planta [14]. En la Figura 8 se pueden apreciar los diferentes niveles de la pirámide CIM.

En la base predominan los *elementos de campo*, es decir aquello que está en contacto inmediato con el proceso, generando entradas y salidas. Ello involucra toda la instrumentación (sensores, actuadores, etc) y su conexionado pertinente (redes de vinculación o buses de campo).

En el sector medio de la pirámide se consideran aquellos equipos intermediarios entre proceso y operador, que actúan como *célula de control y supervisión* del proceso. El dispositivo por excelencia es el PLC, aunque también se consideran servidores, PC's industriales, redes LAN y software SCADA.

Finalmente, la cúspide de la pirámide se enfoca sobre el *aspecto administrativo*, lo cual implica toda operación a nivel fábrica y empresarial para poder gestionar un proceso. Por tanto, considera las herramientas necesarias para abordar tareas de planificación, establecer estrategias, planes productivos y de mantenimiento, recursos, etc. PC 's administrativas e Internet son dos de los principales exponentes en este sentido, en complemento a sistemas de manufactura, finanzas, SAP, etc .

En síntesis, esta disposición representa un ordenamiento jerárquico del flujo de datos en forma ascendente, desde el nivel de campo hacia la gestión corporativa.

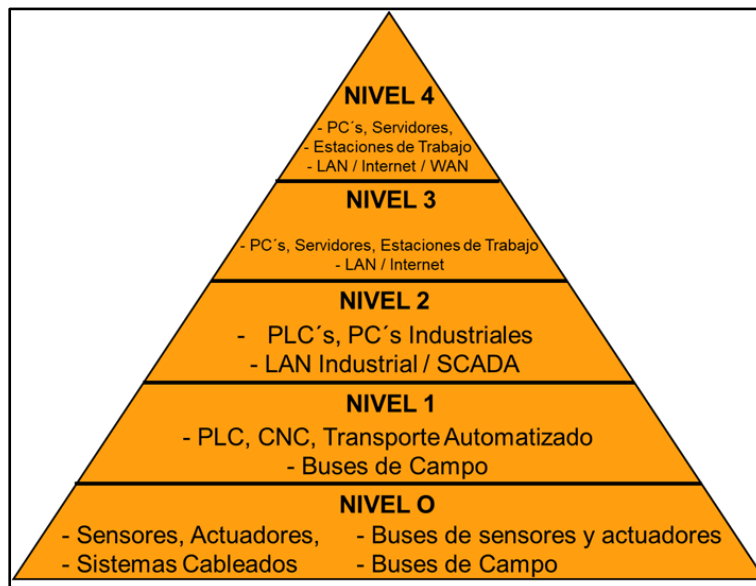


Fig. 8. Modelo de Pirámide CIM [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

En relación a lo anterior, sea cual sea el proceso en estudio, se deben desplegar interfaces de comunicación que permitan vincular las partes. Existen desde ya opciones de interfaz analógicas y digitales. El bucle de corriente 4-20 mA es quizá la solución más difundida, permitiendo controlar procesos de forma sencilla y económica, además de resultar inmune a interferencias electromagnéticas. Sin embargo, encuentra sus limitaciones al poder transmitir únicamente una sola señal por lazo, siendo necesario anidar múltiples líneas en procesos de muchas variables, lo cual resulta contraproducente para su aplicación a gran escala industrial. A pesar de ello, no se ha establecido aún un protocolo definitivo que permita migrar a sistemas completamente digitales que den solución a estos inconvenientes. Esto implicaría establecer un conjunto de reglas y estándares para la transmisión de información, que defina cómo organizar, enviar y recibir la misma. Se trata de establecer un marco en común que permita operar entre diferentes sistemas y tecnologías. Al no estar 100% estandarizado un protocolo a nivel global, actualmente existen un sinnúmero de variantes disponibles en el mercado.

Al margen de la interfaz elegida, existen distintas formas de relacionar los nodos de una red (elemento o conjunto de elementos de campo), y en cierta forma ello resultará ligado al protocolo que se proponga utilizar. A partir de esto, es posible gestionar la información y relación entre dichos nodos, identificando diferencias entre *modos de comunicación* y *formas de organización*.

En primer lugar, se consideran dos posibles *modos de comunicación* entre nodos:

- **Punto a punto:** implica el envío de información todas las veces que sea necesario hasta llegar a todos los receptores, lo cual sucede en distintos intervalos de tiempo. El mayor problema es que, al repetir un mensaje tantas veces como destinatarios haya, se ocupa un ancho de banda excesivo. Todo esto redundando en inexactitud y falta de determinismo (conocimiento de ocurrencia de eventos), ya que no todos los nodos requieren datos al mismo momento, pero deben chequear constantemente si les corresponde algo de ese flujo de información.
- **Multipunto:** permite transmitir datos direccionados y de acceso simultáneo para los nodos destinatarios. Así, se economiza en recursos y unifica el tiempo de transmisión, a la vez que se sincronizan los receptores.

Por el lado de las *formas de organización* entre nodos, se tienen los siguientes casos:

- **Maestro-esclavo:** se basa en la jerarquización de equipos, donde hay uno de ellos que controla la comunicación en forma temporal o permanente (Maestro). El mismo puede leer o escribir información sobre los demás esclavos, los cuales reciben y emiten mensajes hacia el maestro cuando reciben una orden. A su vez, los esclavos pueden ser activos (reciben órdenes y ejecutan un programa propio, como un PLC) o pasivos (solo operan como entradas/salidas del autómata maestro). Algunos ejemplos de red de este tipo son los protocolos Profibus, Modbus, AS-i.
- **Cliente-servidor:** una parte de la red presta servicios mientras que otra los aprovecha. Entonces, un cliente es aquel equipo que solicita servicios a una estación que los provee (servidor). Así mismo un servidor puede operar de igual modo como esclavo de red, mientras que una estación puede ser cliente y servidor. Ejemplo de esta modalidad es el protocolo Profibus-FDL.
- **Productor-consumidor:** utiliza el concepto de comunicación broadcast o para todos. Hay un nodo productor que emite un mensaje general a la red, tal que todos los nodos consumidores reciben el mismo en forma simultánea y determinan si les corresponde o no. Esto permite optimizar la producción de datos y sincronizar equipos, lo que redundaría en un menor uso del ancho de banda. Ejemplares de este tipo de organización son los protocolos Fieldbus y CAN bus.
- **Publicación-suscripción:** en este modelo no se trabaja con nodos específicos, ya que se manejan datos sin imponer requisitos para los destinatarios u orígenes del mensaje. Existe un publicador que provee información, mientras que el consumidor de la misma actúa como un suscriptor que debe registrarse para recibirla. Es el caso del protocolo MQTT.

Adicionalmente, existen diferentes disposiciones en cuanto a topología de red, es decir cómo se disponen los equipos en el medio de transmisión, para definir una estructura de red. Principalmente pueden identificarse:

- Topología en anillo
- Topología de árbol
- Topología en estrella
- Topología de bus

En términos generales, las topologías en anillo y de bus son las más elegidas a escala industrial. Esta última es la que resulta de interés para el presente trabajo, basada en una línea troncal a la que se conectan los equipos, tal que cada uno de ellos transmita o reciba información cuando así lo requiera. En la Figura 9 se esquematiza dicha disposición. Es un claro ejemplo de conexión multipunto, que requiere poca infraestructura de cableado a la vez que independiza el funcionamiento entre las estaciones por fallas individuales. El conexionado es sencillo y la velocidad de transmisión elevada, de aquí que sea la variante más difundida. Aún así, puede resultar susceptible a sobrecargas falencias de seguridad, en tanto que no existe la confirmación de recepción de mensajes entre estaciones como punto en contra.

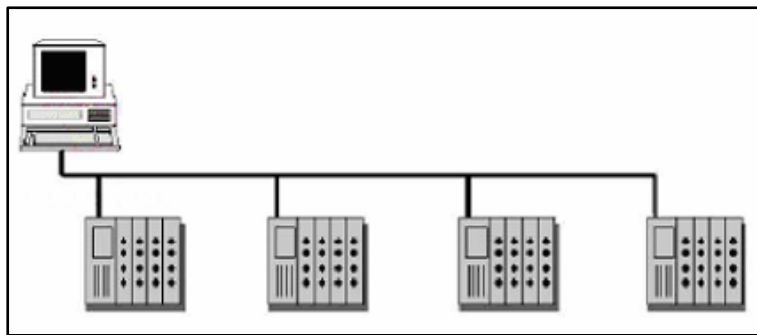


Fig. 9. Esquema de topología en bus [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA]

Teniendo en mente lo anterior, el paso siguiente consiste en definir un *bus de campo* que permita integrar la red de comunicación industrial. Ello constituye un enlace para controlar procesos avanzados, entradas/salidas remotas y aplicaciones de automatización.

Existen diversas opciones de buses de campo, pudiendo ser de tipo *propietario* (restringido a un fabricante específico, sin posibilidad de compatibilizar con productos de otra marca) o *abiertos* (permiten complementar equipos de diferentes fabricantes y características). Es este último el que se adopta para el presente proyecto, debido a que se cuenta con una amplia variedad de instrumentos de distintos fabricantes. En este sentido, todo bus de campo abierto debe cumplir 3 características fundamentales:

- **Interconectividad:** capacidad de intercambiar información en tiempo real en toda la cadena de valor.
- **Interoperabilidad:** permitir conexión y comunicación de dispositivos de distinto proveedor/fabricante.

- **Intercambiabilidad:** posibilidad de sustituir componentes por su equivalente de otro fabricante.

Asimismo, sea cual sea el tipo y variedad, los buses de campo en general deben satisfacer una serie de factores prestacionales, los cuales son:

Integración de datos: en una red a la que se encuentran conectadas múltiples dispositivos conviven diferentes clases de datos, debiendo tratar señales de entrada/salida, configuración, parametrizaciones, consignas, etc. El bus de campo debe tener la capacidad de soportar los mismos, adaptándose a cualquier marca de autómeta o controlador que se incorpore.

Por su parte deben independizarse los elementos de entrada/salida del resto del sistema de control, manteniendo el cableado a pesar de que el sistema pueda cambiar. Algo similar ocurre con la interfaz, permitiendo que cada fabricante pueda crear herramientas válidas para cualquier dispositivo.

Tiempo real: depende del ciclo de trabajo del autómeta, y en el caso del bus siempre debe tener su ciclo por debajo (más rápido), inferior a cinco milisegundos. Esto permite mantener las especificaciones de tiempo real y evitar cuellos de botella.

Determinismo: implica saber cuándo ocurrirá un evento. Resulta útil en tareas de regulación, pudiendo determinar tiempos de muestreo que aseguren un control fiable y preciso.

Eficiencia de protocolo: alude a la relación entre datos transmitidos (total contando *overheads* como encabezados, confirmaciones, etc) y útiles (aquellos que cumplen una función deseada). En tareas cíclicas de poca información útil (ej: estado de un sensor), la eficiencia es baja porque se envía mensajes constantemente y acumula mucho *overhead* para la poca información utilizada.

En tanto, para tareas acíclicas que implican mucha información, la eficiencia es alta. Se envían grandes caudales de información (ej: diagnósticos) a menor frecuencia, evitando acumular *overheads* innecesarios.

Por último, la eficiencia también depende del modo de transmisión, pudiendo ser basado en mensajes (uno por cada elemento de red) o en tramas (combina información de todos los elementos y envía todo junto).

Seguridad: convienen sistemas que trabajen a baja velocidad ya que una transmisión demasiado rápida resultaría susceptible ante interferencias electromagnéticas por utilizar altas frecuencias.

Expansión: apunta al concepto de escalabilidad para poder ampliar un bus. Depende de múltiples factores como la velocidad de transmisión, topología de red, cantidad de nodos, soporte de señal, etc.

Diagnóstico: debe informarse en forma concisa y sencilla para permitir una rápida respuesta al usuario en pos de minimizar los tiempos de parada. También debe habilitar la sustitución de equipos defectuosos sin afectar al resto de la red.

Disponibilidad: posibilidad de incorporar elementos y hacer recambios en plazos acotados.

A partir de todos estos requisitos ha surgido una extensa variedad de opciones comerciales, con diferentes prestaciones en función de la aplicación. Así, se tienen buses de alta velocidad y baja funcionalidad, alta velocidad y funcionalidad, altas prestaciones, para seguridad, etc. La elección de uno u otro queda sujeta al proceso implicado, instrumentación, equipos, etc. Sin embargo, todo tiende a la estandarización global, y es allí donde el protocolo Ethernet industrial está cobrando cada vez mayor protagonismo. Algunos criterios a la hora de elegir un bus de campo son:

- **Protocolo de comunicación:** compatibilidad y costo (programación, etc)
- **Velocidad y ancho de banda:** define el tiempo de respuesta.
- **Topología de red:** capacidad de expansión, funcionamiento, resistencia a fallas
- **Distancias de comunicación:** medios físicos y topología
- **Fiabilidad y robustez:** adaptación al entorno y tolerancia a fallas
- **Configuración y diagnóstico:** gestión e interfaz con el usuario
- **Soporte técnico y disponibilidad:** mantenimiento
- **Evolución tecnológica:** estandarización.

Más allá de las distintas opciones comerciales que puedan haber, los buses comparten un principio de funcionamiento común. Existe una arquitectura que permite establecer un modelo de referencia en cuanto a la *interconexión de sistemas abiertos de comunicación*. Es lo que se conoce como modelo OSI, el cual cuenta con 7 niveles o capas vinculadas entre sí. Ahora bien, la operación de los buses de campo se basa en 3 de esos niveles, descritos a continuación:

- **Capa física:** establecer comunicación con el medio (equipo de hardware) para recibir y enviar información (bits)
- **Capa de enlace:** permite direccionar la información y traducir la misma para ser utilizada en niveles superiores.

- **Capa de aplicación:** plantea la interacción con el usuario. Implica la codificación y control de intercambio de información, en base a una interfaz común que interconecta componentes del sistema. Aquí se distinguen las conexiones *cliente-servidor* y *productor-consumidor*.

A partir de aquí surge un problema, pues al ignorar el resto de los niveles del modelo de comunicación, se dificulta la interconexión entre buses diferentes. Como respuesta a ello surgen los llamados *gateways* o pasarelas. Estos son dispositivos que permiten unir redes de diferente estructura, tipo y protocolo.

Para unificar criterios y comenzar a trazar un camino de homogeneidad en la transmisión digital por buses de campo, surge el estándar ISA/SP50. Esta normativa aboga por la compatibilidad de señal entre instrumentos eléctricos, en virtud de definir una interfaz común y reglamentar las características con que deben contar dichas señales. Por ello, y en complemento al modelo OSI, el estándar propone 2 capas complementarias:

- **Capa de Usuario:** busca proporcionar un control global distribuido de las aplicaciones, en base a modelos de bloques de función y la gestión de bases de datos. Con ello se apunta a facilitar el control y adquisición de datos.
- **Capa de supervisión:** apunta a poder gestionar redes y sistemas, mediante la definición de funciones de monitorización, parametrización y configuración de dispositivos.

En ese camino hacia la estandarización, si bien las posibilidades son muchas, existe un protocolo especialmente alineado con los principios detallados anteriormente. Se trata del CIP (Protocolo Industrial Común), cuyas soluciones buscan integrar la gestión de entradas y salidas del sistema, configurar elementos de red y recoger datos en varias redes de comunicación. Con ello se apunta a diseñar dispositivos de control que operen en base al direccionamiento de red y adopten reglas de intercambio de mensajes. Todo ello constituye un paquete de servicios independiente al medio que apunta a reducir costos y esfuerzos de ingeniería en cuanto a puesta en marcha y mantenimiento. Se trata en específico de un desarrollo por parte de la empresa ODVA y aquí es donde entran en juego los intereses propios de cada compañía, cada cual con su propia motivación económica o comercial que atenta contra la estandarización definitiva.

1.4.6 Consideraciones para el desarrollo de sistemas SCADA

Resulta evidente que, así como para los buses de campo y protocolos de comunicación, se requiere establecer un marco de referencia respecto de los sistemas SCADA. Esto se vuelve imprescindible, sirviendo como guía para usuarios y proveedores, ante la necesidad de sentar ciertas especificaciones mínimas en cuanto a hardware, software, topologías, etc. Por tanto, desde el año 2016 se ha integrado el comité normativo ISA 112, que establece los lineamientos acerca de cómo diseñar, implementar, operar y mantener sistemas SCADA, tomando como base la experiencia y mejores prácticas en distintas industrias [15]. Existen guías detalladas que abarcan diversas posibilidades de aplicación según el rubro.

En líneas generales, el comité ISA 112 (*International Society of Automation* - Sociedad Internacional de Automatización) plantea una arquitectura común para estos sistemas, dividida en capas. De manera similar a lo visto en el esquema CIM y otros protocolos de red, se propone un diagrama funcional que resulte extrapolable a otros modelos, como ser el *Purdue*. Aquí una aclaración: no se trata de una arquitectura de red en sí, por tanto, no se contemplan routers, mecanismos de ciberseguridad o aplicaciones, entre otros. Aún así existe la posibilidad de incorporar aplicaciones remotas externas (como la nube) sobre cualquier dispositivo dentro del esquema.

A modo indicativo, el modelo Purdue plantea 4 niveles, que pueden contrastarse a la pirámide CIM antes vista de la siguiente manera:

- Nivel 0: Procesos físicos (sensores y actuadores)
- Nivel 1: Control básico (abarca dispositivos Inteligentes como PLCs, RTUs)
- Nivel 2: Sistemas de control (SCADAs, HMIs)
- Nivel 3: Sistemas de operación (sistemas de gestión de operaciones, bases de datos históricos, etc)
- Nivel 3.5: Zona desmilitarizada (*DMZ* - accesos, parches de seguridad, servidores de aplicación)
- Nivel 4: Zona empresarial (sistemas empresariales y comerciales, servidores web, DNS, PCs, etc)

Esto se puede ver representado en la Figura 10, en la que se esquematizan los modelos Purdue (izquierda) y pirámide CIM (derecha), ambos divididos entre tecnologías de la información (IT) y de operación (OT).

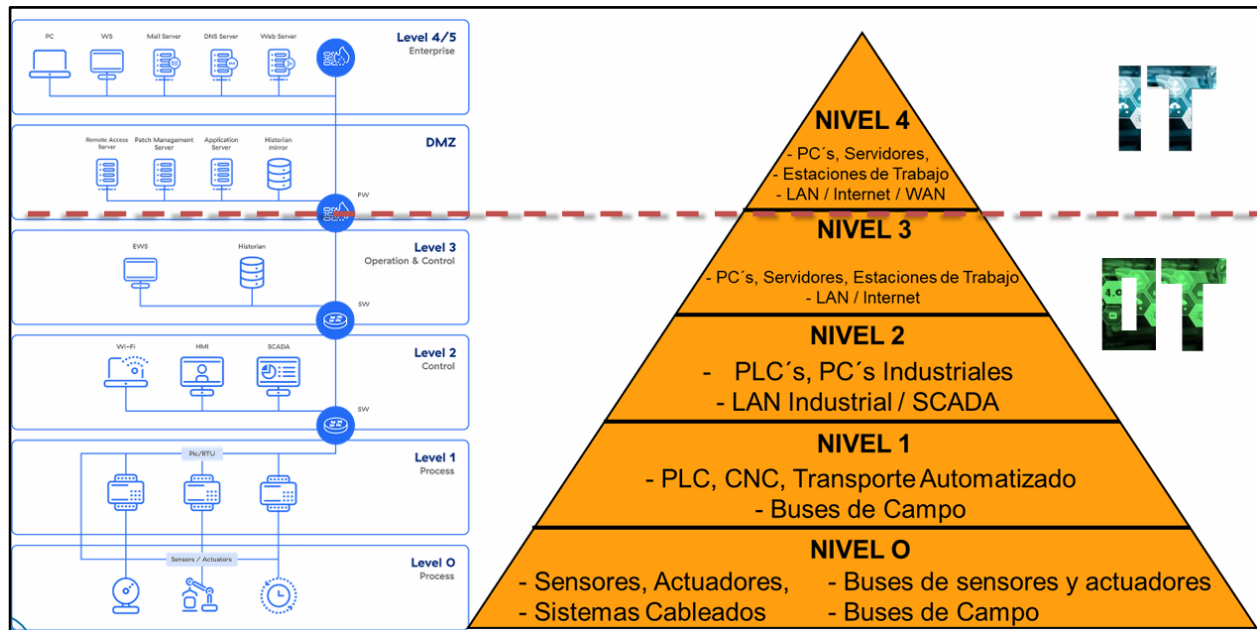


Fig. 10. Modelo Purdue vs. pirámide CIM [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

En lo que respecta al esquema propuesto para sistemas SCADA, de igual modo se observa una división en capas, aunque identificando las mismas mediante letras y no números (Figura 11). Si se compara con el modelo Purdue, se puede apreciar el desglose de los niveles citados previamente, dando lugar a nuevos subconjuntos según la red que se componga. Es en base a esta disposición que se rige el comité 112 para regular este tipo de sistemas en forma unificada. En la actualidad, son más de 200 expertos en la materia que participan activamente en el mismo, a través de evaluaciones de conformidad diseñadas para garantizar la adecuación al estándar.

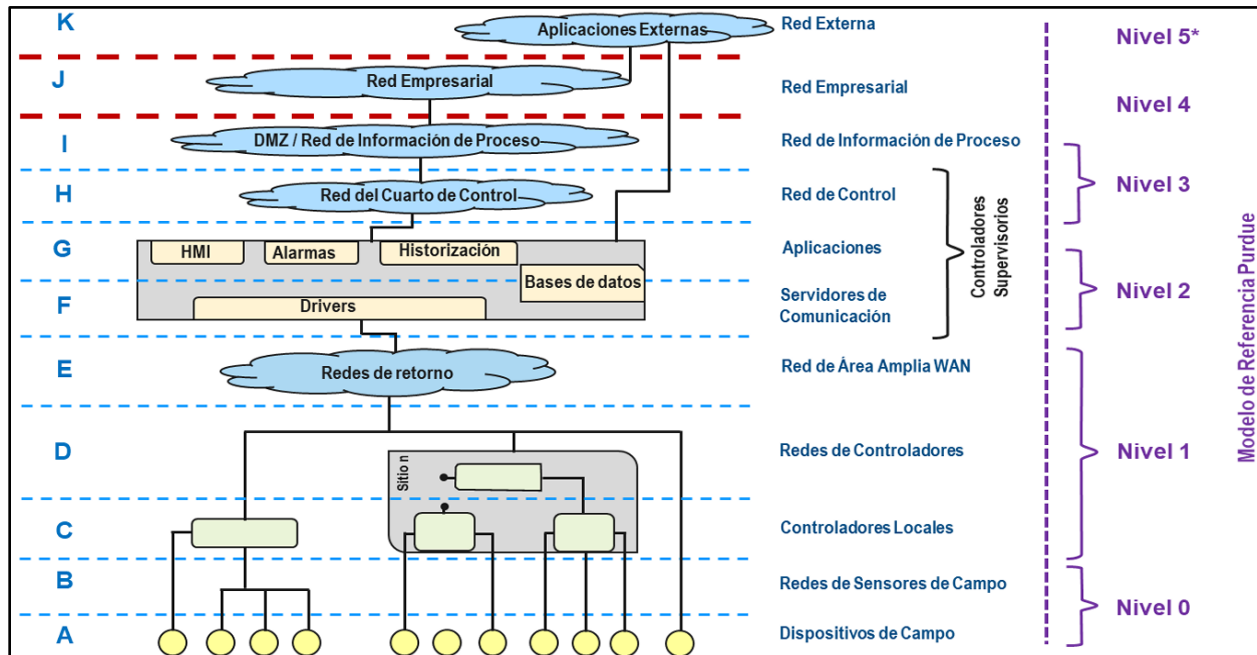


Fig. 11. Arquitectura de sistemas SCADA respecto de modelo Purdue [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

Asimismo, el comité propone un diagrama que determina el ciclo de vida de un SCADA a lo largo de 8 etapas puntuales:

- 1) Estándares del sistema
- 2) Diseño
- 3) Desarrollo del sistema
- 4) Fabricación / Construcción de hardware
- 5) Instalación/despliegue
- 6) Puesta en marcha
- 7) Operación
- 8) Mejora continua

Para este proyecto en particular, se han abordado las 3 primeras fases, sentando las bases para la posterior ejecución de las restantes.

Así, el primer punto corresponde a la definición de los criterios que guiarán el proceso de desarrollo, tomando como referencia la filosofía de sistemas SCADA, seleccionando plataformas, y adecuando estándares a la arquitectura de red, interfaces y lineamientos de diseño.

Luego, en el segundo escalón se establecen los requisitos del sistema a diseñar, planteando un diseño conceptual preliminar. Posteriormente se desarrollan estrategias operativas, pruebas de simulación, diseño de interfaces, configuración de eventos, alarmas, etc.

En tanto, el tercer paso corresponde a la configuración e implementación técnica del sistema. Ello implica documentar el diseño, configurar entornos de desarrollo y programar su funcionamiento para convertir el diseño en un sistema funcional, preparado para su posterior implementación y puesta en marcha [16].

El resto de las etapas mencionadas aplican sobre el sistema una vez ya implementado, razón por la cual no serán abordadas; recuérdese que este trabajo se erige sobre una planta industrial proyectada, inexistente en la actualidad. En contraste, se abre paso a la continuidad en el desarrollo del proyecto, ante su potencial aplicación física en el futuro. De hecho, tal como se planteó en los objetivos previamente, se han contemplado y detallado los componentes e infraestructura necesarios para avanzar sobre la etapa de instalación y despliegue del sistema una vez diseñado.

1.5 Justificación

Habiendo conocido a grandes rasgos el proceso de captura tomado como modelo para este trabajo, resulta evidente pensar en la automatización del mismo, puesto que involucra múltiples acciones secuenciales relacionadas entre sí. Como se verá más adelante, existe un componente interesante de instrumentación industrial puesta al servicio, con sensores y actuadores que deben actuar en conjunto. En complemento, la incorporación de un SCADA resulta ideal para proyectar la operación de la planta en forma segura y efectiva. La integración de los instrumentos de medición permitirá monitorear variables críticas en tiempo real para controlar las operaciones. Por consecuencia, esto contribuye a anticipar acciones de control y prevenir anomalías, optimizando el funcionamiento de la planta al mantener un ritmo continuo. La automatización también representa una herramienta de escalabilidad ante la posibilidad de integrar nuevas tecnologías y adoptar cambios en función de las necesidades del momento. Y, lo que es más, permite independizar las tareas de intervención humana, pues sería sumamente tedioso controlar todas las operaciones en forma manual, al margen del numeroso personal especializado que ello demandaría.

El desarrollo de un sistema SCADA apunta a poder centralizar el control del proceso, resultando una herramienta valiosa ante la oportunidad de operar en forma remota todo lo que a

este concierne. Además, permitiría registrar datos históricos de valor a la hora de tomar decisiones estratégicas, entregando información mediante alertas, avisos y gráficos complementarios.

En base a todo este conjunto de características y ventajas se ha decidido abordar la proyección del sistema automatizado y desarrollo del SCADA. Sin dudas constituye un aporte valioso ante una futura puesta en marcha de la planta modelo.

1.6 Estado del arte

Las instalaciones de captura de CO₂ se encuentran en plena expansión a lo largo del mundo. Existen numerosos casos en fase de desarrollo y varias plantas de captura post-combustión operativas en la actualidad.

Entre las instalaciones más renombradas se destaca la planta de carbón *Boundary Dam*, en Canadá (Figura 12). Es una de las pioneras en captura de CO₂ a gran escala, habiendo iniciado en 2014. Se trata de una central térmica de 120 MW, con una capacidad de captura en torno al millón de toneladas de CO₂ por año, haciendo uso de tecnología de absorción por aminas. Una vez capturado, el CO₂ se transporta para ser utilizado en tareas de extracción de petróleo, precisamente en tareas de recuperación secundaria.



Fig. 12. Planta de carbón *Boundary Dam* en Canadá [Fuente: <https://www.boilermaker.ca/> (Accedido: 30-sep-2024)].

Otro caso de renombre es el de *Petro Nova*, en Estados Unidos. Esta es la mayor planta de captura en el mundo que opera en centrales térmicas. Permite secuestrar alrededor de 1,4 millones de toneladas por año, lo que representa el 90% de sus emisiones generadas.

Por otra parte, China es uno de los países con mayor proyección al respecto, buscando capturar más de 400 mil toneladas por año de CO₂ anuales a través del proyecto *Yanchang CCUS*. En tanto, Europa posee una vasta experiencia respecto de estas tecnologías, aplicadas a centrales térmicas de gas y biomasa, además de otras industrias como ser acerías, cementeras, etc [17].

Argentina tiene un gran potencial de desarrollo al respecto, con el desafío de implementar procesos de descarbonización en una gran variedad de actividades industriales que se despliegan a lo largo y ancho del país. Entre ellas aparecen las centrales termoeléctricas, pero el abanico de oportunidades se extiende a industrias metalúrgicas, refinerías, producción de hidrocarburos, etc. A modo de ejemplo, en el año 2020 la empresa Air Liquide firmó un acuerdo para construir y operar la primera unidad de captura del país, en Salta. Hoy en día esa planta permite tratar 70.000 toneladas anuales de CO₂ en un complejo petroquímico, destinadas a su reutilización en industria minera y de alimentos [18].

Resulta interesante destacar que, más allá del reto que plantea la captura de emisiones en sí misma, los esfuerzos globales para desarrollar nuevos métodos y tecnologías en la materia no terminan allí. Por el contrario, se intensifican al momento de definir qué hacer con el CO₂ capturado. En este sentido, surgen múltiples oportunidades para transformar al mismo, dejando de ser un simple residuo industrial para convertirse en un recurso capaz de materializar nuevas utilidades. Desde las aplicaciones más básicas y conocidas como ser en la industria farmacéutica, química, siderúrgica o alimenticia (fabricación de bebidas carbonatadas, conservación y congelación de alimentos, descafeinado del café, entre otros) hasta su uso en agricultura, las posibilidades de poner este gas en valor son enormes. Sin embargo, entre tantos avances al respecto en los últimos años, existe una utilidad potencial que ha llamado la atención de quien suscribe, y es la fabricación de biocombustibles. Particularmente, por el hecho de que Argentina tiene todo lo necesario para entrar en contienda y explotar sus capacidades. Sin ir más lejos, en el país vecino de Chile se está consolidando un proyecto de referencia mundial, la planta *de Haru Oni* construida por HIF Global en colaboración con la automotriz alemana Porsche y Siemens Energy, entre otros [19]. Conocido como proyecto Magallanes, propone la fabricación de combustibles a partir de la producción de Hidrógeno verde, que se combina con CO₂ para formar

hidrocarburos (esto mediante un proceso de síntesis de metanol). Inicialmente, el CO₂ utilizado provenía de una fábrica argentina en Córdoba, como excedente de la fermentación de cerveza [20]. En la actualidad, se está capturando el CO₂ directamente desde el aire (ver esquema de planta en Figura 13). Aquí valga una aclaración: esa tecnología de captura se basa en el uso de solventes (líquidos), por lo que difiere de la presentada en este trabajo, justamente orientada a desarrollar y determinar una alternativa que contrarreste las contraindicaciones (toxicidad y alto costo energético) del uso de solventes.

Aun así, independientemente de la tecnología adoptada, estos avances permiten proyectar la implementación futura de módulos de captura en diversas industrias, y luego comercializar el CO₂ como producto. Es decir, el CO₂ pasaría a convertirse en un *commodity* intercambiable.

Volviendo al proyecto ejemplificado, Argentina tiene un gran potencial para emular una propuesta de este tipo, sobre todo en cuanto a disponibilidad de recursos naturales respecta (indispensables para producir H₂ en forma sostenible). El gran atractivo de este tipo de iniciativas es el impulso de una economía circular en torno al producto, pues al reutilizar las emisiones de gas ya producidas anteriormente en otro proceso, los subproductos obtenidos terminan siendo neutrales en carbono. Y se trata de un caso de aplicación real, tangible y operativo en la actualidad, lo cual permite proyectar expectativas concretas de cara al futuro.

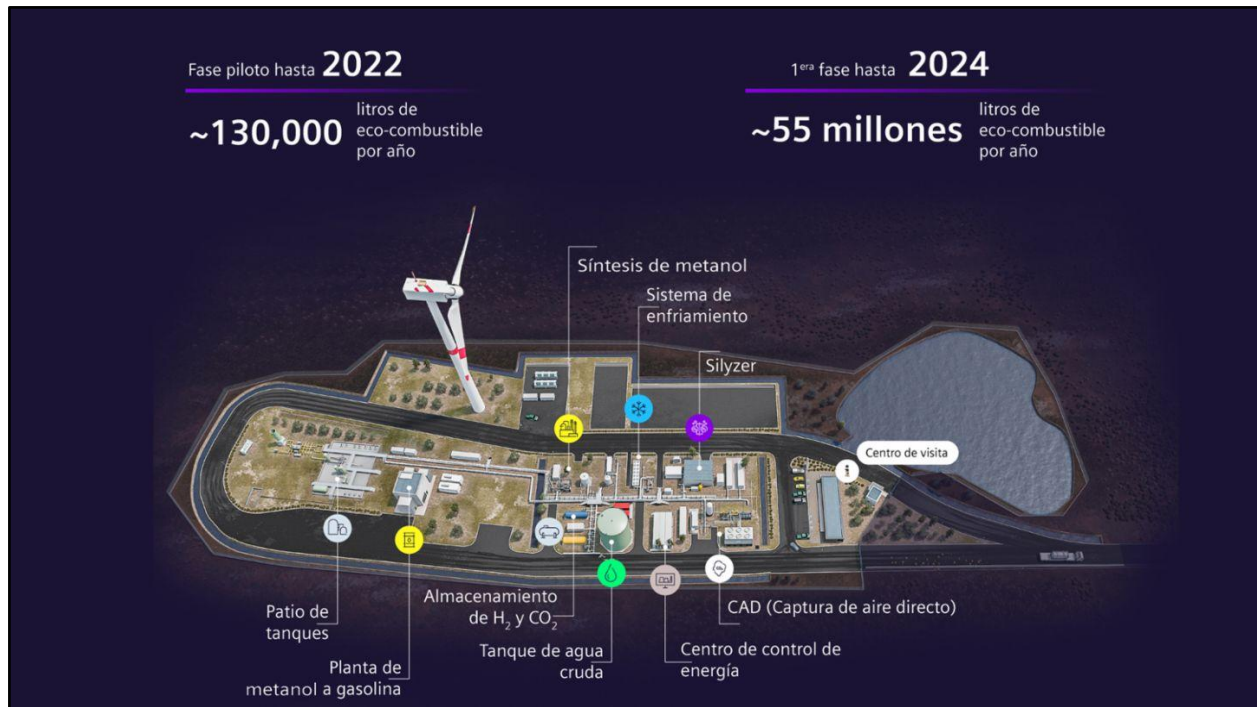


Fig. 13. Representación de la planta HIF Haru Oni [Fuente: <https://hydrogencouncil.com/> (Accedido: 30-sep-2024)].

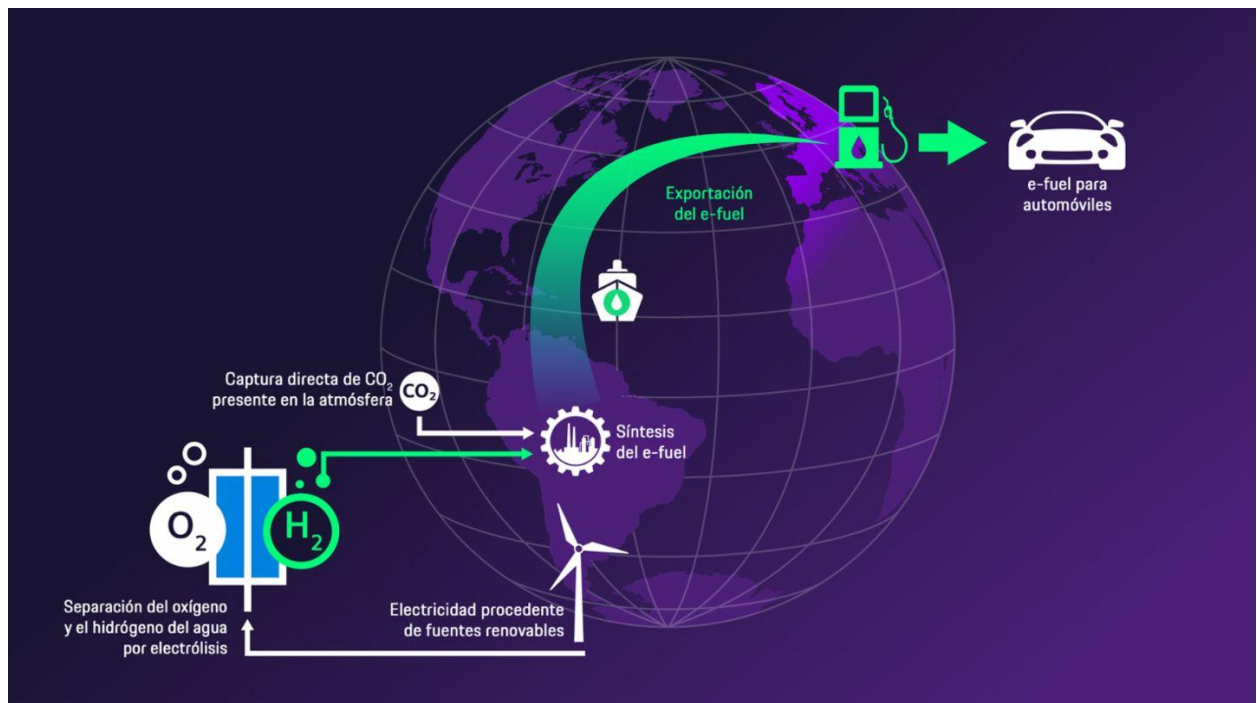


Fig. 14. Representación del proceso de fabricación de biocombustibles en HIF Haru Oni [Fuente: <https://latam-green.com/> (Accedido: 30-sep-2024)].

CAPÍTULO 2: Estudio y demarcación del proceso

2.1 Análisis del modelo:

Conforme lo expuesto anteriormente, el presente trabajo se fundamenta en el proceso y modelo de planta propuestos en el proyecto de investigación “Diseño, modelado y simulación de procesos químicos para la disminución de gases contaminantes”. En este sentido, como punto de partida se debe realizar un análisis del mismo, a fin de contextualizar el trabajo y establecer una base para su desarrollo.

En líneas generales, el proyecto mencionado plantea el modelo de captura post-combustión para centrales térmicas que se esquematiza en la Figura 15. Se identifican las tres etapas principales que lo componen:

- **Acondicionamiento de gases de escape (o Fluegas):** responde al tren de compresión aguas arriba (inferior), al que ingresa la corriente de gases provenientes de la central térmica (CTCC), y se los adecúa para su posterior tratamiento de captura. La compresión se divide en 3 fases con enfriamiento intermedio (HE) y separación de agua condensada, mediante el uso de deshidratadores / separadores de líquido (GC en la Figura 15). El objetivo es aumentar la presión de los gases de proceso desde 1 atmósfera hasta alcanzar 10 atmósferas (presión de absorción). Por último, el gas atraviesa una etapa de calentamiento final hasta alcanzar la temperatura de absorción (550 °C).
- **Captura de CO₂ por ciclos de absorción/desorción:** es el núcleo de la operación, involucra principalmente a las columnas con disolvente en las que se separa el CO₂ en ciclos de absorción y desorción, derivando en una corriente rica en CO₂ y otra descarbonizada. Esta última pasará a descomprimirse en una turbina (RT), mientras que la corriente enriquecida en CO₂ será luego comprimida en una etapa posterior. Para este caso, se consideró el uso de columnas con absorbente sólido, pero como se mencionó en el marco teórico, también podrían considerarse otras alternativas.
- **Postratamiento de gases de escape:** corresponde al tren de compresión aguas abajo, donde ingresa el flujo de CO₂ de alta pureza obtenido postseparación. Se plantean 4 etapas con enfriamiento intermedio hasta alcanzar los 110 bares de presión. La finalidad principal responde a la adecuación de flujo para su posterior almacenamiento y/o transporte.

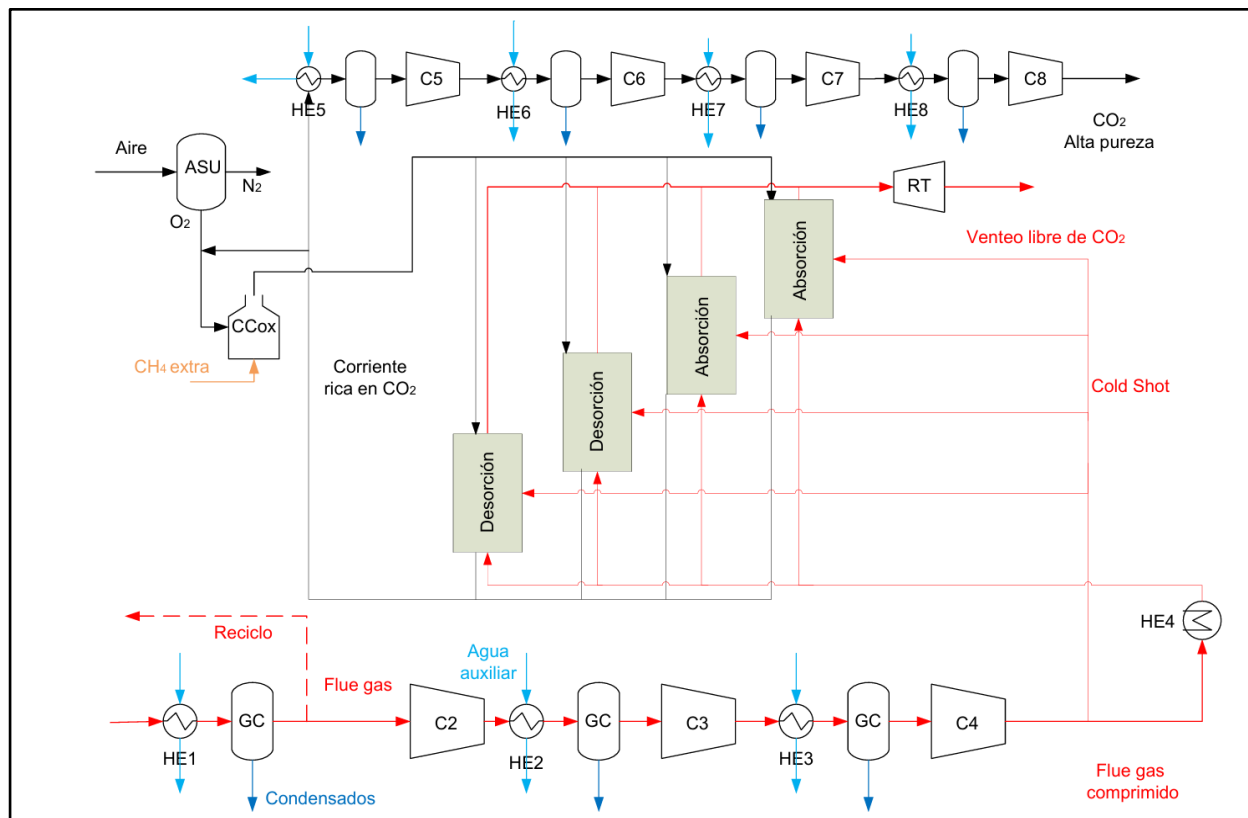


Fig. 15. Modelo de captura de CO₂ post-combustión para una central térmica [Fuente: PROICO 14-1623, proporcionado por María Laura Rodríguez].

Partiendo de esta introducción, el trabajo se concentra en la etapa central del modelo como base y fuente de información, enfatizando sobre el proceso de captura propiamente dicho. En la Figura 16 dicha sección se ha delimitado con un recuadro azul, para identificarla con mayor facilidad. Por fuera, en los cuadros de línea punteada gris, están las etapas descritas de acondicionamiento (por debajo, *tren inferior*) y post-tratamiento de gases (por encima, *tren superior*).

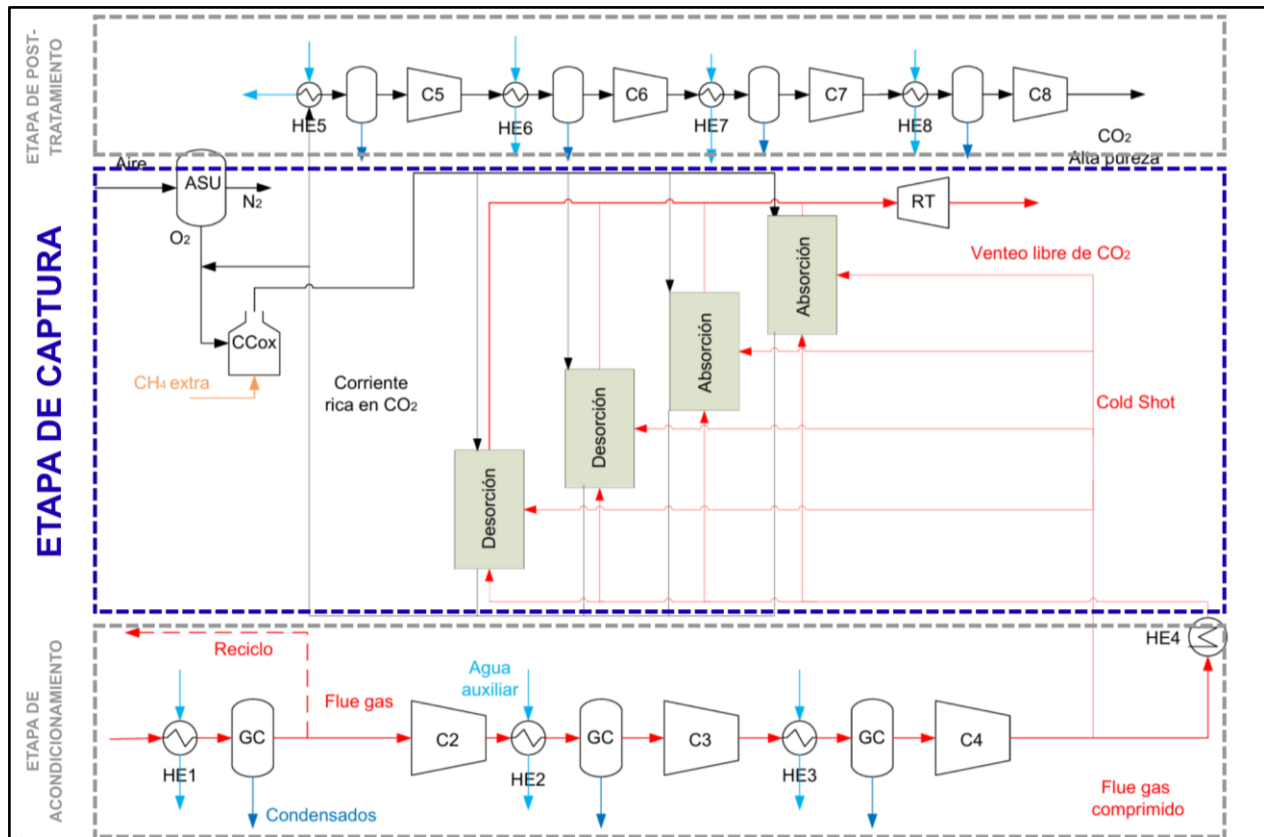


Fig. 16. Diferenciación de las etapas del Modelo de captura de CO₂ post-combustión [Fuente: PROICO 14-1623, proporcionado por María Laura Rodríguez].

2.2 Layout de la planta

Una vez definido y entendido el proceso, el siguiente paso consistió en establecer una aproximación a la disposición de planta, que permitiera comenzar a trazar la distribución de los elementos implicados. Esto derivó en algunas modificaciones respecto del modelo planteado inicialmente. Si se vuelve sobre la Figura 15, en cercanía a las columnas aparece una unidad de separación de aire convencional (ASU - permite obtener O₂ puro a partir de la separación del aire), seguido de una cámara auxiliar de combustión (CCox), destinada a proporcionar calor durante el proceso de desorción. Sin embargo, esto último fue sustituido por quemadores independientes para cada columna, que serán alimentados por una línea general de O₂, sumado a las corrientes de Metano y Reciclo de CO₂, como se verá a continuación. Estos cambios buscan mejorar el control sobre variables críticas, como ser temperatura y presión del recinto. Al independizar la operación entre columnas, la intención es evitar potenciales pérdidas de calor o fugas por transmisión en conductos. Téngase en consideración que, en caso de escalar el modelo de planta hacia uno de mayor envergadura, dicho fenómeno podría verse agravado. Además,

esta configuración también permite aislar fallas y anomalías, evitando afectar al conjunto ante la inminencia de inconvenientes localizados. Modificaciones al margen, la mayor parte del esquema propuesto permaneció inalterada, razón por la cual el layout de planta resultó ser muy similar.

En la Figura 17 puede apreciarse, de manera simplificada, la disposición adoptada. Como se dijo, si bien existen múltiples procesos asociados, aquí se hace foco sobre la etapa de captura propiamente dicha, aislando toda etapa previa o posterior de acondicionamiento de gases. Aclarado esto, se han dispuesto cuatro columnas de absorción/desorción, las cuales operan en conjunto agrupadas de a dos por cada fase. Esto quiere decir que cuando una dupla está en fase de absorción la otra lo está en desorción, y viceversa.

Asimismo, se proponen 7 líneas o tuberías de fluido, esquematizadas en un grupo superior de tres conductos y uno inferior de cuatro. A saber, los mismos representan:

- **Corriente de Coldshot:** corresponde al *Fluegas* proveniente del proceso industrial previo. En este caso, se ha considerado una central térmica de 400 MW, desde la cual se obtiene dicho gas y luego se lo somete a un tren de compresión hasta alcanzar 10 atm de presión. En esas condiciones, la temperatura del gas es de 160°C. Dado que para la operación de absorción es necesario alcanzar un $T_s = 550^\circ\text{C}$, el fluido se somete a una etapa de calentamiento. Sin embargo, existe un *bypass* de *Fluegas* antes de dicha operación, y es lo que se conoce como corriente de *Coldshot*. Su función es regular la temperatura en fase de absorción, por lo que se administra el suministro en función de la necesidad de aumentar o disminuir la temperatura en dicha fase.
- **Corriente de venteo libre:** representa la salida de las columnas en etapas de absorción, en las que el disolvente ha retenido el contenido de CO_2 del *Fluegas* y expulsa el flujo descarbonizado a la atmósfera.
- **Corriente rica en CO_2 :** opuesta a la anterior, es la salida de las columnas en etapa de desorción, luego de regenerar el absorbente sólido para reiniciar el ciclo. A continuación, el CO_2 expulsado atraviesa un tren de compresión para ser almacenado y potencialmente utilizado en aplicaciones futuras.
- **Corriente de metano (CH_4):** es el combustible principal para proveer calor al proceso de desorción hasta alcanzar los 730°C .
- **Corriente de oxígeno (O_2):** se combina con el metano para formar la combustión en el quemador situado en la base de cada columna.

- **Corriente de reciclo de CO₂:** una parte del gas de escape en etapa de desorción (corriente rica en CO₂) es derivado para completar la operación. Se utiliza para diluir el flujo de oxígeno puro (35% en base molar sobre el flujo de alimentación), permitiendo moderar la temperatura de combustión en los quemadores durante la fase de desorción.

Adicionalmente sirve como corriente de arrastre del gas generado por reacción en la columna, no puede usarse otro gas debido a que luego sería necesario separar CO₂ nuevamente.

- **Corriente de *Fluegas*:** considera al gas de proceso post-calentamiento, a 550°C listo para ser tratado en fase de absorción.

Tomando en consideración lo anterior, se observa que cada columna posee 3 entradas y una salida. Esta última está representada en la parte superior, mediante una válvula derivadora de 3 vías (una entrada - dos salidas) que permite direccionar el flujo de escape según se esté en fase de venteo libre o venteo de CO₂.

Por su parte, luego se tiene una entrada lateral correspondiente a la corriente de *Coldshot*, comandada por una válvula reguladora de caudal. Mismo caso para la entrada de *Fluegas*, situado en la base de cada columna junto al quemador. Cada quemador posee 3 entradas (CH₄, O₂ y reciclo), las cuales poseen su correspondiente válvula reguladora.

Cabe recalcar que esta es una representación didáctica del proceso realizada en Microsoft Visio, a fines académicos para su entendimiento y análisis. En la Figura 17, las 2 primeras columnas se presentan en absorción (válvulas de *Fluegas* y *Coldshot* abiertas, coloreadas en negro), mientras que las últimas dos están en desorción (quemadores habilitados, válvulas de *Fluegas* y *Coldshot* cerradas, sin marcar).

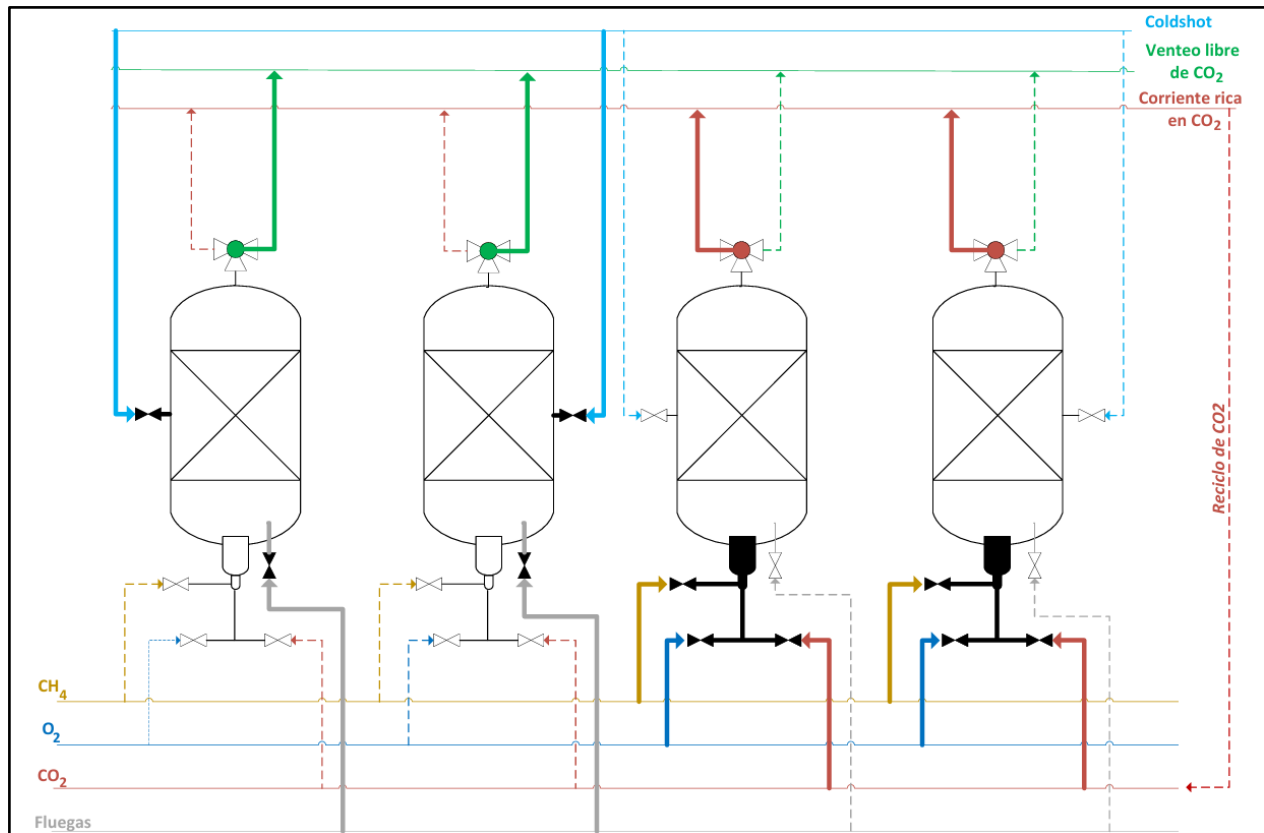


Fig. 17. Representación del layout de planta, diseñado en Microsoft Visio.

2.3 Condiciones operativas de planta

Tanto sea para las fases de absorción como de desorción, es necesario considerar ciertas variables críticas de proceso, en función de las cuales operan las columnas para completar sus ciclos de trabajo. Se tomarán como tales las siguientes variables:

- Temperatura
- Presión
- Concentración de CO_2 (ppm) como **presión parcial de CO_2** ($p\text{CO}_2$).

Asimismo, se tienen valores de referencia como parámetro para cada variable, los cuales determinan las acciones de control y regulan la operación de la planta. Estos valores son específicos para cada operación en cuestión.

2.3.1 Operación en absorción

Se tomarán en cuenta los siguientes *set points* o valores de referencia como condiciones operativas para la fase de absorción en columnas:

- $T_s = 550^\circ\text{C}$
- $P_s = 10 \text{ atm}$
- $p_{\text{CO}_2s} = 0,07 \text{ atm}$

El primer punto de comprobación es la concentración de CO_2 en el flujo de entrada a la columna (corriente de *Fluegas*), debe detectarse la presencia de tal gas para que el proceso de absorción comience. De otro modo no tendría sentido operar y se detiene el sistema, alertando al operario.

Posteriormente, se analiza la temperatura del *Fluegas* a la salida de la columna. En caso que la misma supere a T_s , o bien sea inferior, se deberá regular la corriente adicional de *Coldshot* hasta alcanzar el valor preestablecido.

Una vez establecida la temperatura de referencia a 10 atm de presión (en el interior de la columna), la operación es controlada a partir de la concentración de CO_2 registrada. Mientras la concentración se mantenga en torno al valor de referencia, el proceso avanza sin sobresaltos. En caso de detectar un aumento de concentración por sobre el set point, ello implica el agotamiento de la columna, pues el absorbente habrá saturado. Por tanto, se debe migrar a fase de desorción.

Ahora bien, si se registrara una concentración menor a la especificada por p_{CO_2s} , deberá darse aviso para analizar posibles perturbaciones sobre el proceso (como ser en el caudal o temperatura del fluido), no es una condición normal. Un escenario de este tipo podría surgir ante una falla en el tren de compresión inferior, o bien alguna fuga. En tal caso, preventivamente se deberá detener la operación de absorción, seteando la válvula de salida para expulsar el flujo como corriente rica en CO_2 , y cerrando la corriente de *Coldshot* (si estuviera abierta).

En la siguiente Figura se esquematiza un diagrama de flujos representativo de la operación en absorción.

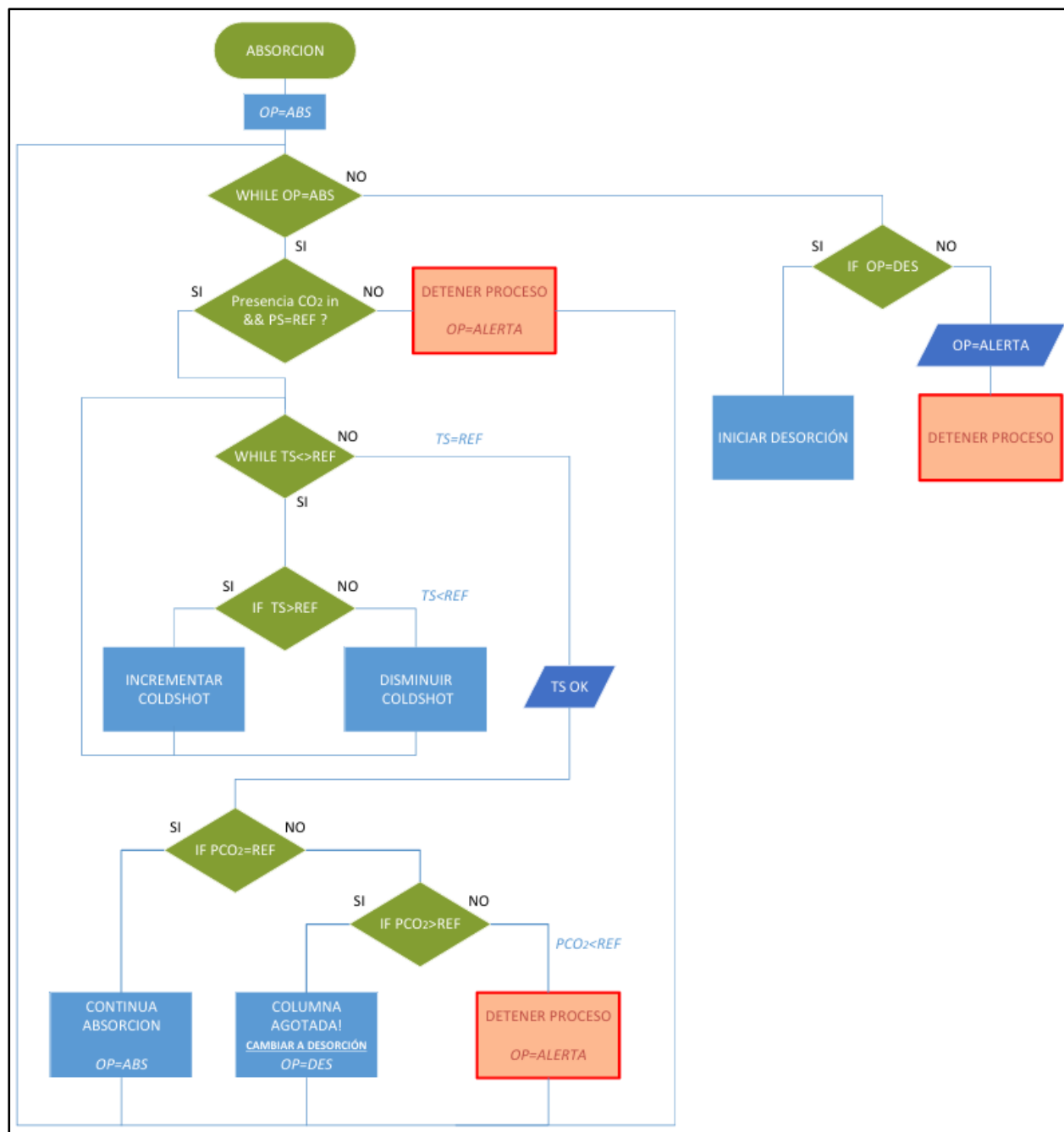


Fig. 18. Diagrama de flujos de la fase de absorción, diseñado en Microsoft Visio.

2.3.2 Operación en desorción

Para este caso las condiciones de referencia operativas son:

- $T_s = 730^{\circ}\text{C}$
- $P_s = 1 \text{ atm}$

- $p_{CO_2s} = 0,83 \text{ atm}$

Al igual que en la etapa de absorción, lo primero que se comprueba es el nivel de temperatura en la columna. El valor de la misma debe ser claramente superior al de la etapa previa, lo cual da lugar a una combustión adicional para alcanzar la referencia de 730°C . En este caso, dicha combustión será regulada a partir del caudal de CH_4 proporcionado a un quemador, donde se mezcla con O_2 y una parte de gas caliente de reciclo de CO_2 . Lógicamente la cantidad de CH_4 a administrar será proporcional en aumento o detrimento de la temperatura.

Habiendo alcanzado la T_s a 1 atm de presión, el proceso dependerá de la concentración medida de CO_2 . Siempre que p_{CO_2s} se mantenga, la operación se realizará de manera normal. A partir de ello se tienen dos posibles escenarios. Si la concentración empieza a disminuir quiere decir que la regeneración del absorbente está avanzando, por lo que la operación debe continuar, siempre y cuando se mantenga dentro del rango de concentración comprendido entre 0,83 y 0,27. Pasado ese límite, la columna debe cambiar a fase de absorción por lo que ingresa nuevamente *Fluegas* al recinto, a la vez que se detiene el suministro del quemador. En contraparte, para el caso que la concentración aumente respecto a la referencia, debe alertarse al operador para revisar el bypass y la posibilidad de fugas o cambios en la temperatura.

Téngase en consideración que esta es una reacción endotérmica, es decir que consume calor. Si habiendo disminuido el suministro de metano la temperatura no disminuye, entonces no hay reacción de desorción y se debe cambiar a absorción (constatando siempre que la concentración sea menor que p_{CO_2s}). Con el mismo criterio, en caso de abrir el paso de metano cuando la temperatura está por debajo de la referencia, la concentración de CO_2 estará por debajo del set point.

En base a lo anterior podría decirse que las posibles perturbaciones radican en cambios sobre el caudal de metano y su consecuente impacto en la temperatura de proceso.

A continuación, se muestra un esquema de las condiciones operativas para el proceso de desorción en la Figura 19.

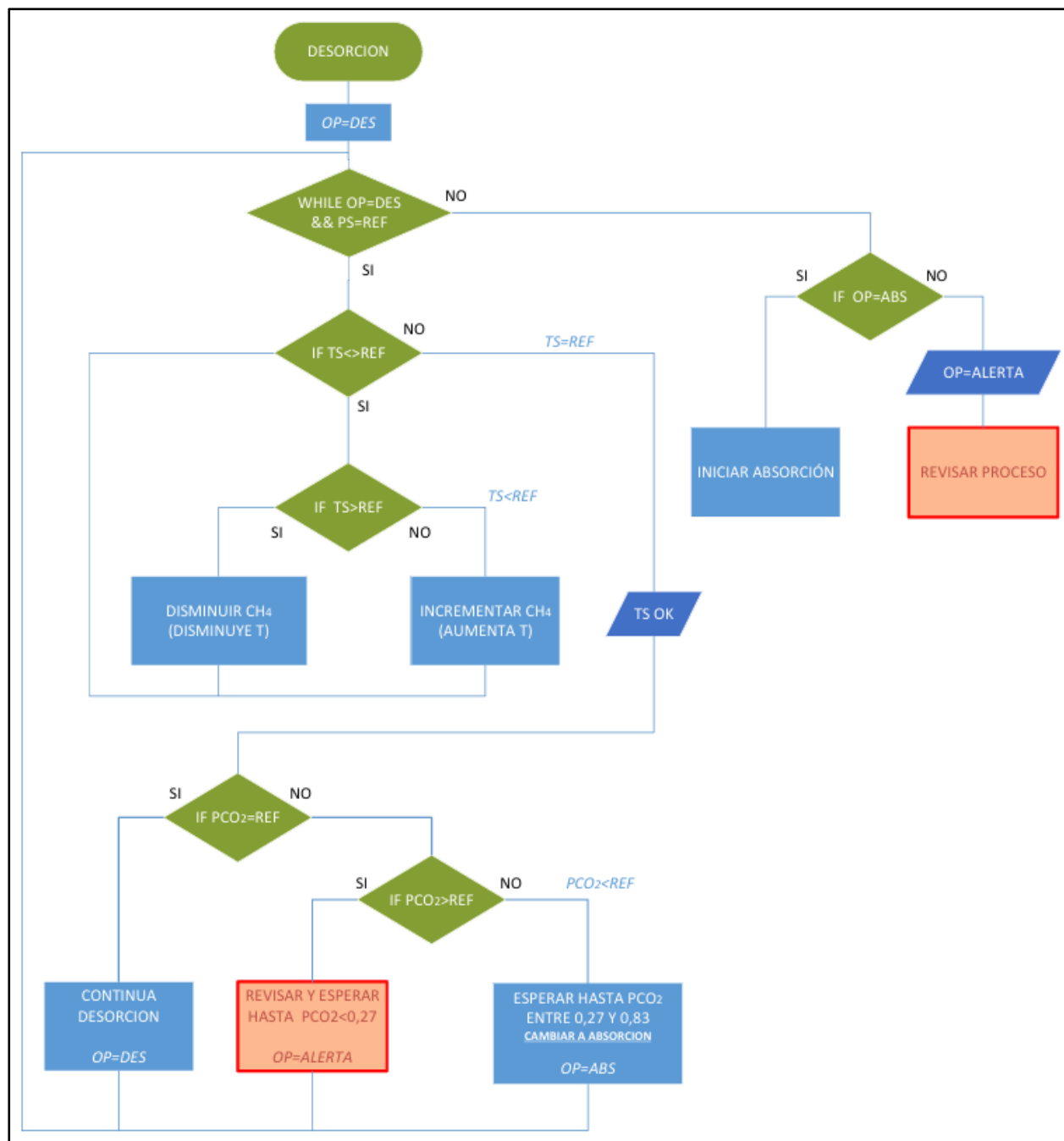


Fig. 19. Diagrama de flujos de la fase de desorción, diseñado en Microsoft Visio.

CAPÍTULO 3: Propuesta de automatización

3.1 Instrumentación Industrial de proceso

Se han determinado los siguientes componentes para monitorear y controlar el proceso mencionado, los cuales resultan adaptables a la planta modelo. Considérese como suposición que esta última ya se encuentra constituida en cuestiones de infraestructura edilicia (como ser cañerías, reactores, calderas, etc), por lo que la selección de equipos se limitará puramente a cuestiones de control y seguimiento del proceso. Se trata de instrumentación a tener en cuenta para su hipotético funcionamiento en condiciones operativas. A continuación, se listan los mismos.

- Medidores de Concentración CO₂
- Válvulas de control tipo mariposa
- Válvulas de derivación (control de triple vía)
- Actuadores eléctricos para válvula
- Sensores de presión
- Caudalímetros
- Termorresistencias
- Transmisores de temperatura
- Liras Pigtail

En la tabla 1 se ordenan los diferentes elementos en base a la codificación adoptada para ser identificados e integrados en la planta y el sistema SCADA.

Tabla 1. Descripción y codificación de Instrumentación Industrial.

CÓDIGO / (EJEMPLO)		DESCRIPCIÓN - INSTRUMENTO
SA - N° / (SA-1)		Salida de columna N° (1) - Válvula de control de 3 vías
	A-SA - N° / (A-SA-1)	Accionamiento de válvula a la salida de columna N° (1) Actuador eléctrico
	T*-SA - N° / (T-SA-1)	Temperatura a la salida de columna N° (1) Transmisor + Termorresistencia tipo 2
	P-SA - N° / (P-SA-1)	Presión a la salida de columna N° (1) Sensor de presión

	Q*-SA - N° / (Q*-SA-1)	Caudal a la salida de columna N° (1) Caudalímetro tipo 2 (Q*) - Pitot
	COS - N° / (C-SA-1)	Concentración de CO ₂ a la salida de columna N° (1) Medidor de concentración
COE - N° / (COE-1)		Concentración de CO ₂ a la entrada de columna N° (1) Medidor de concentración
CS - N° / (CS-1)		Entrada de <i>Coldshot</i> en columna N° (1) Válvula de control tipo mariposa
	A-CS - N° / (A-CS-1)	Accionamiento de válvula en línea de <i>Coldshot</i> N° (1) Actuador eléctrico
	T-CS - N° / (T-CS-1)	Temperatura en línea de <i>Coldshot</i> N° (1) Transmisor + Termorresistencia tipo 1
	P-CS - N° / (P-CS-1)	Presión en línea de <i>Coldshot</i> N° (1) Sensor de presión
	Q-CS - N° / (Q-CS-1)	Caudal en línea de <i>Coldshot</i> N° (1) Caudalímetro tipo 1-Vórtice
FG - N° / (FG-1)		Entrada de <i>Fluegas</i> en columna N° (1) Válvula de control tipo mariposa
	A-FG - N° / (A-FG-1)	Accionamiento de válvula en línea de <i>Fluegas</i> N° (1) Actuador eléctrico
	T-FG - N° / (T-FG-1)	Temperatura en línea de <i>Fluegas</i> N° (1) Transmisor + Termorresistencia tipo 1
	P-FG - N° / (P-FG-1)	Presión en línea de <i>Fluegas</i> N° (1) - Sensor de presión
	Q*-FG - N° (Q*-FG-1)	Caudal en línea de <i>Fluegas</i> N° (1) Caudalímetro tipo 2 (Q*) - Pitot
ME - N° / (ME-1)		Suministro de metano en columna N° (1) Válvula de control tipo mariposa
	A-ME - N° / (A-ME-1)	Accionamiento de válvula en línea de Metano N° (1) Actuador eléctrico
	T-ME - N° / (T-ME-1)	Temperatura en línea de Metano N° (1) Transmisor + Termorresistencia tipo 1
	P-ME - N° / (P-ME-1)	Presión en línea de Metano N° (1) - Sensor de presión
	Q-ME - N° / (Q-ME-1)	Caudal en línea de Metano N° (1) Caudalímetro tipo 1-Vórtice
OX - N° / (OX-1)		Suministro de oxígeno en columna N° (1) Válvula de control tipo mariposa

	A-OX - N° / (A-OX-1)	Accionamiento de válvula en línea de Oxígeno N° (1) Actuador eléctrico
	T-OX - N° / (T-OX-1)	Temperatura en línea de Oxígeno N° (1) Transmisor + Termorresistencia tipo 1
	P-OX - N° / (P-OX-1)	Presión en línea de Oxígeno N° (1) - Sensor de presión
	Q-OX - N° / (Q-OX-1)	Caudal en línea de Oxígeno N° (1) Caudalímetro tipo 1-Vórtice
RE - N° / (RE-1)		Reciclo de CO ₂ en columna N° (1) Válvula de control tipo mariposa
	A-RE - N° / (A-RE-1)	Accionamiento de válvula en línea de Reciclo N° (1) Actuador eléctrico
	T*-RE - N° / (T-RE-1)	Temperatura en línea de Reciclo N° (1) Transmisor + Termorresistencia tipo 2
	P-RE - N° / (P-RE-1)	Presión en línea de Reciclo N° (1) - Sensor de presión
	Q*-RE - N° / (Q*-RE-1)	Caudal en línea de Reciclo N° (1) Caudalímetro tipo 2 (Q*) - Pitot

En la Figura 20 se muestra cómo debería ser la disposición de instrumentación para cada conducto. En el esquema se han representado una válvula de control y los dispositivos de medición necesarios, con su respectivo código según la nomenclatura sugerida.

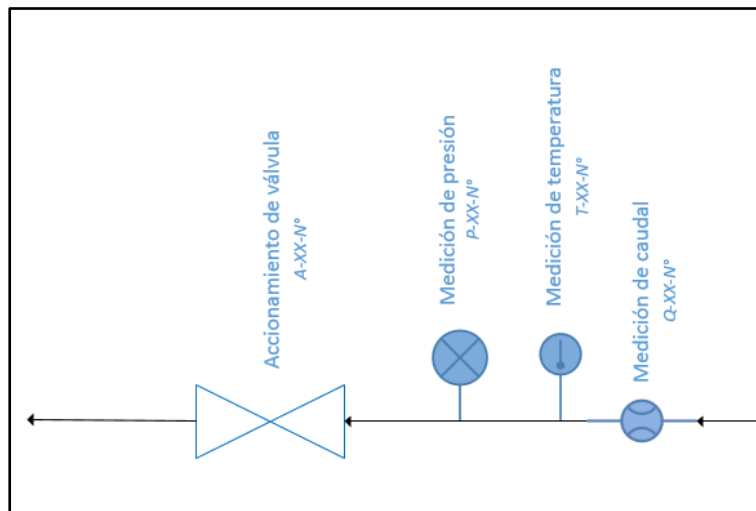


Fig. 20. Esquema de la disposición tipo para instrumentación en los conductos de gas.

3.1.1 Descripción de tecnologías

Para mayor detalle, se procede a describir las diferentes tecnologías y funcionamiento del equipamiento a adoptar en materia de instrumentación.

3.1.1.1 TDLS - Espectroscopía de Laser de Diodo ajustable.

La tecnología TDLS aplicada en sensores, permite detectar la presencia y concentración de gases específicos en un ambiente o cañería. Se trata de dispositivos carentes de partes móviles que posibilitan la toma de mediciones sin contacto, resultando aptos para condiciones severas de operación, como ser altas presiones y temperaturas, ambientes corrosivos, etc [21].

El principio de funcionamiento puede describirse de la siguiente forma. En primer lugar, un láser de diodos emite un haz con una cierta longitud de onda, la cual es regulada en función del gas a medir. Dicho haz atraviesa el medio de circulación del gas, tal que ciertas moléculas de este último absorben parte de la luz. A continuación, una unidad receptora mide la intensidad de luz luego atravesar la corriente de gas. A partir de la cantidad de luz absorbida en una longitud específica de onda es posible determinar la concentración del gas, mediante algoritmos de espectroscopía.

La relación entre concentración del gas y absorción del haz de luz está definida por la Ley de Lambert Beer. La misma plantea las siguientes dos ecuaciones:

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) \quad (2)$$

$$A = \varepsilon CL \quad (3)$$

Donde A corresponde a la absorbancia. Para la ecuación dos, I es la intensidad de luz antes (I_0) y después de atravesar el medio gaseoso (I_1).

En la ecuación tres, ε es un coeficiente de absorción, C alude a la concentración del gas y L responde a la longitud de onda [22]. Es fácilmente observable la relación de proporcionalidad que existe entre la concentración del componente medido y la longitud del camino óptico. En la siguiente Figura se representa la absorción del haz láser al atravesar la corriente de gas, denotando el consecuente detrimento de luz desde el emisor (foco rojo) hacia receptor (ojo)

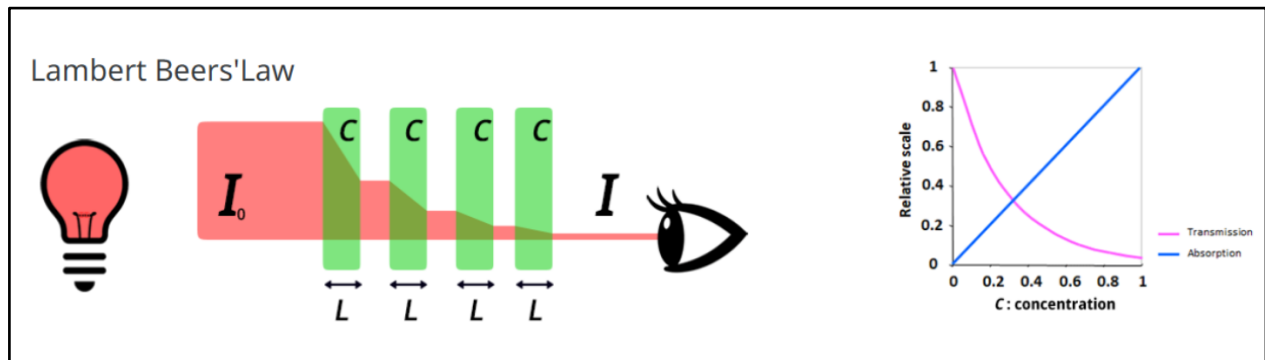


Fig. 21. Principio de funcionamiento de la tecnología TDLS en base a la ley de Lambert Beer
[Fuente:Yokogawa Electric].

La adopción de esta tecnología resulta ventajosa al poder medir en tiempo real, mejorando las posibilidades de control y seguridad del proceso. A diferencia de otros equipos analizadores extractivos que funcionan por muestreo, estos sensores presentan un tiempo de respuesta mucho más acotado, gracias a la medición *in-situ* que favorece al control dinámico. Además, al no haber partes móviles en contacto, el mantenimiento se reduce al mínimo. En este proyecto, se propone adoptar la tecnología TDLS para medir la concentración de CO₂ a la salida de las columnas.

3.1.1.2 Caudalímetros de Vórtice:

Los caudalímetros de vórtice son dispositivos que permiten determinar el caudal de fluidos circulantes a través de una cañería. Para lograrlo, miden la velocidad del fluido en estudio a partir del llamado *efecto Von Kármán*. El mismo plantea que cuando un caudal es obstaculizado por un cuerpo escarpado, se generan turbulencias en el fluido, formando un patrón de vórtices en remolino [23].

Constructivamente, este tipo de caudalímetros posee una obstrucción sobre la trayectoria de flujo mediante una *barra de vertido*. Por tanto, cuando el líquido atraviesa dicha obstrucción se originan áreas de presión diferencial alternativa, denominadas vórtices [24]. Como la frecuencia de formación de estos vórtices resulta proporcional a la velocidad del fluido, el dispositivo detecta dicha frecuencia, y conociendo la sección transversal de la tubería determina el caudal volumétrico. En la siguiente Figura se observan los componentes del dispositivo y un corte en vista superior del mismo para ejemplificar su funcionamiento [25].

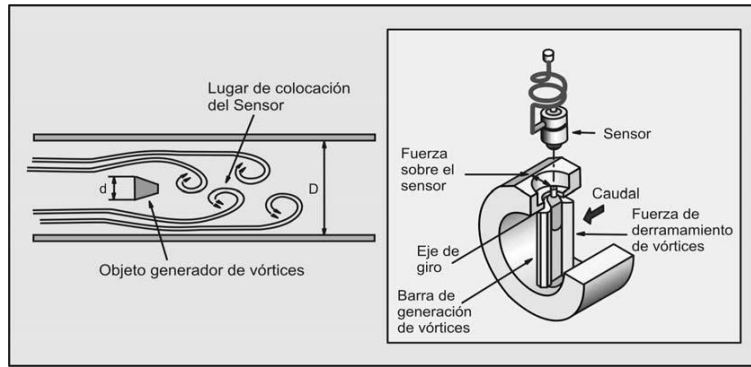


Fig. 22. Componentes y funcionamiento de un caudalímetro de vórtice [Fuente: Research Gate].

La gran ventaja de este tipo de caudalímetros es que no cuentan con partes móviles, por lo que su mantenimiento y susceptibilidad de falla se ven reducidos al mínimo. Asimismo, el dispositivo no ve afectado su funcionamiento por cambios de presión, densidad, viscosidad o temperatura de flujo, y resulta apto para todo tipo de fluidos. Se sugiere su instalación en tuberías rectas con longitudes mínimas de 15 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo. Es muy importante que el medidor quede perfectamente alineado para asegurar su correcto funcionamiento y generación de vórtices.

En este trabajo se sugiere la instalación de caudalímetros de vórtice para las líneas de CH₄, O₂ y Cold Shot.

3.1.1.3 Caudalímetros de Tubo de Pitot promediador:

Estos dispositivos de medición sirven para determinar el caudal de un fluido desde la exploración de su campo de velocidades. Su funcionamiento se basa en determinar la presión dinámica, que resulta de la diferencia entre presiones total y estática, y es proporcional al cuadrado de la velocidad [26].

El instrumento se vale de una sonda colocada al centro de la tubería por la que circula el fluido, con una abertura orientada en contra a su sentido de corriente. Ese punto se denomina *estancamiento*, y en él la velocidad del fluido se anula. Por tanto, la energía cinética de este último se convierte en un aumento de presión dentro del tubo de Pitot. Esta relación responde a la ecuación de Bernoulli, donde P_2 es la presión de impacto o total absoluta, P_1 es presión estática absoluta, ρ es densidad y V la velocidad del fluido en el eje de impacto [25].

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (4)$$

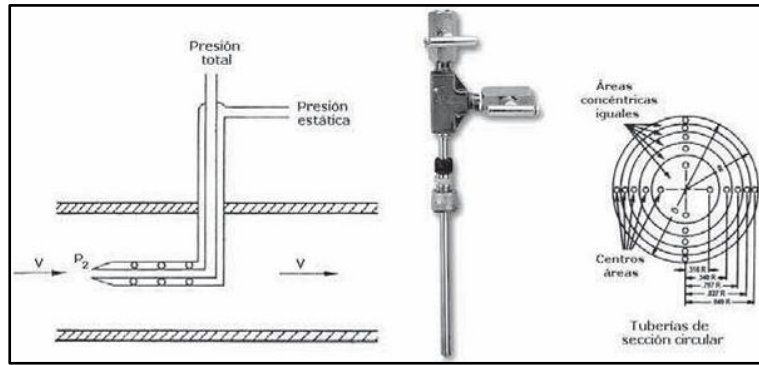


Fig. 23. Disposición y características de un caudalímetro de tubo de Pitot promediador [Fuente: Libro Instrumentación Industrial de Antonio Creus].

A partir de esto se puede obtener la velocidad del fluido, incluso puede adicionarse un coeficiente de velocidad C , que considere la distribución irregular de velocidades, rugosidad de tubería, etc. Se despeja el valor de V_1 , y una vez obtenido se hace el producto por el valor del área de sección transversal de la cañería para determinar el caudal volumétrico (m^3/s).

El tubo de Pitot es de utilidad para ser aplicado en grandes caudales de fluidos con bajas caídas de presión. Para mayor exactitud se pueden efectuar mediciones concéntricas en tuberías de sección circular, y luego promediar las raíces de las velocidades medidas. En el proyecto, estos caudalímetros serán aplicados en las corrientes de *Fluegas* y reciclo de CO_2 debido a su mayor tolerancia a altas temperaturas.

3.1.1.4 Termorresistencias (RTD)

Las sondas de resistencia son dispositivos que permiten medir temperatura a partir de variaciones en la resistencia del propio instrumento cuando detecta cambios de temperatura.

Dichas sondas se constituyen de un arrollamiento conductor muy fino, bobinado entre capas de material aislante, encapsulado en un tubo de vidrio o cerámica. En la Figura 24 se esquematizan dichos componentes [25].

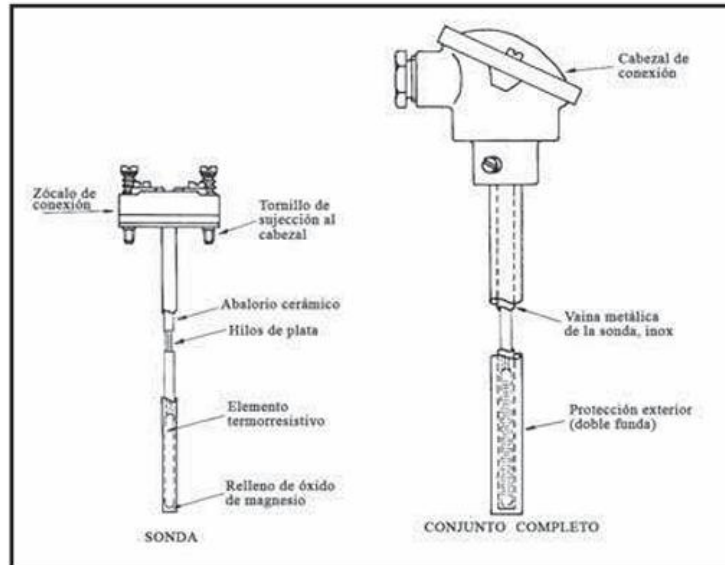


Fig. 24. Componentes de una termorresistencia [Fuente: Libro Instrumentación Industrial de Antonio Creus].

El conductor puede ser de diversos materiales, en cada caso está caracterizado por un coeficiente de temperatura de resistencia. Este determina, a una temperatura especificada, como varía la resistencia en ohmios por cada grado de variación en la temperatura. Lo que se busca es que dicho coeficiente sea elevado para incrementar la sensibilidad del instrumento. Asimismo, se apunta a lograr una relación resistencia-temperatura lo más lineal posible, que garantice mediciones exactas y precisas. Es allí donde el Platino se impone como estándar internacional puesto que permite trabajar en un amplio rango de temperaturas. Generalmente, las sondas industriales de platino poseen una resistencia de 100Ω a 0°C (se denominan Pt100, también las hay Pt500 y Pt 1000). En la siguiente Figura se pueden comparar las curvas de resistencia relativa entre distintos metales.

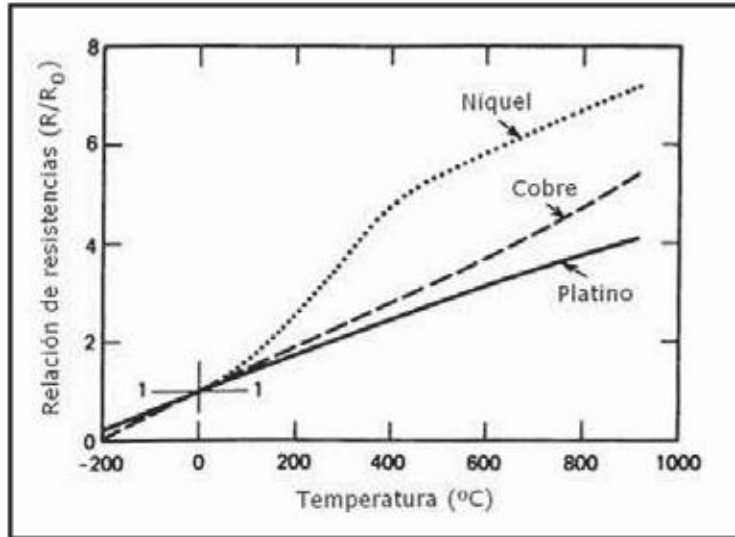


Fig. 25. Curva de relación de resistencias entre metales conductores [Fuente: Libro Instrumentación Industrial de Antonio Creus].

El principio de funcionamiento de la sonda radica en la circulación de corriente a través de la misma, lo cual genera una caída de tensión. Por tanto, la sonda disipa calor y su calentamiento aumenta la resistencia. Para medir la resistencia, las sondas se conectan a puentes Wheatstone u otros circuitos digitales. El puente Wheatstone corresponde a un arreglo de resistencias cuyos extremos están conectados, uno de ellos a una fuente de tensión constante y el otro a un galvanómetro. Si al variar la resistencia el galvanómetro detecta corriente nula, el puente está equilibrado. De este modo es posible conocer el valor de la resistencia a medir haciendo uso de la ley de ohm al igualar las caídas de potencial en los hilos. Existe la posibilidad de montar el puente en configuración de dos, tres o cuatro hilos de sonda conectados al puente, como se muestra en la Figura 26.

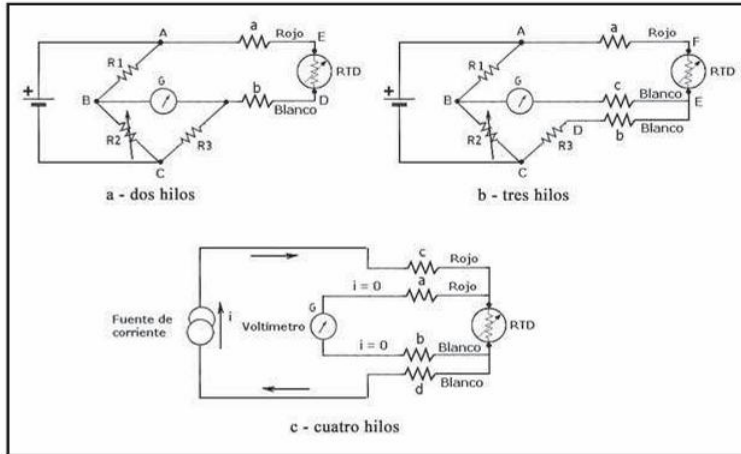


Fig. 26. Configuraciones de puente Wheatstone [Fuente: Libro Instrumentación Industrial de Antonio Creus].

En la Figura 27 se ejemplifica un puente, donde Rx es la resistencia a medir y R2 es variable. Por ley de ohm, al tener G=0 se obtiene la siguiente relación.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x}$$

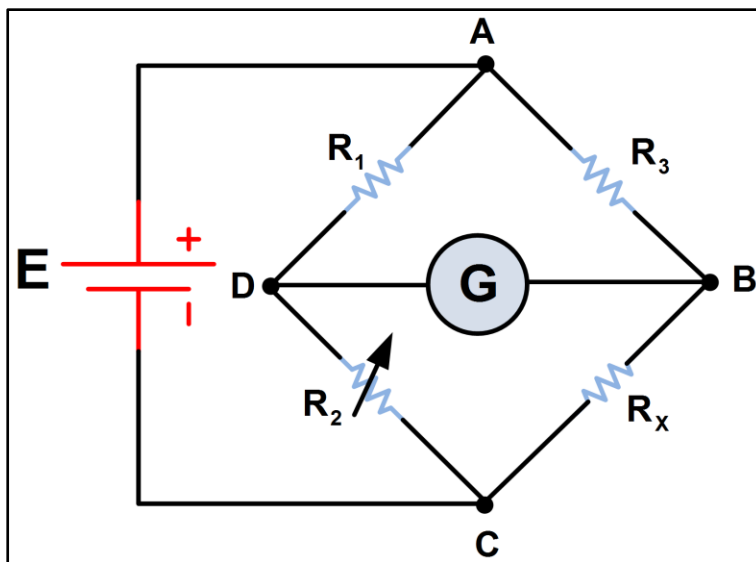


Fig. 27. Disposición de puente Wheatstone convencional [Fuente:<https://electricalacademia.com/> (Accedido: 6-nov-2024)].

3.1.1.5 Sensor de presión diferencial resonante:

Se trata de dispositivos electrónicos para medir la presión a partir de la resonancia mecánica de una estructura [27]. Se componen de tres elementos principales:

- **Elemento resonante:** es la parte del sensor que se deforma bajo presión al entrar en contacto con el fluido de proceso. Para este caso se tiene un diafragma conectado a un material piezorresistivo (cristal de Silicio) que modifica su resistencia eléctrica al ser deformado.
- **Circuito oscilador:** mantiene al elemento resonante en vibración a su frecuencia de resonancia. En caso de haber cambios de presión en el fluido a medir, al deformarse el diafragma se altera la frecuencia de resonancia. La variación de frecuencia es proporcional a la presión aplicada.
- **Circuito de procesamiento de señales:** convierte la señal obtenida en una señal analógica (4-20 mA) o digital para la lectura del valor de presión. De este modo, se envía información para el monitoreo y control en tiempo real.

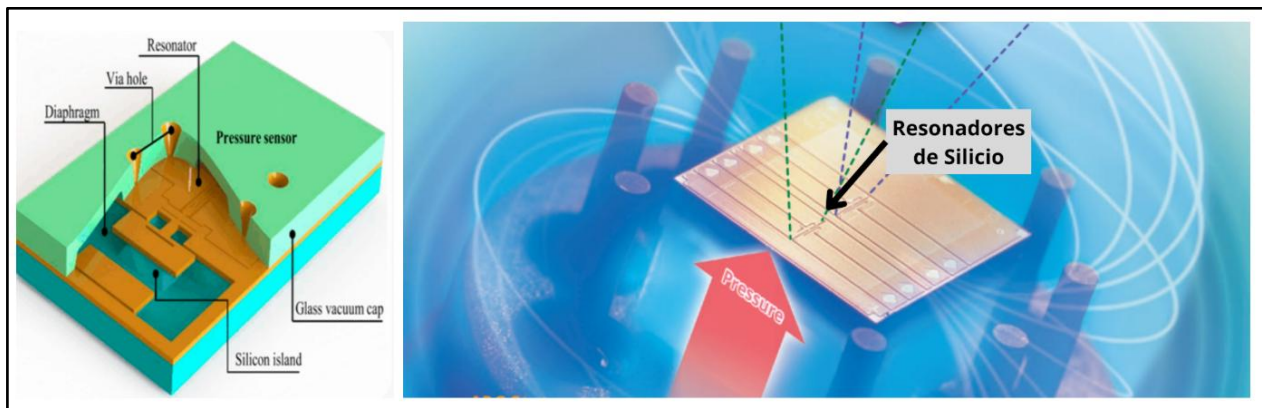


Fig. 28. Componentes de un sensor de presión diferencial resonante [Fuente: Electricity-Magnetism y Yokogawa].

Pueden incluirse además compensadores térmicos para corregir las mediciones en función de variaciones térmicas.

Aún así, en caso de que la temperatura de proceso supere los límites especificados por el instrumento, se sugiere la aplicación de liras o sifones del tipo pigtail o U, que permitan enfriar el fluido para su medición. Se colocan entre la cañería y el propio instrumento de medición para proteger a este último de picos de presión o temperatura (ver Figura 29).



Fig. 29. Lira *pitgail* [Fuente: ASHCROFT].

Básicamente estos sifones generan un cambio de fase del fluido, tal que una parte de este se condensa y por ende pierde temperatura [28]. Para lograr la separación de fases, el sifón suele rellenarse con agua u otro fluido. Es muy importante recalcar que el uso de esta herramienta no altera la medición de presión en absoluto. Si se sugiere purgar el sistema cada cierto tiempo, pero ello tampoco representa inconvenientes en la medición. Existen diversos tamaños y materiales en función de la temperatura de proceso a soportar. Para el presente trabajo es necesario colocar estos dispositivos en las líneas de reciclo de CO₂, *Fluegas*, ColdShot y salida de columnas debido a las altas temperaturas que poseen los gases circulantes.

3.1.1.6 Válvulas de Control:

Tienen la función de actuar sobre el caudal de fluido (variable manipulada) como respuesta a una señal de control determinada. A grandes rasgos puede decirse que estas válvulas funcionan como un orificio con área continuamente variable. Generalmente se componen de un cuerpo que contiene obturador y asientos. El obturador suele ser accionado por un servomotor (comandado por señal neumática, eléctrica, hidráulica, etc). A partir de esto existen múltiples tipos de válvulas de control, principalmente catalogadas entre obturador con movimiento lineal o movimiento rotativo [25]. Para este caso se han seleccionado las siguientes alternativas:

- Válvula de control de 3 vías:** se enmarca dentro de las válvulas con obturador de movimiento lineal, es decir que se mueve en dirección a su propio eje. En el caso de las válvulas de 3 vías, estas pueden utilizarse para mezclar fluidos o bien derivar desde una entrada hacia dos salidas separadas. Este último es el caso de interés para poder derivar las corrientes de salida en absorción y desorción a la salida de las columnas. En la Figura 30 se esquematizan ambas configuraciones.

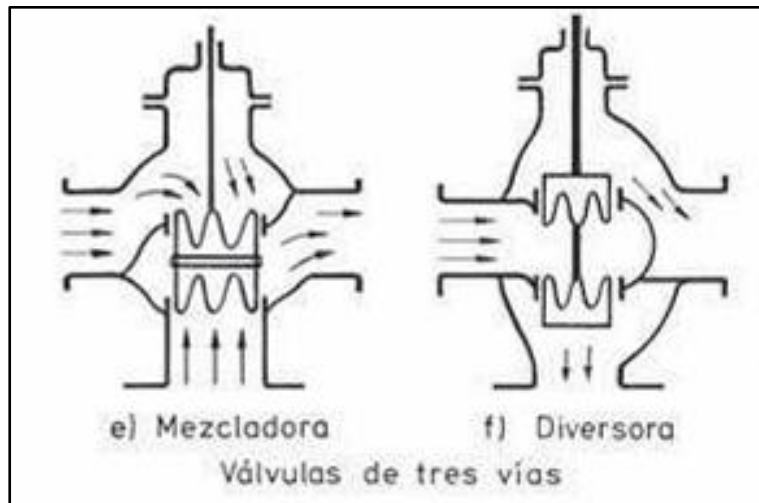


Fig. 30. Tipos de válvulas de 3 vías [Fuente: Libro Instrumentación Industrial de Antonio Creus].

- Válvula de control tipo mariposa:** se trata de un tipo de válvula cuyo obturador es de movimiento rotacional. El cuerpo de este tipo de válvulas se compone de un anillo cilíndrico dentro del cual gira un disco en forma transversal (ver Figura 31). Asimismo, gracias a un anillo de goma adosado dentro del propio cuerpo, la válvula puede cerrarse herméticamente. El eje de giro del disco es accionado por un servomotor que habilita al control de flujo todo-nada (0° - 90°) o bien control continuo (posición variable). La fuerza de par generada por el actuador será proporcional a la presión del fluido circulante. Generalmente este tipo de válvula es elegido para el control de grandes caudales a baja presión. En el presente proyecto, resultan de utilidad como medida de seguridad y control de flujo en las corrientes de CH₄, O₂, *Fluegas*, *Coldshot* y reciclo de CO₂, cada una con su respectiva cañería.



Fig. 31. Representación esquemática de una válvula tipo mariposa [Fuente: Libro Instrumentación Industrial de Antonio Creus].

3.1.1.7 Actuadores Eléctricos:

Se trata de dispositivos electromecánicos que permiten operar válvulas en forma remota. Los hay del tipo multivuelta o un cuarto de vuelta, es este último tipo el que se implementará en el proyecto ya que se utilizan válvulas de giro a 90° . En cualquier caso, el principio de funcionamiento se basa en convertir energía eléctrica en fuerza mecánica para producir movimiento [29].

Estos actuadores poseen un motor eléctrico que transmite un par de giro a la válvula a través de un mecanismo de salida (como ser un eje o vástago). Ello genera la apertura o cierre de la válvula en función de la cantidad de par suministrado. Debe tenerse en cuenta el par de arranque como el valor necesario para vencer la inercia desde una posición estática (válvula abierta o cerrada). Típicamente, se dispone de un juego de engranajes solidario al motor para poder amplificar el par motor, modular la velocidad de rotación y cambiar la dirección de

movimiento. Se utilizan unidades de control encargadas de gestionar la señal eléctrica que recibe el motor para ajustarse a los parámetros mencionados. Esas unidades permiten conectarse vía bus de campo al sistema SCADA para monitorear y controlar el proceso de manera remota, a la vez que disponen de *displays* in situ a modo de HMI. Ante situaciones de emergencia o corte de suministro eléctrico, también poseen un mecanismo de operación manual (suele ser un volante de apertura/cierre) [30]. En la Figura 32, se puede apreciar un actuador eléctrico y sus componentes interiores.

Generalmente, estos equipos disponen de una interfaz o soporte de conexión a la válvula en posición superior, compuesto de un accionamiento de salida, un vástago y brida de atornillado. Pueden ser adquiridos en forma independiente y luego adaptarse o bien venir incorporados de fábrica.

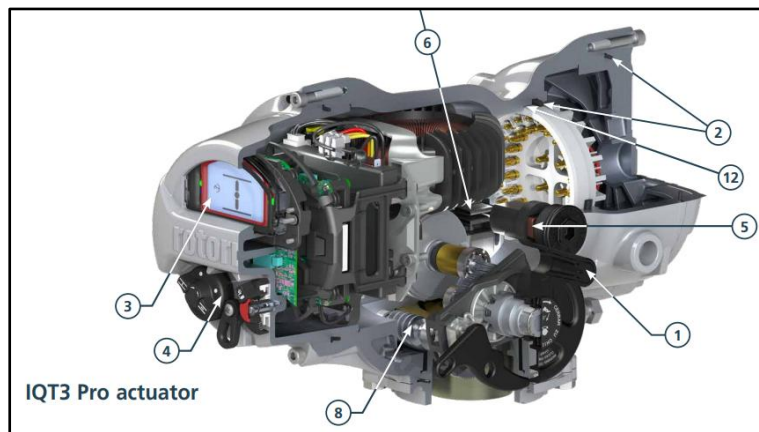


Fig. 32. Detalle de los componentes de un actuador eléctrico Rotork IQ3 Pro: *Comando de operación manual* (1), *Sellos de carcasa* (2), *Display digital* (3), *Comando de control manual* (4), *Batería* (5), *Encoder de posición* (6), *Tren de transmisión* (8) y *Carcasa* (12) [Fuente: Rotork].

3.1.1.8 Transmisores de temperatura:

Estos dispositivos tienen la función de convertir la señal entregada por un sensor de temperatura a una señal analógica o digital para su procesamiento. La señal recibida dependerá del sensor utilizado, pudiendo ser del tipo RTD (en los que se mide como varía la resistencia en forma proporcional a la temperatura) o termopar (a partir del fenómeno termoeléctrico se genera una diferencia de potencial) [31]. Esa señal de entrada atraviesa por un convertor analógico digital, el cual procesa la lectura además de compensar errores (como ser linealidad). A la salida, se puede obtener una señal del tipo 4-20 mA / 0-10 V (analógica) que representa la medición de temperatura dentro de un rango predefinido. Mediante la superposición de señales, es posible

transmitir un protocolo HART (digital) en paralelo con el bucle de 4-20 mA. O bien pueden enviarse datos en forma puramente digital, dentro de algún protocolo de comunicación que permita integrar el transmisor a un sistema de monitoreo y control, como ser un software SCADA, PLCs, etc [32]. Esta última característica es la de mayor valor para adoptar este instrumento en el presente proyecto.

En cuanto a su instalación, los transmisores pueden montarse en cabezal o carril según su aplicación. El primer caso es el más común, ya que se colocan directamente sobre el sensor. De otro modo, el montaje por carril o DIN permite la adaptación a tableros de control.




Fig. 33. Transmisores de temperatura por montaje en cabezal (izquierda) y de carril (derecha) [Fuente: WIKA].

3.1.2 Especificaciones técnicas:

En esta sección se despliegan los datasheets correspondientes a cada instrumento, detallando sus características y condiciones de servicio, a lo que se agregan opciones comerciales recomendadas en base a las prestaciones requeridas para cada caso.


Tabla 2. Especificaciones técnicas de Medidor de concentración de gases.

Denominación	Medidor de concentración de gases	
Código identificador	C-SA - N°	
Servicio	Detectar concentración de CO ₂	
Ubicación	Entrada y Salida de columnas	

Cantidad requerida	8 unidades (2 por columna)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de concentración de CO₂ en entrada y salida de columnas • Temperatura de salida entre 500 y 730°C • Presión de salida hasta 10 atm 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	YOKOGAWA	TDLS8000
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor TDLS para análisis de gases • Campo de detección hasta 30m • Tolera hasta 1500°C • Comunicación vía bus de campo HART y Modbus 	

Fuente: <https://www.yokogawa.com/sa-es>.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de Válvula de control tipo Mariposa.

Denominación	Válvula de control tipo mariposa		
Código identificador	CS - N° / FG - N° / ME - N° OX - N° / RE - N°		
Servicio	Apertura, cierre y regulación de caudal de corrientes de <i>Coldshot</i> , <i>Fluegas</i> , Reciclo y suministro de O ₂ y CH ₄ a quemadores.		
Ubicación	Línea de CH ₄ Línea de O ₂ Línea de CO ₂ rec. Línea de <i>Fluegas</i> Línea de <i>Coldshot</i>		
Cantidad requerida	20 (5 por columna)		
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Caudales hasta 400 kg/s • Temperaturas de hasta 730°C • Presiones de hasta 10 atm 		
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	Batley Valve		BV 10000
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula de movimiento rotacional tipo mariposa • Tolera hasta 1000°C • Posibilidad de accionamiento eléctrico, a pistón, diafragma o manual 		

Fuente: <https://www.trilliumflow.com/product/batley-valve-bv-10000-swingthrough/>.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de Válvula de control de 3 vías.

Denominación	Válvula de control de 3 vías	
Código identificador	C-SA - N°	
Servicio	Derivar corriente de salida a líneas de absorción y desorción	
Ubicación	Salida de columnas	
Cantidad requerida	4 unidades (1 por columna)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Caudales hasta 400 kg/s • Temperatura de salida hasta 730°C • Presión de salida hasta 10 atm 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	Batley Valve	BV 831
Características	<ul style="list-style-type: none"> • 1 entrada común y 2 salidas • Posibilidad de mezclar o dividir corrientes de flujo • Tolera hasta 800°C • Posibilidad de accionamiento eléctrico, hidráulico, neumático o a diafragma • Conexionado por brida, tornillo o soldadura 	



Fuente: <https://www.trilliumflow.com/product/blakeborough-bv830-bv831-three-way-valves/>.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de Actuador eléctrico.


Denominación	Actuador eléctrico	
Código identificador	A-SA - N° / A-CS - N° A-FG - N° / A-ME - N° A-OX - N° / A-RE - N°	
Servicio	Accionar válvulas en forma remota	
Ubicación	Montaje superior en válvulas	
Cantidad requerida	24 unidades (6 por columna, 1 por cada válvula)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Control de caudales hasta 400 kg/s • Accionamiento de válvulas de accionamiento rotativo ¼ de vuelta (0-90°) 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	Rotork IQ3	IQT



Características	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte de protocolos Modbus, Profibus, DeviceNet, Foundation y HART. • Hasta 3000 Nm de par en válvulas de control • Accionamiento automático y manual de emergencia (volante)
------------------------	---


Fuente: <https://www.rotork.com/en/products/electric-intelligent-actuators/iq3/iq3>.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de Sensor de presión.

Denominación	Sensor de presión		
Código identificador	P-SA - N° / P-CS - N° P-FG - N° / P-ME - N° P-OX - N° / P-RE - N°		
Servicio	Medir presión de flujo en conductos		
Ubicación	Conductos de flujo		
Cantidad requerida	24 unidades (6 por columna, 1 por cada línea de flujo de entrada/salida)		
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Soportar caudales hasta 400 kg/s • Temperaturas hasta 730°C • Presiones hasta 10 atm 		
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	YOKOGAWA	EJA-530E	
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Mediciones hasta 160 o 250 bar • Tolera hasta 120°C, requiere protección • Comunicación vía bus de campo HART y Fieldbus 		

Fuente: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services>.


Tabla 7. Especificaciones técnicas de Caudalímetro de vórtice.

Denominación	Caudalímetro de Vórtice - Tipo 1		
Código identificador	Q-CS - N° / Q-ME - N° / Q-OX - N°		
Servicio	Medición de caudal en conductos		
Ubicación	Conductos de flujo de <i>Coldshot</i> , O ₂ y CH ₄		
Cantidad requerida	12 unidades (3 por columna, 1 por cada conducto citado)		

Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> Medición de caudales hasta 400 kg/s Temperaturas hasta 160°C Presiones hasta 10 atm 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	YOKOGAWA	VY c/ sensor de T
Características	<ul style="list-style-type: none"> Medición de Pdif. y T hasta 450°C Comunicación vía bus de campo HART y Fieldbus 	

Fuente: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/>.


Tabla 8. Especificaciones técnicas de Caudalímetro de tubo de Pitot.

Denominación	Caudalímetro de tubo de Pitot-Tipo 2 (Q*)	
Código identificador	Q*-FG - N° / Q*-RE - N° / Q*-SA - N°	
Servicio	Medición de caudal en conductos	
Ubicación	Conductos de flujo de <i>Fluegas</i> , Reciclo de CO ₂ y salida de columnas	
Cantidad requerida	12 unidades (3 por columna, 1 por cada conducto citado)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> Medición de caudales hasta 400 kg/s Temperaturas hasta 730°C Presiones hasta 10 atm 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	KROHNE	OPTIBAR
Características	<ul style="list-style-type: none"> Apto para líquidos, gases y vapor Medición de Pdif. hasta 1150°C Tolera hasta 320 bares Conexión bridada o por soldadura Comunicación vía bus de campo HART y Fieldbus 	

Fuente: <https://krohne.com/es/productos/medida-de-caudal/caudalimetros/>.


Tabla 9. Especificaciones técnicas de Termorresistencia 1.

Denominación	Termorresistencia 1	
Código identificador	T-CS - N° / T-FG - N° T-ME - N° / T-OX - N°	
Servicio	Medición de temperatura en conductos	

Ubicación	Conductos de flujo de <i>Coldshot</i> , O ₂ , CH ₄ y <i>Fluegas</i>	
Cantidad requerida	16 unidades (4 por columna)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturas hasta 550 °C • Presión hasta 10 bares 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	WIKA	TR10-F
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación hasta 600°C • Conexión bridada • Unidad extraíble para tareas de mantenimiento o reparación 	

Fuente: <https://www.wika.com.ar/>.

Tabla 10. Especificaciones técnicas de Termorresistencia 2.

Denominación	Termorresistencia 2	
Código identificador	T*-SA - N° / T*-RE - N°	
Servicio	Medición de temperatura en conductos	
Ubicación	Conductos salida y Reciclo de CO ₂	
Cantidad requerida	8 unidades (2 por columna)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturas hasta 550 °C • Presión hasta 10 bares 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	WIKA	TC10-F
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación hasta 1200°C • Conexión bridada • Unidad extraíble para tareas de mantenimiento o reparación 	

Fuente: <https://www.wika.com.ar/>.

Tabla 11. Especificaciones técnicas de Transmisor de temperatura.

Denominación	Transmisor de temperatura	
Código identificador	T-CS - N° / T-FG - N° T-ME - N° / T-OX - N° T*-SA - N° / T*-RE - N°	
Servicio	Convertir señal de termorresistencia para su lectura	
Ubicación	Montaje sobre termorresistencias	
Cantidad requerida	24 unidades (6 por columna, 1 por cada termorresistencia)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Conversión de señal de resistencia a señal 4-20 mA o digital • Comunicación entre sensor y sistema SCADA 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	WIKA	TIF50 / TIF52
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor + Display de visualización in situ • Comunicación vía bus de campo HART • Montaje en cabezal • Monitoreo de anomalía en sensor y rangos de medición 	



Fuente: <https://www.wika.com.ar/>.

Tabla 12. Especificaciones técnicas de Lira Pitgail.

Denominación	Lira pigtail	
Código identificador	P-SA - N° / P-CS - N° P-FG - N° / P-RE - N°	
Servicio	Proteger sensores de presión de alta temperatura	
Ubicación	Montaje entre manómetro y conductos de <i>Coldshot</i> , <i>Fluegas</i> , Reciclo de CO ₂ y salidas.	
Cantidad requerida	16 unidades (4 por columna, 1 por cada sensor de presión citado)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuir temperatura de flujo por debajo de 120°C (límite sensor de presión) • Soportar temperatura de flujo entre 160 - 730°C • Soportar presiones hasta 10 bar 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	ASHCROFT	Pigtail Siphon 1100



Características	<ul style="list-style-type: none"> • Variedad de materiales según temperatura a tolerar (desde 204°C para acero sin costura hasta 815°C para acero inoxidable 316)
------------------------	---

Fuente: <https://www.ashcroft.com/products/pressure/accessories/>.

3.2 Infraestructura de comunicación:

En esta sección se define el equipamiento concerniente a la red de comunicación industrial para vincular el equipamiento de campo detallado previamente.

3.2.1 Selección de Protocolos:

3.2.1.1 Protocolo HART:

Si se hace una revisión del equipamiento elegido, puede advertirse que la gran mayoría presenta compatibilidad con el protocolo de comunicación HART. Su nombre es el acrónimo de *Highway Addressable Remote Transducer* (Transductor remoto direccionable de alta velocidad), y es un protocolo específicamente diseñado para aplicaciones de medición y control de proceso industriales [33].

Presenta la particularidad de combinar comunicación analógica y digital, es por ello que se le atribuye el concepto de *protocolo híbrido*. Mediante una señal analógica de 4-20 mA es posible transmitir una única variable, a la vez que se agrega información sobre una señal digital. Esto da lugar a un esquema de comunicación bidireccional, ya que mientras la señal analógica es unidireccional del host al dispositivo (o viceversa), la información digital puede viajar en ambas direcciones.

El principio de funcionamiento es el siguiente: sobre el lazo de corriente continua 4-20 mA se superpone una onda sinusoidal con modulación de bajo nivel, la cual permite transportar información digital (ver Figura 34). Esta funciona en base al principio FSK de cambio codificado de frecuencias. Puntualmente, la señal digital se constituye de 2 frecuencias: 1200 Hz y 2200 Hz que representan los bits 1 y 0 respectivamente. Como el valor promedio de las ondas sinusoidales es cero, la señal analógica no se ve afectada en su transmisión, a la vez que incorpora información adicional en formato de bits digitales [34].

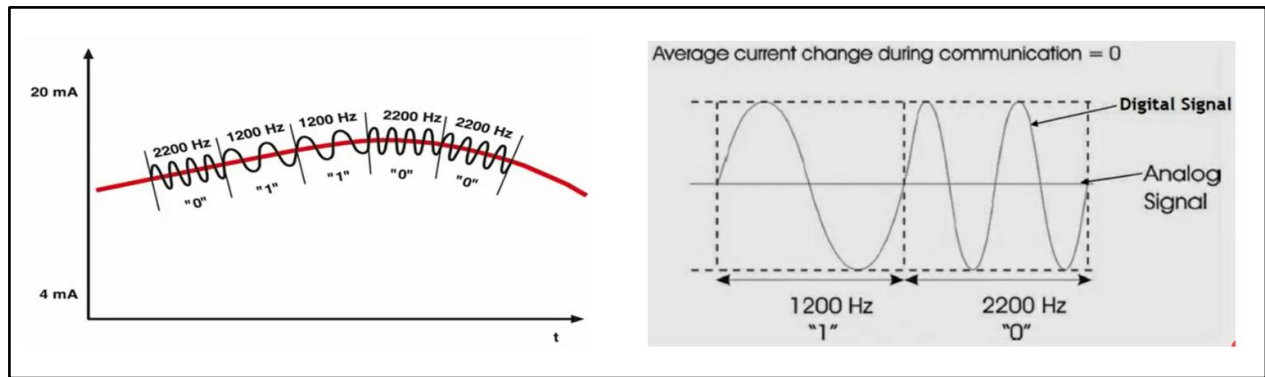


Fig. 34. Principio de funcionamiento del Protocolo HART. Comportamiento de señales
 [Fuente:<https://www.youtube.com/watch?v=l6G1X5C1qbM> (Accedido: 12-dic-2024)].

El sentido de combinar ambos tipos de comunicación es que, además de recibir la variable del proceso a medir, también se incorpora información del tipo:

- Estado de dispositivo y alertas de diagnóstico
- Corriente de lazo y rangos
- Parámetros de configuración

Desde ya, esto ayuda a minimizar la intervención humana y revisiones por mantenimiento, al mismo tiempo que permite detectar posibles anomalías y anticiparse a la toma de medidas correctivas.

Por su parte, el uso del modo digital admite el manejo de múltiples variables haciendo uso de un único par de hilos, habilitando la interconexión de varios dispositivos de campo. Es decir, el protocolo soporta tanto la comunicación punto a punto como multipunto (Ver Figura 35). En tanto, la vinculación entre nodos viene dada por un ordenamiento del tipo maestro esclavo, en la que puede definirse un terminal maestro primario (ej: PC) y otro secundario (ej: dispositivo remoto).

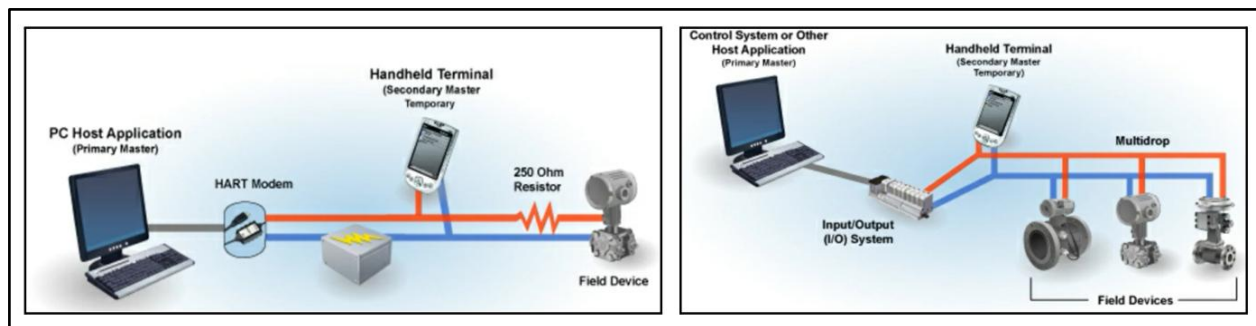


Fig. 35. Esquemas de comunicación punto a punto (izquierda) y multipunto (derecha) [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

HART presenta la gran ventaja de no ser propiedad de ninguna compañía, por lo que se trata de una tecnología independiente, administrada sin fines lucrativos. Su carácter de interoperabilidad permite que diversos dispositivos puedan trabajar en conjunto más allá del proveedor o fabricante particular de cada caso.

3.2.1.2 Protocolo Profinet

Dentro de las muchas opciones que existen a la hora de seleccionar un bus de campo, Profinet se destaca como la variante más utilizada a nivel global, exhibiendo un crecimiento exponencial en cantidad de nodos instalados durante la última década (ver Figura 36) [35].

Desarrollado entre Siemens y empresas miembro de Profibus International, se trata de una tecnología de red basada en Ethernet, para interconectar dispositivos dentro de sistemas automatizados. Su nombre alude a *Process Field Network*, siendo un protocolo que presenta múltiples ventajas para ser aplicado en el ámbito industrial.

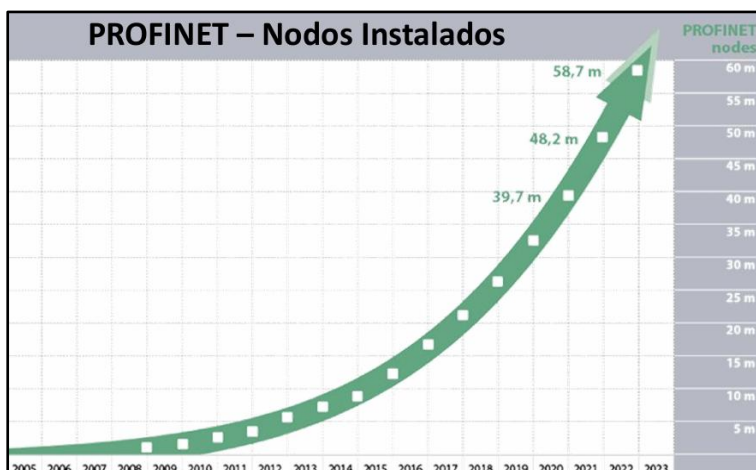


Fig. 36. Evolución de nodos instalados, Protocolo PROFINET [Fuente: apuntes de la asignatura SCADA].

Entre sus principales características, este protocolo proporciona una alta velocidad de comunicación, con un piso de 100 Mbps, lo que permite abordar la ejecución de múltiples tareas o procesos en simultáneo. Asimismo, se trata de un protocolo independiente, que habilita la interconexión de diferentes dispositivos de campo sin importar su fabricante. Gracias a la adopción del estándar Ethernet (IEEE 802.3), se pueden manejar distintos protocolos dentro del mismo sistema y facilitar el flujo de información entre los dispositivos conectados. Desde ya esta es una cualidad que impacta en la escalabilidad de red, además de poder agregar o quitar elementos fácilmente y gestionarlos en base a estructuras jerárquicas complejas. La detección automática de equipos evita tener que configurar los mismos al conectar o desconectar. A todo ello, PROFINET suma funciones avanzadas de supervisión remota, como monitoreo en tiempo real, diagnóstico y análisis predictivo de fallas. Con ello se apunta a optimizar la operación mediante la detección temprana y abordaje de inconvenientes antes de impactar sobre el proceso controlado.

Como red industrial, PROFINET ha sido desarrollado para garantizar comunicaciones determinísticas, es decir que asegura la transmisión de mensajes en un tiempo determinado. El uso de canales de comunicación vía Ethernet permite realizar transferencias rápidas y con tiempos de reacción cortos entre nodos. El retardo que existe entre una entrada y salida (como ser entre un sensor y actuador) es conocido todo el tiempo, contribuyendo a mantener el sistema controlado. Esto reduce los ciclos de trabajo, por lo que el protocolo obtiene mejor rendimiento y disminuye el consumo energético.

Por todas estas cualidades, PROFINET se ha convertido en el estándar de mayor extensión para automatización industrial en el mercado actual [36]. Se perfila además como una red de alta eficiencia, ya que requiere poco ancho de banda para funcionar, sumado a su baja latencia.

En términos de aplicación de PROFINET, debe considerarse el cableado de red para conectar dispositivos entre sí. Como se mencionó repetidas veces, esto se hace mediante el uso de cables Ethernet, sea para conectar equipos individualmente o en conjunto. En este aspecto puede optarse por utilizar cables de par trenzado de cobre, o bien apelar a fibra óptica si se requiere una mayor distancia de cableado e inmunidad a interferencias electromagnéticas. En tanto, para administrar la conectividad y gestionar el tráfico de red se deben incorporar switches PROFINET. Estos poseen características especiales como ser protección contra fallas del sistema, control del ancho de banda y compatibilidad multi-protocolo.

Respecto de la instalación, se destaca por ser modular y flexible, pues no requiere reubicar el cableado en caso de realizar cambios y configuraciones sobre el sistema. Anteriormente se hizo mención de una arquitectura jerárquica de PROFINET, y esto se debe a que se utilizan 2 niveles de red:

- **Nivel 1:** dispositivos conectados directamente al bus de campo, operan como redes locales (LAN).
- **Nivel 2:** controlador que gobierna los dispositivos conectados a la red.

La gestión de los distintos dispositivos desde el controlador se basa en las direcciones internas (MAC e IP) y el nombre asignado para cada uno de ellos. Así, se habilita la detección automática de los mismos, pudiendo agregar o quitar equipos sin generar interferencias en el normal funcionamiento del sistema. En cuanto a la tipología de conexión, esta puede ser del tipo estrella, anillo, árbol o bus.

Otro aspecto valioso de considerar es la capacidad de integración de PROFINET con otros buses de campo. Esto resulta de particular interés para el presente proyecto, puesto que todo el equipamiento seleccionado funciona en base al protocolo HART. Entonces, para la comunicación del sistema se requiere incorporar un adaptador capaz de convertir los mensajes entre las 2 redes. Es decir, se necesita un dispositivo intermediario entre 2 protocolos diferentes; como se mencionó anteriormente, un *gateway* o pasarela. Pero he aquí una particularidad: al trabajar con PROFINET, en su lugar debe utilizarse un dispositivo conocido como *proxy*. En principio, su función es la misma que la de un gateway, al traducir el protocolo de una red externa a PROFINET. La diferencia radica en una asignación de datos estandarizada, tal que mientras un gateway solo se limita a mover datos de entrada/salida, el proxy incorpora alarmas e información de diagnóstico y estado de red. Esta es una gran ventaja para mantener un monitoreo continuo del sistema y su funcionamiento. En el caso de los gateways, el mapeo de datos debe configurarse y guardarse en un formato según cada proveedor, pues PROFINET no posee información sobre lo que hay del otro lado de la pasarela. Esto implica que no puedan guardarse ni mantener asignaciones del dato.

Un detalle importante es que el proxy funciona como un dispositivo PROFINET, comportándose como *terminal maestro* HART para el equipamiento conectado aguas abajo. Es decir, el proxy implementa una estructura y mapeo de datos definido por PROFINET,

representando a cada dispositivo HART como un nodo real dentro de la red PROFINET. De este modo, los equipos de campo pueden integrarse al bus sin necesidad de cambiar ningún componente o configuración [37].

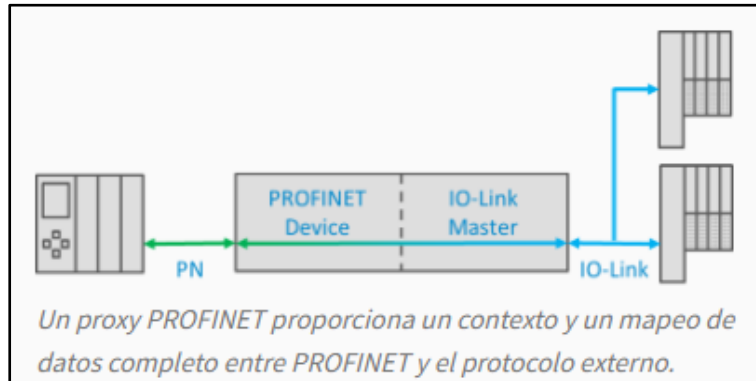


Fig. 37. Esquema de integración entre proxy PROFINET con protocolos externos

[Fuente:<https://profinetuniversity.com/> (Accedido: 12-dic-2024)].

3.2.2 Selección de equipos para red:

En función del tamaño de la planta modelo y las operaciones a controlar, se propone una arquitectura de red constituida por un PLC que administre el control de todo el proceso, y reporte hacia un servidor en PC para manejar el SCADA. Ambos conectados a un switch PROFINET central, que a su vez reciba datos provenientes de proxys, los cuales distribuyan la información hacia los diferentes equipos de campo. En la Figura 38 se representa un esquema de la disposición descrita. Allí puede apreciarse el conexionado en topología tipo bus, donde la línea verde corresponde al cableado Ethernet para protocolo PROFINET, y la naranja representa a HART. Nótese la disposición de cuatro equipos proxy, esto responde a una segmentación de los dispositivos de campo en cuatro estaciones de trabajo. Por cada columna de absorción/desorción hay un proxy para conectar el equipamiento asociado. Así, en caso de surgir algún desperfecto o realizar tareas de mantenimiento por estaciones, no se verá afectado el resto de la red. Esto permite consolidar un sistema más eficiente, que contemple las exigencias de robustez y disponibilidad que requiere una red de comunicación industrial.

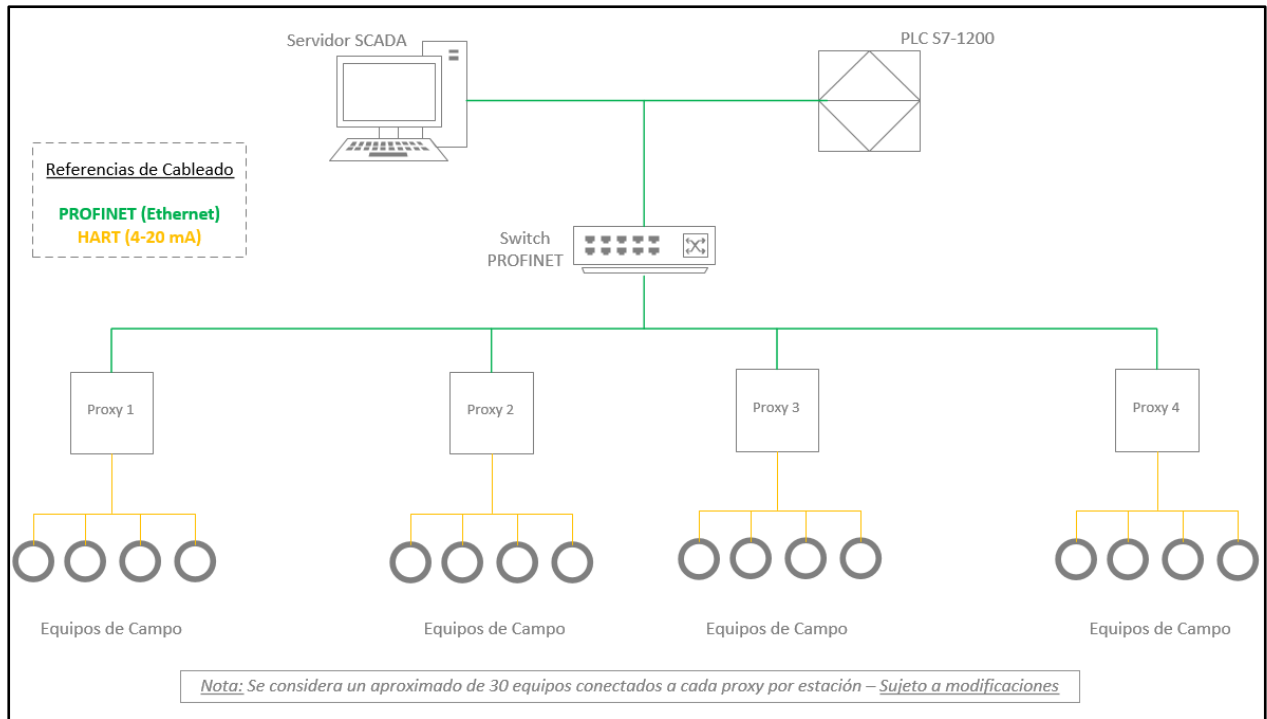


Fig. 38. Esquema de conexión de la red de comunicación, diseñado en Microsoft Visio.

En cuanto al cableado, y particularmente para el bus PROFINET, si bien existe la opción de utilizar fibra óptica, la envergadura del proyecto no justifica su uso en contraste con las buenas y suficientes prestaciones que ofrece el conexionado de cobre. Se considera que la distancia a cubrir no debería exceder los límites de especificación de este último exponente, como así tampoco el caudal de datos.

En forma resumida, el siguiente análisis comparativo aborda las diferencias en cobertura, resistencia a interferencias electromagnéticas, velocidad y mantenimiento entre ambas alternativas:

Tabla 13. Análisis comparativo entre cableado de cobre y fibra óptica.

Característica	CABLE UTP (cobre)	Fibra óptica
Cobertura (distancia)	Hasta 100m (suficiente para la mayoría de plantas industriales)	Extensión kilométrica (ideal para sitios remotos).

Resistencia a EMI	Baja (sensible a interferencias en entornos industriales; puede compensarse con cable STP)	Alta (inmune a EMI, apto para zonas ruidosas)
Velocidad	Hasta 10 Gbps (suficiente para PROFINET IO)	Hasta 100 Gbps+
Mantenimiento	Simple: fácil diagnosticar con testers Ethernet. Sencillo de reemplazar y reparar.	Delicado: sensible a curvas/cambios de dirección; reparaciones onerosas (requiere equipo OTDR).

Respecto a lo económico, la diferencia en el tipo de cable no es muy grande (sujeto a la disponibilidad de proveedores locales o importación), pero los accesorios y terminales de conexión para fibra óptica si son más complejos y costosos que las fichas tipo RJ-45 para cobre.

Por todo esto, el cableado de cobre UTP CAT6 se propone como una alternativa viable, considérese una infraestructura relativamente acotada para la planta de CO₂, que no debería representar un entorno exigente en términos de interferencias, ruidos electromagnéticos, largas distancias, etc. Según los estándares dispuestos por PROFINET se deben adoptar cables de par trenzado de cobre con blindaje certificados y aptos para operar la red.

De este modo, en base a todo lo visto, se sugiere montar una red de comunicación compuesta de los siguientes elementos:


- 1 PLC Siemens SIMATIC s7-1200.
- Una PC + software PULSE como servidor SCADA .
- 1 switch PROFINET.
- 4 proxies (1 proxy por estación).
- Cableado de cobre Ethernet PROFINET, par doble (4 hilos) CAT 6 .
- Cableado de cobre 4-20 mA HART, par simple (2 hilos).
- Ficha conectora RJ45 para red PROFINET
- Borne de paso apto para riel DIN (red HART)

A continuación, se detallan las especificaciones técnicas con las que debería cumplir cada instrumento, detallando sus características principales y condiciones de servicio. Se anexan modelos comerciales sugeridos para su potencial implementación.

Aquí una aclaración respecto de la red y equipamiento detallado: el mismo constituye únicamente una sugerencia, por lo que no resulta ser la única opción válida. Sin embargo, en función del servicio que debe prestar la red, estas opciones resultan adecuadas a una relación costo-disponibilidad-beneficio lo más racional posible. Se ha contemplado garantizar la operación del sistema y brindar posibilidades de expansión en caso de ser necesario. Por ello, la mayoría de los equipos exceden los requisitos de red en cierta medida, pero sin perder de vista los alcances de su aplicación concreta. Esto no quita que el sistema pueda mejorarse al momento de su aplicación (por ejemplo, sustituyendo el cableado de cobre por fibra óptica si fuera necesario).

Otra consideración importante en caso de una futura implementación es el concepto de redundancia. El esquema propuesto describe lo necesario para poner en marcha al sistema de comunicación, sin embargo por cuestiones de seguridad y previsión ante posibles fallas, se aconseja duplicar al menos una parte del equipamiento de red. Ante todo, lo más conveniente sería resguardar el control del sistema, incluyendo PLC y proxies. Desde ya, lo ideal sería contar con un sistema completo de equipos y conexas a modo de contingencia, pero seguramente no sea factible en términos económicos. Por ello se sugiere enfocar el análisis sobre aquellos equipos con mayor exposición en el proceso, puesto que el resto de la red difícilmente se vea afectada por algún factor de riesgo.


Tabla 14. Especificaciones técnicas de PLC.

Denominación	PLC	
Código identificador	PLC - N°	
Servicio	Control del proceso: <ul style="list-style-type: none"> ● Procesar señales de campo ● Ejecutar algoritmos y lógica de control ● Manejo de comunicación PROFINET 	
Ubicación	Conexión a Switch PROFINET	

Cantidad requerida	1	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> ● Controlar al menos 120 entradas y salidas (30 por bloque) ● Requiere compatibilidad con protocolo PROFINET 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	SIEMENS	SIMATIC S7-1200
Características	<ul style="list-style-type: none"> ● Arquitectura modular de expansión y comunicación ● PROFINET integrado ● Admite hasta 248 entradas/salidas ● Programación Ladder, Texto estructurado, diagrama de bloques y Grafset. ● Memoria de 50-100 KB 	

Fuente: <https://www.siemens.com/>.


Tabla 15. Especificaciones técnicas de Servidor PC.

Denominación	SERVIDOR PC	
Código identificador	SERV - N°	
Servicio	Interfaz de supervisión, monitoreo y control: <ul style="list-style-type: none"> ● Recepción de datos de PLC ● Visualización de proceso ● Registro de datos y eventos ● Gestión de alarmas y notificaciones 	
Ubicación	Conexión a Switch PROFINET	
Cantidad requerida	1	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> ● Arquitectura cliente-servidor para centralizar supervisión y distribución de datos ● Soporte multiprotocolo ● Gestión de datos en tiempo real ● Interfaz web + acceso remoto ● Registro de históricos y alarmas 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	Ver Dell PoweEdge R240	
Características	Se sugieren las siguientes especificaciones de hardware para PC: <ul style="list-style-type: none"> ● Procesador de múltiples núcleos, al menos 64 bits ● Memoria RAM desde 16 GB ● Almacenamiento libre en disco desde 25 GB: soportar software+registros+historicos 	

	<ul style="list-style-type: none"> • Tarjeta gráfica de alto rendimiento • Sistema operativo Windows 10, Server 2016 o superiores
--	---


Fuente: https://i.dell.com/sites/csdocuments/Product_Docs/es/poweredge-r240-spec-sheet-es-mx.pdf.

Tabla 16. Especificaciones técnicas de Switch PROFINET.

Denominación	SWITCH PROFINET	
Código identificador	SW - N°	
Servicio	Centralizar conexión de equipos	
Ubicación	Centro de red hacia servidor, PLC y proxies	
Cantidad requerida	1	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Soportar conexión de al menos 6 equipos: servidor, PLC y 4 proxies • Compatibilidad con protocolo PROFINET 	
Modelos Comerciales sugeridos (marca/modelo)	SIEMENS SCALANCE	<ul style="list-style-type: none"> • XC206-2SFP • XC316-8
Características	<p>Se sugieren dos modelos comerciales en función de las expectativas de expansión de red:</p> <p>El XC206-2SFP cuenta con 6 puertos RJ45 de 10/100/1000 Mbps + 2 puertos SFP adicionales de 1Gbps (apto fibra óptica)</p> <p>El XC316-8 cuenta con 16 puertos RJ45 de 10/100/1000 Mbps + 8 puertos SFP adicionales de 1/ 10 Gbps (apto fibra óptica)</p>	

Fuente: <https://www.siemens.com/>.


Tabla 17. Especificaciones técnicas de Proxy.

Denominación	PROXY	
Código identificador	PRX - N°	
Servicio	Comunicación de protocolos	
Ubicación	Conexión a Switch PROFINET y equipos HART	
Cantidad requerida	4 (1 por estación)	

Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Traducción bidireccional PROFINET-HART • Soportar al menos 24 I/O por estación 	
Modelos Comerciales sugeridos (marca/modelo)	<ul style="list-style-type: none"> • Phoenix Contact • Pepperl+Fuchs 	<ul style="list-style-type: none"> • GW PL ETH/UNI-BUS • LB PROFINET-HART
Características	<p>Se sugieren 2 modelos comerciales en función de las proyecciones de aplicación de red:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En el caso del equipo Phoenix Contact, se cuenta con hasta 40 I/O, y compatibilidad con protocolos PROFINET, Modbus/TCP y HART IP • La alternativa de Pepperl+Fuchs permite conectar hasta 80 I/O con soporte PROFINET y HART IP <p>En ambos casos la conexión de terminales es por ficha hembra RJ45 (cableado de cobre)</p>	

Fuente: <https://www.phoenixcontact.com/> - <https://www.pepperl-fuchs.com>.

Tabla 18. Especificaciones técnicas de Cable Ethernet.

Denominación	Cable Ethernet STP CAT6		
Código identificador	ETH		
Servicio	Transmisión de datos por red PROFINET		
Ubicación	Conexión de red PROFINET: servidor, PLC, switch y proxies.		
Cantidad requerida	Extensión sujeta a envergadura de planta real.		
Datos operativos	Especificación sujeta a protocolo PROFINET: cable doble par trenzado de cobre, Ethernet STP (cable blindado) CAT 5 o superiores		
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	Vention		Cable de Red Cat6a Rj45 Sftp 10gbps
Características	<ul style="list-style-type: none"> • BW hasta 500 MHz • Transmisión hasta 10 Gbps • Longitud de conexión estimada hasta 100m 		

Fuente: www.rednetcorp.com.ar.


Tabla 19. Especificaciones técnicas de cableado de cobre.

Denominación	Cable simple par de cobre	
---------------------	---------------------------	--

Código identificador	STP	
Servicio	Transmisión de datos por red HART	
Ubicación	Conexionado de equipos HART hacia proxies.	
Cantidad requerida	Extensión sujeta a envergadura de planta real.	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> ● Cable de cobre doble hilo (par simple) apto para señales 4-20 mA, STP (blindado) ● Calibre AWG 22 a 16 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	Belden	82841 877500
Características	<ul style="list-style-type: none"> ● BW 0-10 Hz (analógico) y hasta 2200 Hz (digital) ● Transmisión hasta 1200 bps ● Longitud de conexión hasta 1,5 km ● Calibre AWG 20 ● Blindaje anti interferencias EMI 	



Fuente: <https://www.belden.com/>.

Tabla 20. Especificaciones técnicas de ficha conectora RJ45.

Denominación	Ficha conectora RJ45	
Código identificador	RJ - N°	
Servicio	Conexión de red PROFINET	
Ubicación	Equipos de red PROFINET: servidor, PLC, switch y proxies.	
Cantidad requerida	8 (I/O de equipos de red profinet)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> ● Garantizar acople mecánico confiable ● Contar con identificación de pines para evitar errores de conexión ● Compatibilidad PROFINET 	
Modelo Comercial sugerido (marca/modelo)	SIEMENS	RJ45 Industrial
Características	<ul style="list-style-type: none"> ● Conexión rápida Fast Ethernet ● Transmisión de 10/100/1000 Mbps 	

Fuente: <https://www.siemens.com/>.

Tabla 21. Especificaciones técnicas de borne de tornillo.

Denominación	Borne de tornillo o resorte	 
Código identificador	BOR - N°	
Servicio	Conexión de red HART	
Ubicación	Conexión de equipos HART hacia proxies.	
Cantidad requerida	Al menos 48 por estación (conexión a ambos lados para 24 I/O)	
Datos operativos	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte de señales analógicas 4-20 mA con modulación FSK • Compatibilidad con cable AWG 22- 16 (0,5mm² a 1,5 mm²) • Soportar al menos 24V de alimentación 	
Modelos Comerciales sugeridos (marca/modelo)	<ul style="list-style-type: none"> • Phoenix Contact • Weidmüller 	<ul style="list-style-type: none"> • PT 1,5/S • PDL 4
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos modelos son borneras de conexión, en el caso de la primera es a tornillo y la segunda a resorte. • Ambas poseen conexión tipo Push-in • Ambas toleran sección de conector hasta al menos 1,5 mm² • Ambos admiten conexión por riel de montaje DIN 	

Fuente: <https://www.phoenixcontact.com/>.

3.3 Estrategia operativa y secuencia de automatización.

En este apartado se definirá la estrategia y secuencia de automatización en base a las condiciones operativas antes descritas, y el equipamiento implicado en el proceso. A partir de esto, luego se dará forma a los *Workflows* que deben programarse en el software SCADA, como así también plantear un punto de partida para la programación de un PLC a futuro.

Dicho esto, se abordarán las fases de absorción y desorción por separado.

3.3.1 Etapa de absorción

En primer lugar, se definirán las entradas y salidas necesarias a considerar, las cuales se listan en la siguiente tabla.

Tabla 22. Entradas y salidas durante la fase de absorción.

Entradas	START	Botón de Inicio (señal)
	TSA	Temperatura medida (sensor)

	PSA	Presión medida (sensor)
	COE	Concentración de CO ₂ medida a la entrada (sensor)
	COSA	Concentración de CO ₂ medida a la salida (sensor)
Salidas	SA	Válvula de salida (accionamiento)
	FG	Válvula de <i>Fluegas</i> (accionamiento)
	CS	Válvula de <i>Coldshot</i> (accionamiento)
	CHK	Alarma/Aviso de atención (señal)

Con esto se define la lógica de operación, escalonada en 5 pasos, y siguiendo lo desarrollado anteriormente:

1. Inicio de proceso

Se presiona START para abrir la válvula de *Fluegas* y setear la válvula de salida en posición 1 (SA=1)

2. Verificación de CO₂ in

Una vez abierta la válvula de *Fluegas*, si se detecta presencia de CO₂ en recinto (COE=1) se habilita el proceso

3. Control de Presión

- Se verifica que la presión de flujo equipare la referencia de 10 atm, en ese caso se procede a setear la válvula de salida en posición 0 (SA=0) y realizar el control de temperatura.
- Si $PSA \neq REF$ se detiene el proceso y emite alerta para informar al usuario (CHK=1)

4. Control de Temperatura

- En el caso ideal de que la temperatura del gas se equipare a la referencia de 550°C, se procede a evaluar la concentración del gas.

- Si $TSA > REF$, se incrementa el step de *Coldshot* hasta igualar la referencia de 550.
- Si $TSA < REF$ entonces se disminuye el step de *Coldshot* hasta igualar la referencia de 550.

5. Evaluación de concentración

- Si $COSA$ equivale a la referencia, el sistema continúa operando con normalidad
- Si $COSA > REF$, se deben cerrar las válvulas de *Coldshot* y *Fluegas* ($CS=FG=0$), además de setear la válvula de salida en posición 1 ($SA=1$) y switchear a fase de desorción.
- Si $COSA < REF$ debe cerrarse la válvula de *Coldshot* ($CS=0$) y setear preventivamente la válvula de salida en posición 1 ($SA=1$). Además, se alerta al usuario ($CHK=1$)

A fines prácticos, todo esto se resume en la siguiente tabla, donde se identifican las diferentes etapas del proceso de absorción y las condiciones de transición entre las mismas. Este formato permite representar el flujo de proceso en esquema de grafcet, siendo una herramienta de utilidad para proyectar la implementación de un PLC como dispositivo de control. Si bien el objetivo de este trabajo no es abordar la programación de dicho dispositivo, se dejan asentadas las bases para ello, en vista de su potencial aplicación a futuro.

En la Figura 39 se puede visualizar el esquema de grafcet correspondiente a la tabla 23.

Tabla 23. Etapas y condiciones de transición de la fase de absorción.

Etapas	Descripción	Transición
0	Inicio	
<i>Botón de inicio ON</i>		$START=1$
1	Abrir FG y setear SA=1	
<i>Válvula de FG abierta y válvula de salida en posición 1</i>		$FG \neq 0 \ \&\& \ SA=1$
2	Verificar presencia de CO ₂	
<i>Detección de CO₂ en flujo de entrada</i>		$COE=1$

3	Verificar Presión	
<i>Presión medida distinta de set point (10 atm)</i>		<i>PSA <> 10</i>
4	Alertar Presión fuera de referencia (setear CHK=1)	
<i>Presión medida equivalente a set point (10 atm)</i>		<i>PSA=10</i>
5	Setear SA=0 y Comparar TSA	
<i>Temperatura medida fuera de referencia (550°C)</i>		<i>TSA <> REF</i>
6	Ajustar TSA	
<i>Temperatura medida superior a set point (550°C)</i>		<i>TSA > REF</i>
7	Abrir/Aumentar step de corriente de <i>Coldshot</i> (CS)	
<i>Temperatura medida inferior a set point (500°C)</i>		<i>TSA < REF</i>
8	Cerrar/Disminuir step de corriente de <i>Coldshot</i> (CS)	
<i>Temperatura medida equivalente a set point (550°C)</i>		<i>TSA = REF</i>
9	Comparar Concentración de CO ₂	
<i>Concentración de CO₂ out (COSA) inferior a set point (0,07 atm)</i>		<i>COSA < REF</i>
10	Alertar (setear CHK=1), cerrar CS y setear SA=1	
<i>Concentración de CO₂ out (COSA) equivalente a set point (0,07 atm)</i>		<i>COSA = REF</i>
11	Continuar proceso de absorción (condiciones normales)	
<i>Concentración de CO₂ out (COSA) superior a set point (0,07 atm)</i>		<i>COSA > REF</i>
12	Cerrar FG y CS - Switchear a fase de desorción	

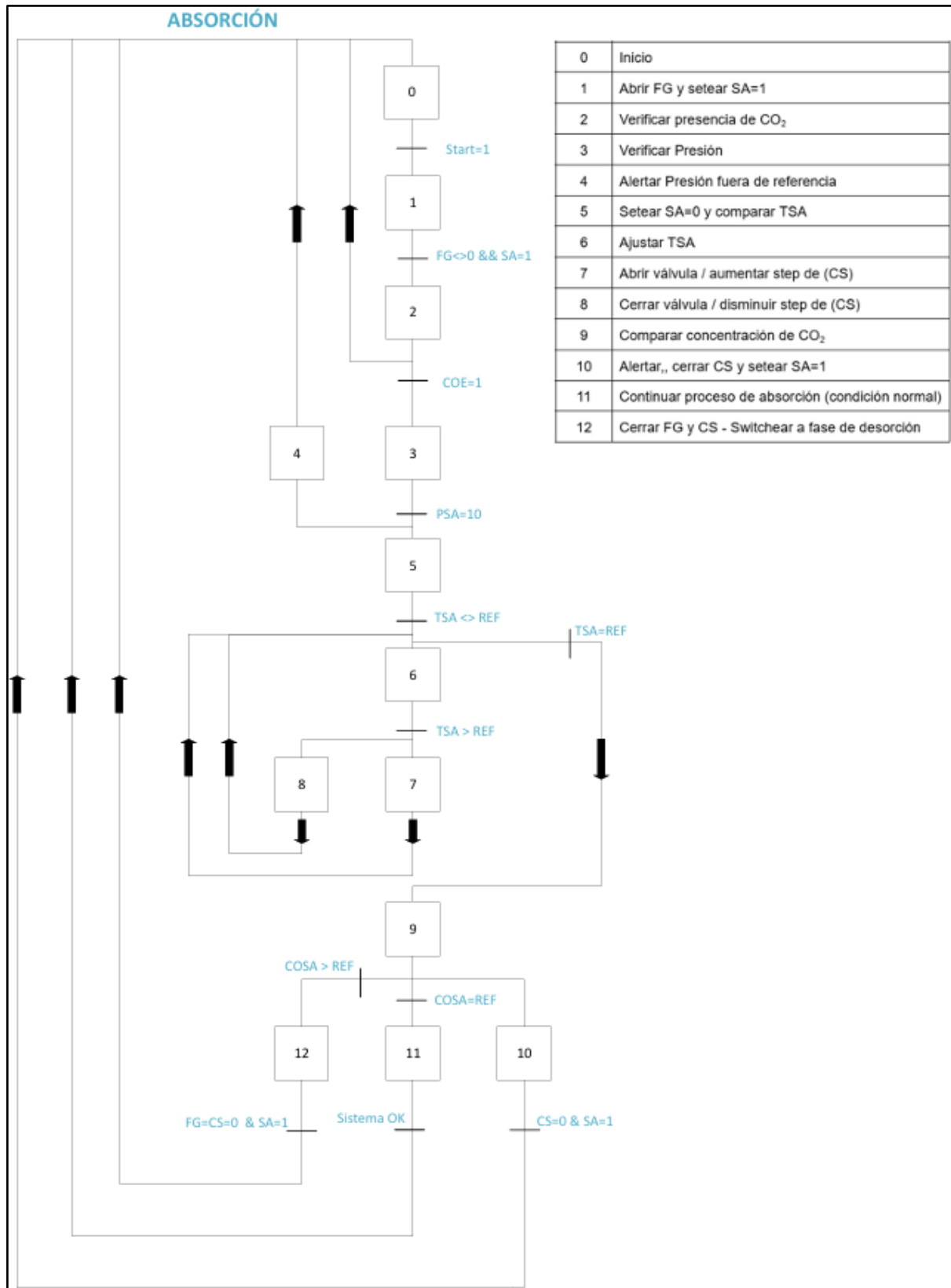


Fig. 39. Esquema tipo grafcet para etapa de absorción, diseñado en Microsoft Visio.

3.3.2 Etapa de desorción:

De igual modo que en la fase anterior, primero se definen las entradas y salidas del sistema.

Tabla 24. Entradas y salidas durante la fase de desorción.

Entradas	START	Botón de Inicio (señal)
	TSA	Temperatura medida (sensor)
	PSA	Presión medida (sensor)
	COSD	Concentración de CO ₂ medida a la salida (sensor)
Salidas	SA	Válvula de salida (accionamiento)
	ME	Válvula de Metano (accionamiento)
	OX	Válvula de Oxígeno (accionamiento)
	RE	Válvula de Reciclo (accionamiento)
	CHK	Alarma/Aviso de atención (señal)

A continuación, se determina la lógica operacional de la siguiente manera.

1. Inicio de proceso

Se presiona START para setear la válvula de salida en posición 1 (SA=1)

2. Control de Presión

- Se verifica que la presión de flujo equipare la referencia de 1 atm, en ese caso se avanza al siguiente paso, el control de temperatura.
- Si $PSA > REF$ se procede a despresurizar el recinto hasta alcanzar la referencia.

3. Control de Temperatura

- Se necesita que la temperatura del gas equipare a la referencia de 730°C, en ese caso se procede a evaluar la concentración del mismo.

- Si $TSA > REF$, se incrementa el step de *Coldshot* hasta igualar la referencia de 730.
- Si $TSA < REF$ entonces se disminuye el step de *Coldshot* hasta igualar la referencia de 730.

4. Evaluación de concentración

- Si $COSD$ se encuentra en el rango de referencia (0,27 a 0,83), el sistema continúa operando con normalidad.
- Si $COSD > REF$, se debe dar aviso al usuario para que revise la evolución del proceso y decida si se requiere intervención ($CHK=1$).
- Si $COSD < REF$ deben cerrarse las válvulas de las corrientes de Metano, Oxígeno y Reciclo ($ME=OX=RE=0$) y switchear a fase de desorción.

Nuevamente, la información se resume en la siguiente tabla, que contiene las distintas etapas del proceso de desorción, y las condiciones de transición entre las mismas. En la Figura 40 se puede visualizar el esquema de grafcet correspondiente a la tabla 25.

Tabla 25. Etapas y condiciones de transición de la fase de desorción.

Etapa	Descripción	Transición
0	Inicio	
<i>Botón de inicio ON</i>		$START=1$
1	Setear SA=1	
<i>Válvula de salida en posición 1</i>		$SA=1$
2	Verificar Presión	
<i>Presión medida distinta de set point (1 atm)</i>		$PSA \neq 1$
3	Despresurizar	
<i>Presión medida equivalente a set point (1 atm)</i>		$PSA=1$
4	Comparar TSA	
<i>Temperatura medida fuera de referencia (550°C)</i>		$TSA \neq REF$

5	Ajustar TSA	
<i>Temperatura medida inferior a set point (730°C)</i>		<i>TSA < REF</i>
6	Abrir/Aumentar step de corriente de Metano, Oxígeno y Reciclo (ME,OX,RE)	
<i>Temperatura medida superior a set point (730°C)</i>		<i>TSA > REF</i>
7	Cerrar/Disminuir step de corriente de Metano, Oxígeno y Reciclo (ME,OX,RE)	
<i>Temperatura medida equivalente a set point (730°C)</i>		<i>TSA = REF</i>
8	Comparar Concentración de CO ₂	
<i>Concentración de CO₂ out (COSD) inferior a rango de set point (<0,27 atm)</i>		<i>COSD < REF</i>
9	Cerrar ME, OX y RE - Switchear a fase de absorción	
<i>Concentración de CO₂ out (COSD) dentro de rango de set point (0,27 atm < REF < 0,83 atm)</i>		<i>COSD = REF</i>
10	Continuar proceso de desorción (condiciones normales)	
<i>Concentración de CO₂ out (COSD) superior a rango de set point (>0,83 atm)</i>		<i>COSD > REF</i>
11	Alertar concentración por sobre set point (setear CHK=1)	

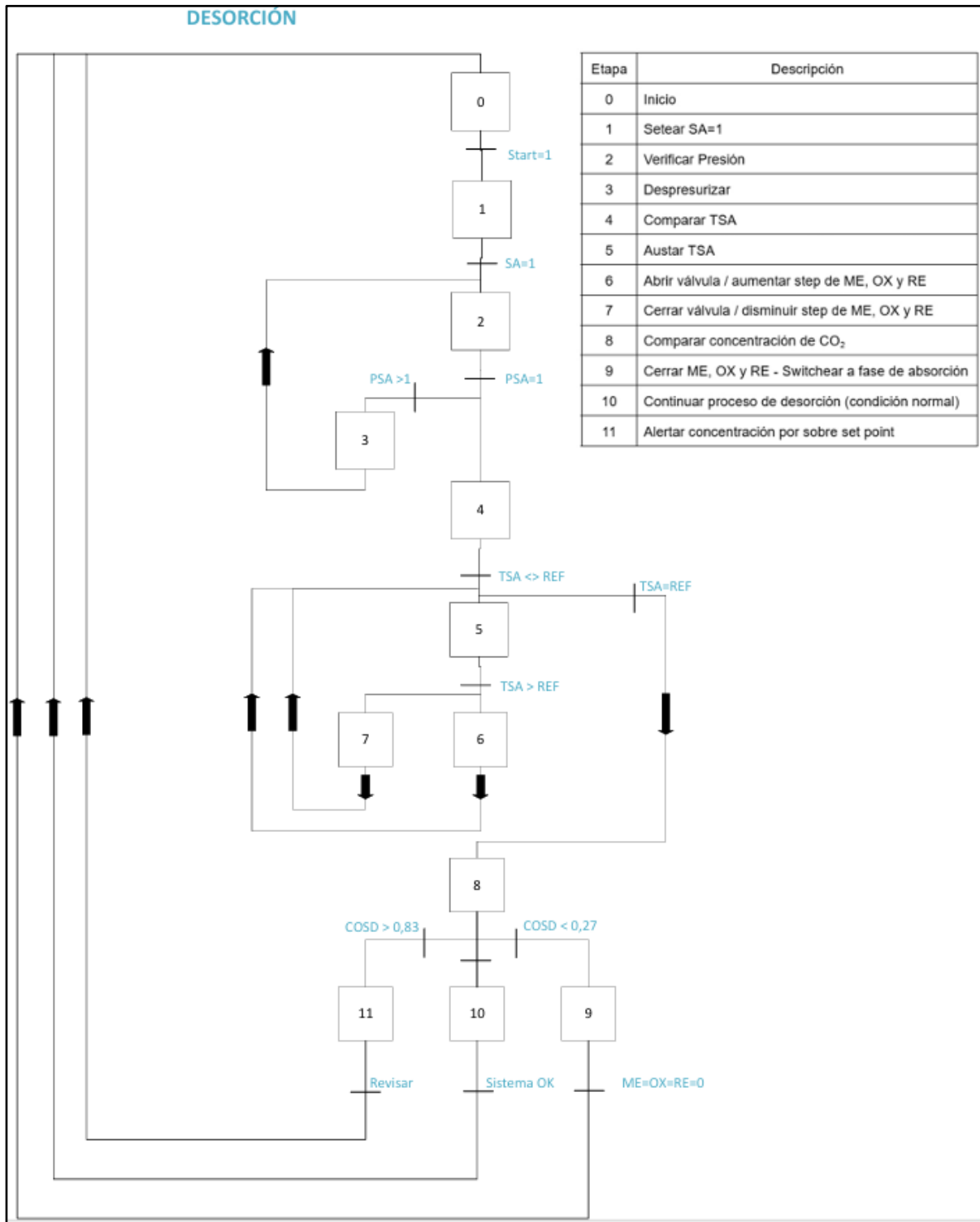


Fig. 40. Esquema tipo grafcet para etapa de desorción, diseñado en Microsoft Visio.

CAPÍTULO 4: Desarrollo del sistema SCADA

4.1 Consideraciones preliminares de diseño

En este apartado se procede a detallar el proceso de diseño y desarrollo del SCADA para la planta modelo que concierne a este trabajo. Antes de comenzar, resulta importante plantear la alineación de dicho proceso con los estándares dispuestos por el comité ISA 112 para sistemas SCADA. Particularmente, el estándar ISA 101 se enfoca en el apartado gráfico de estos sistemas, sentando las bases necesarias para el diseño de interfaces, tomando los principios que rigen a la Ingeniería de Factores Humanos y Ergonomía [38]. Ello permite adaptar las interfaces a las capacidades y limitaciones cognitivas y sensoriales del usuario, facilitando el monitoreo y control del proceso sin distracciones, reduciendo la fatiga visual y asegurando la detección oportuna de eventos relevantes.

En este sentido, uno de los principales aspectos a tener en cuenta es el uso del color, que debe ser limitado, funcional y consistente. Se recomienda evitar colores brillantes o llamativos, reservando su uso únicamente para representar información crítica, como ser alarmas (rojo), advertencias (amarillo) o confirmaciones de estado (verde). Esta estrategia no solo mejora la claridad, sino que también contempla a usuarios con deficiencias visuales (como ser daltonismo o presbicia). Por lo tanto, el diseño debe priorizar el monocromatismo y uso de fondos neutros, con detalles en color sólo para elementos relevantes. Esto último resulta apreciable a simple vista en el trabajo presentado, pues como se verá a continuación la mayor parte del diseño se ejecutó en un esquema de colores grises, blanco y negro.

Asimismo, se debe garantizar un contraste adecuado entre fondo y primer plano, evitando distorsiones visuales o cargas cognitivas innecesarias. La implementación de un esquema de codificación visual unificado es esencial, y puede complementarse con otros medios de señalización, como cuadros de texto, sonidos o animaciones, para reforzar la comunicación de eventos.

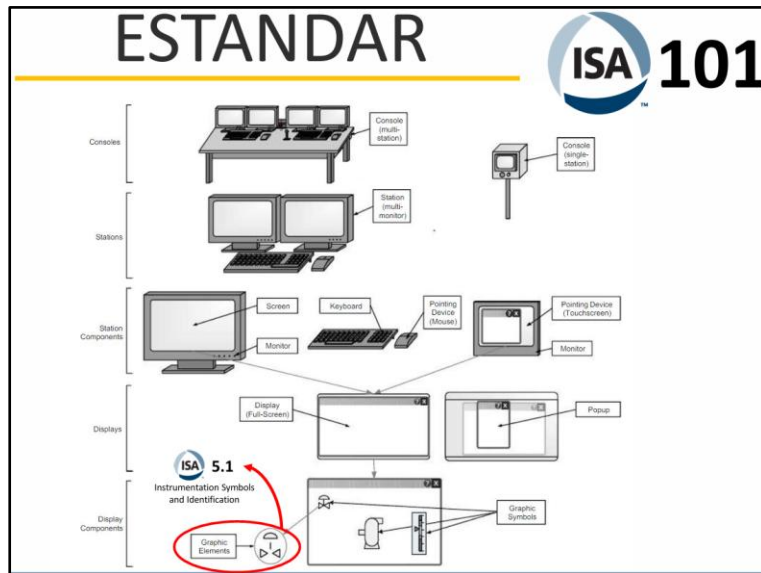


Fig. 41. Estándar ISA 101 para el diseño de Interfaces.

Otro aspecto fundamental es la jerarquía visual, permitiendo destacar información relevante según tamaño y ubicación estratégica de los elementos en pantalla. La organización del contenido debe responder a una lógica operacional clara, segmentando y clasificando la información según su nivel de criticidad y frecuencia de consulta, facilitando una lectura rápida, sin ambigüedades.

Por último, se debe considerar el entorno físico donde se desplegará el SCADA, incluyendo condiciones de iluminación ambiental y otras variables del puesto de trabajo, para asegurar una adecuada visibilidad y ergonomía. La premisa de diseño es enfocarse en la funcionalidad, para lograr una interfaz adecuada a las necesidades del usuario y centrada en el objetivo operativo.

Ahora sí, pasando al desarrollo puntual de este trabajo se utiliza el software PULSE SCADA de AFCON, a través de una máquina virtual ORACLE, cuyas especificaciones pueden apreciarse en la Figura 42. Si bien existen múltiples opciones en el mercado hoy en día, este software dispone de múltiples herramientas y características propias que lo posicionan como una excelente alternativa. Puntualmente, AFCON es una empresa especializada en el desarrollo de softwares de supervisión, control y automatización, con vasta experiencia en aplicaciones industriales multi-proveedor, brindando compatibilidad con diversidad de equipos e instrumentación comercial.

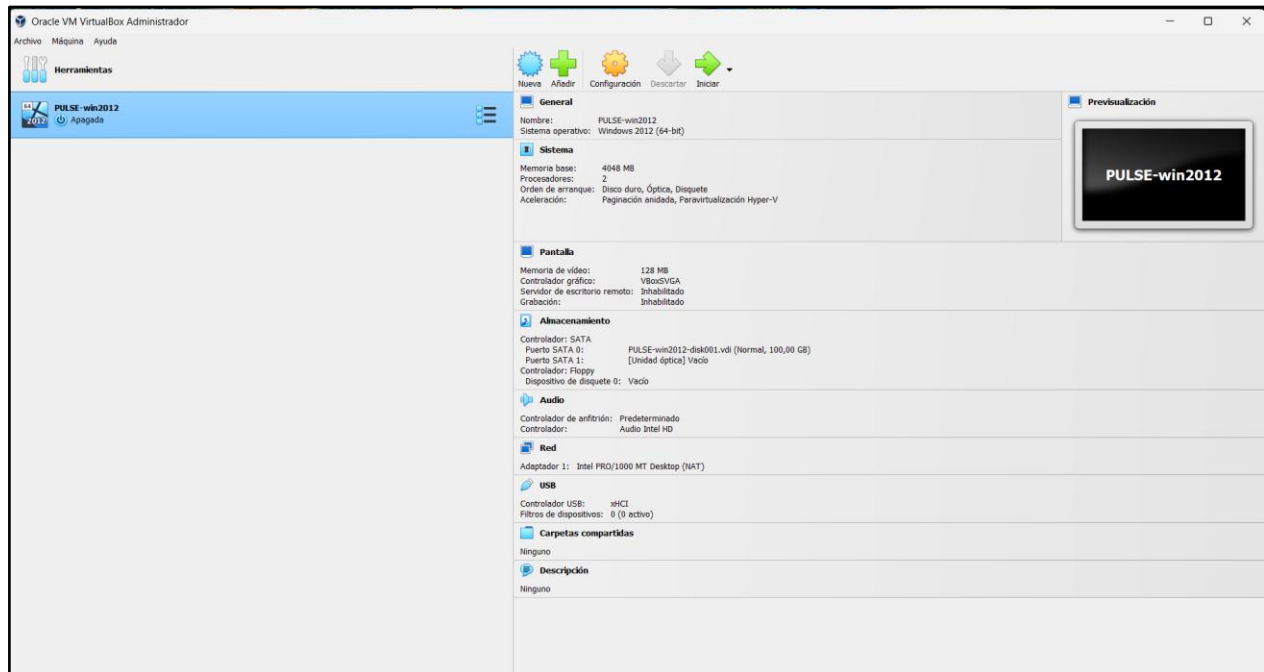


Fig. 42. Inicialización de software PULSE desde máquina virtual ORACLE.

A modo introductorio, el programa consta de dos modalidades principales de uso: **desarrollador** y **operador**. El diseño de pantallas, como así también la configuración de variables y programación de eventos se ejecutan desde el rol de desarrollador, mientras que el modo operador permite simular los distintos componentes del SCADA durante su desarrollo. Existe una tercera opción que es el *modo monitor*, similar al operador, pero con la diferencia de que el usuario solamente se limita a observar ya que no puede interactuar con el programa. Se dispone además de múltiples herramientas satélite que complementan las funcionalidades del software. Entre las más relevantes se pueden identificar:

- **Project:** funciona como gestor de proyectos, permitiendo crear, setear, correr, pausar o eliminar los mismos. Adicionalmente, posibilita la importación de bases de datos, como así también conectar PLCs y sensores digitales que proporcionan valores de entrada a las variables del SCADA.
- **Back up - Restore Wizard:** permite guardar los avances de proyecto de manera tal que se preserven los cambios realizados durante su desarrollo. De este modo, se generan copias (backups) a modo de respaldo ante posibles inconvenientes, las cuales se pueden reestablecer en caso de necesitarlo.

- **Datasheet Manager:** es utilizado especialmente para la administración de variables especiales, como ser las del tipo INI. Estas variables cuentan con la particularidad de guardar su valor ante una potencial caída de recursos y/o servicios. Por lo tanto, se asocian a componentes críticos del proceso para evitar inconvenientes y anomalías.
- **Supreme Report:** es un programa dedicado a la creación de reportes sobre el proceso implicado, que proporciona recursos como tablas, gráficos y perfiles de usuario para generar informes, indicadores e información de soporte durante la actividad operativa.
- **History Viewer:** permite rastrear las distintas variables implicadas en el SCADA y los valores que han tomado a lo largo del proceso.

Cabe aclarar que para este trabajo se ha utilizado una versión demo del software, lo cual supone ciertas limitaciones respecto del conjunto de recursos que propone la empresa AFCON. De todas maneras, para diseñar el SCADA se ha hecho uso de la mayoría de las herramientas mencionadas, principalmente de Project, Backup Wizard y los modos desarrollador-operador.

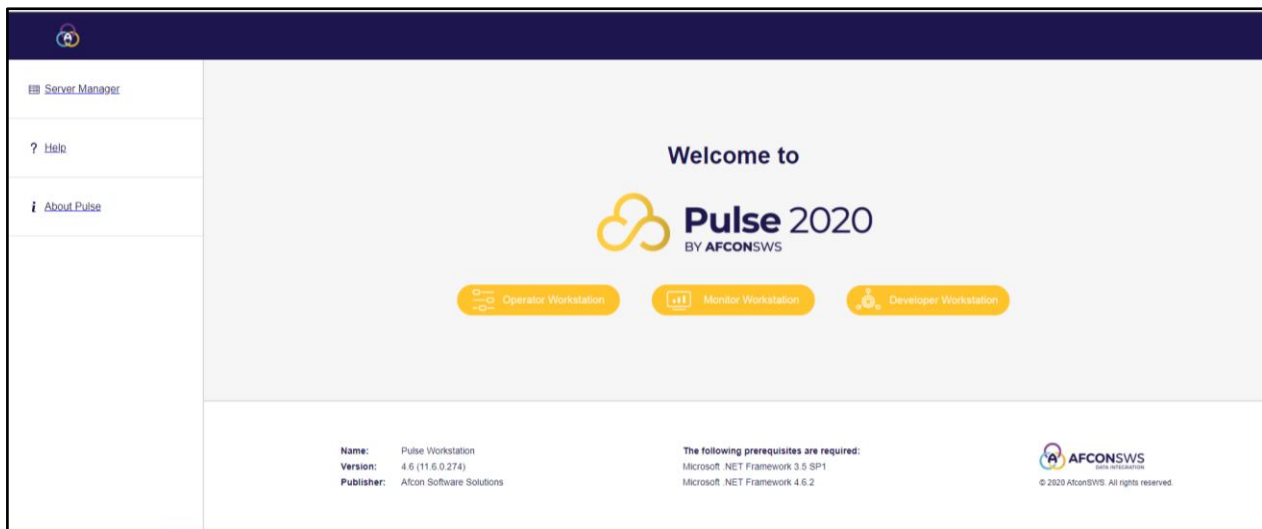


Fig. 43. Menú principal de PULSE *Workstation* y modalidades de uso.

4.2 Contenido del SCADA

El diseño del SCADA fue realizado en diferentes pantallas, cada una de las cuales tiene un contenido específico en función de las utilidades que se dispongan en relación al proceso. En este caso, se decidió dividir el sistema en 4 pantallas elementales para proporcionar información al usuario. Esto se debe a que sería poco práctico concentrar la visualización en un solo lugar, pues se generarían interferencias entre la representación de eventos, alarmas, gráficos y demás interacciones. Cabe aclarar, la cantidad de pantallas a implementar en un SCADA estará sujeto

a los requerimientos y necesidades de cada proceso en particular, pudiendo utilizar mayor o menor cantidad de herramientas de visualización según criterio del diseñador y cliente.

Dicho esto, las 4 pantallas con las que cuenta el SCADA son:

- Inicio
- Proceso
- Alarmero
- Gráficos (que a su vez se divide en Gráficos 1 y 2)

En la parte superior de todas las pantallas se observa una pestaña con los nombres de cada una de ellas. Dicha herramienta se conoce como *Toolbar*, y permite acceder a cada pantalla al hacer click sobre su nombre. Este es uno de los tantos recursos configurables que pone a disposición el software, permitiendo customizar la interface de operación para que resulte intuitiva e interactiva hacia el usuario.

A continuación, se describe cada una de las pantallas y su contenido asociado. Adicionalmente, como soporte audiovisual, en la sección *Anexos* se adjunta el enlace a un conjunto de videos orientados a detallar las partes del sistema y su funcionamiento.

4.2.1 Pantalla Inicio:

Es lo primero en aparecer al abrir el programa, y se dispone a modo de portada en carácter de bienvenida. Normalmente, a esta pantalla suele asociarse el logo de la empresa que utiliza el SCADA, o bien su desarrollador, pudiendo contar además con botones y/o contenido textual para indicar instrucciones, recomendaciones, aclaraciones del proceso, etc. Para este caso (Figura 44) se optó por utilizar el logo de la Universidad, seguido del título del trabajo.



Fig. 44. Pantalla de Inicio diseñada en PULSE.

4.2.2 Pantalla Proceso:

En la misma se representa la disposición o layout de planta, permitiendo visualizar e identificar los componentes involucrados en el proceso. Dicho esto, y siguiendo los lineamientos del esquema desarrollado en Microsoft Visio que se mostró anteriormente, los principales componentes del proceso representados son:

- **Columnas de absorción/desorción:** en formato de tanque con un recuadro y cruz en el centro, conforme la simbología específica que corresponde a reactores y columnas *empaquetadas* (con material de relleno).
- **Válvulas:** esquematizadas en formato tipo *moño*, tanto sea para el tipo reguladoras de caudal como de derivación.
- **Conductos de flujo:** representados como líneas por debajo y encima de las columnas. Cada conducto posee su identificación asociada a ambos lados para indicar los fluidos de proceso.

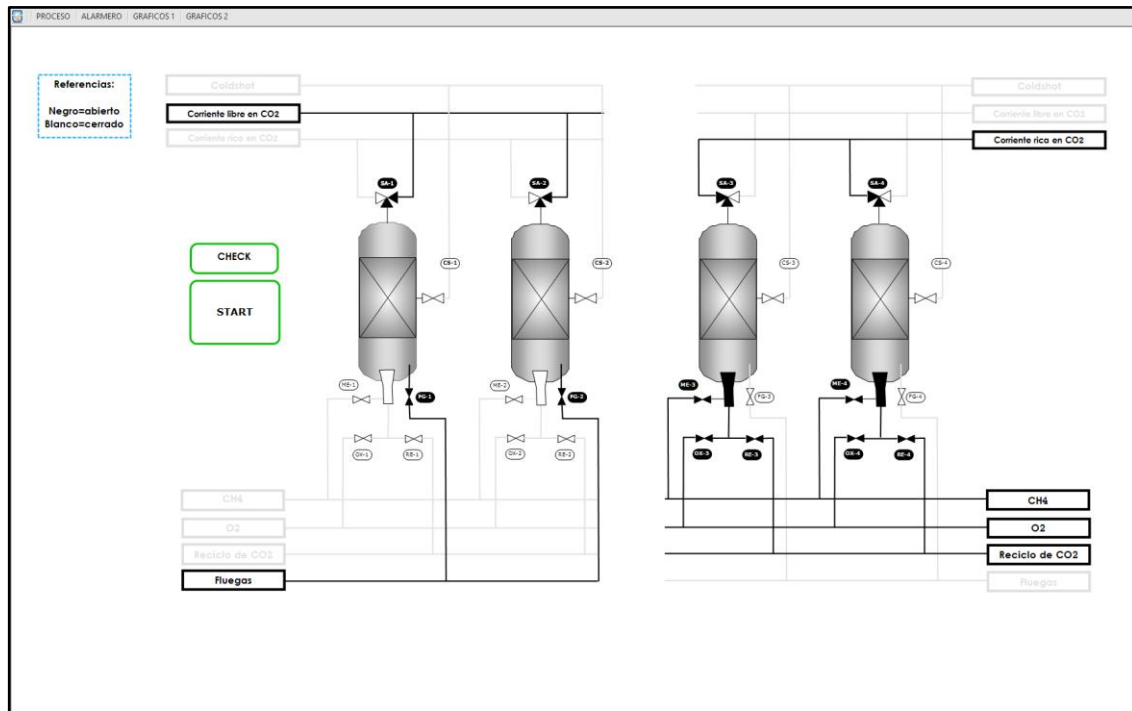


Fig. 45. Pantalla de Proceso diseñada en PULSE.

Como puede observarse en la Figura 45, cada válvula posee una etiqueta asociada (tag), conforme el esquema de codificación de equipos descrito anteriormente. En tanto, cada tag funciona como botón para desplegar ventanas emergentes o *Popups* con los cuales el usuario puede interactuar para controlar y monitorear el estado de variables críticas correspondientes a cada caso. En la Figura 46 se ejemplifica el caso para la válvula de conducto de *Fluegas* en la columna 1.

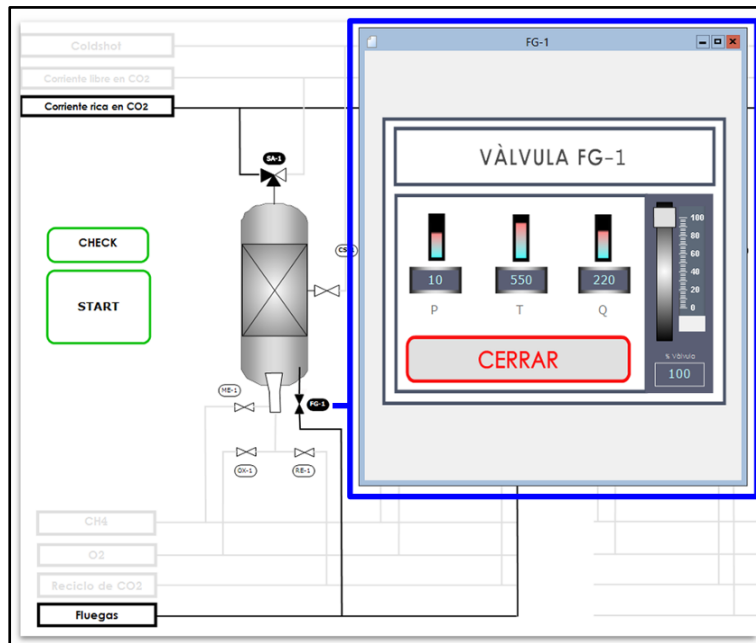


Fig. 46. Despliegue de ventana *popup* desde el *tag* de válvula FG1.

Asimismo, esta pantalla permite simular en forma visual los distintos escenarios propios de la operación de la planta modelo, a partir de la configuración de animaciones gráficas en los distintos elementos que componen al entorno. De este modo, cuando el sistema se encuentra operativo, el operador puede interactuar con el proceso, detectando flujos de trabajo, advertencias, alarmas y mensajes, entre otros.

Nótese que, a modo indicativo, en la pantalla de proceso se aclara el código de colores adoptado como referencia para la simulación de válvulas, quemadores y conductos. Siendo el color negro para indicar estado activo/abierto, y gris/blanco para inactivo/cerrado. Entonces, durante la simulación la apariencia de los distintos componentes varía en función de esta convención. Para el caso de las alarmas o señales de atención, las mismas se representan en recuadros de color rojo, como se muestra en la Figura 47.

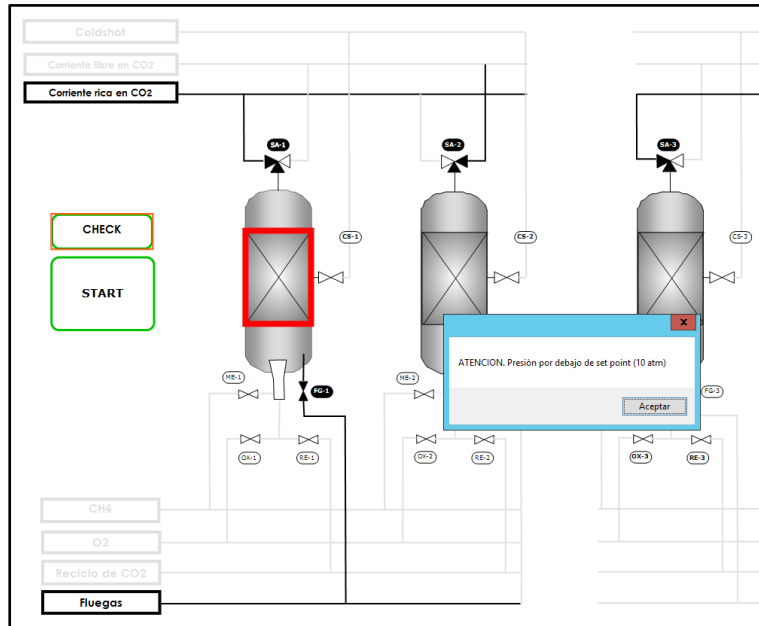
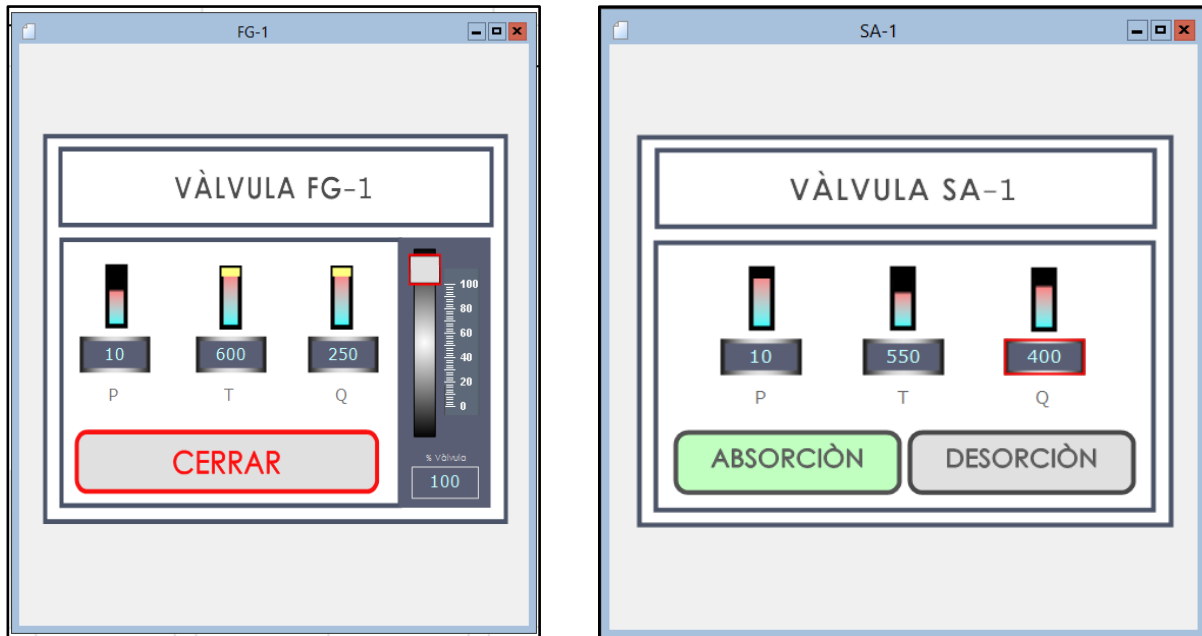


Fig. 47. Detalle de alarma (recuadro rojo) y notificación escrita de advertencia para la primera columna.

Entrando en detalle de las ventanas *Popups*, como se dijo anteriormente, en cada una se representan las variables críticas asociadas a cada componente. Así, por ejemplo, en la ventana FG1 se ha representado el control de apertura de la válvula de *Fluegas* para la columna 1, mediante el comando deslizador situado a la derecha. El mismo posee una graduación de 0 a 100 para indicar el porcentaje de apertura de válvula, también presente en el visor numérico inferior. Aquí debe hacerse una aclaración importante: el control de apertura y modulación de la válvula responde a una mera representación gráfica del SCADA, en términos de aplicación será necesario plantear la programación del controlador (en este caso un PLC) con una estrategia de realimentación (por ejemplo, a través de un algoritmo PI o PID). Esto permitirá mantener una relación comparativa entre la referencia ingresada (posición del deslizador) y el actuador que regula el accionamiento de la válvula, para que el sistema responda a las órdenes del operador desde el SCADA.

Adicionalmente, como medida de seguridad se dispone de un botón para forzar el cierre total de la válvula en caso de emergencia. A esto se suman indicadores de presión, temperatura y caudal del conducto de *Fluegas*. Obsérvese como las escalas de los mismos utilizan una combinación de colores azul y rojo en degradé para obtener una primera aproximación visual sobre qué representa el valor de cada variable, además visible en forma numérica. En caso de alcanzar un valor crítico, se encenderá un testigo titilante en rojo y amarillo como señal de advertencia. De forma homónima al ejemplo citado, por cada elemento de flujo de entrada/salida

en las columnas hay un *pop up* asociado que sigue esta misma estructura. La única excepción son las ventanas correspondientes a las válvulas de salida, en las cuales se elimina el comando deslizante para regulación de apertura, puesto que estas son válvulas de derivación. En su lugar, figuran 2 botones en la parte inferior, para seleccionar la posición de válvula (absorción o desorción). Según el color del botón se indica en qué posición está seteada la válvula (verde=activo; gris=inactivo).



Figs. 48 y 49. *Popups* para válvulas FG1 y SA1, representación de variables críticas asociadas.

4.2.3 Pantalla Alarmero:

En la misma se despliega un recuadro donde se listan las variables de control y sus respectivos valores en tiempo real, para ser monitoreados. Como se observa en la Figura 50, en la lista se incluyen los siguientes campos:

- **Block name:** corresponde al bloque o variable asociada a cada alarma (ej: TSA1)
- **Block description:** es la descripción de cada bloque (ej: TEMP. SALIDA 1)
- **Condition name:** expresa la condición de activación de cada alarma, pudiendo comparar valores mayores, menores, iguales, o dentro de rango en relación a una referencia (ej: TSA1 HIGH indica que la alarma se activará cuando la temperatura TSA1 exceda al valor de referencia seteado)
- **Value:** valor numérico de cada variable

- **Status:** indica en qué condición se encuentra la variable medida al momento (HIGH, LOW, CLEARED, entre otros según el valor esté por debajo, encima o equiparando la referencia)
- **Start time:** indica fecha y hora en que se activó una alarma.
- **Clear time:** fecha y horario en que se desactiva cada alarma.
- **State:** indica si la alarma está activa (started) o inactiva (cleared)

Alarm Name	Alarm Description	Condition Name	Value	Status	Start Time	Clear Time	State
TS42	TEMP-SALIDA 2	TS42 HIGH	800.00	HIGH	8/7/2025 9:30:04 AM	8/7/2025 9:30:04 AM	Started
TS41	TEMP-SALIDA 1	TS41 HIGH	570.00	CLEARED	8/7/2025 9:28:52 AM	8/7/2025 9:28:52 AM	Cleared
PSA	PRESSION SALIDA	PSA LOW	10.00	CLEARED	8/5/2025 8:39:53 PM	8/5/2025 8:39:53 PM	Cleared
Q_SA	CAUDAL SALIDA	Q_SA LOW	400.00	CLEARED	7/19/2025 12:52:39 PM	7/19/2025 12:52:39 PM	Cleared
TS43	TEMP-SALIDA 3	TS43 LOW	555.00	CLEARED	7/20/2025 4:02:39 PM	7/20/2025 4:02:39 PM	Cleared
P_FIG	PRESSION FUEGAS	P_FIG	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:33:53 PM	6/21/2025 8:33:53 PM	Cleared
Q_OX	CAUDAL OXIGENO	Q_OX	5.00	CLEARED	6/21/2025 8:32:55 PM	6/21/2025 8:32:55 PM	Cleared
Q_RE	CAUDAL RECICLO	Q_RE	20.00	CLEARED	6/21/2025 8:32:19 PM	6/21/2025 8:32:19 PM	Cleared
T_RE	TEMP. RECICLO	T_RE	600.00	CLEARED	6/21/2025 8:32:17 PM	6/21/2025 8:32:17 PM	Cleared
P_RE	PRESSION RECICLO	P_RE	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:32:13 PM	6/21/2025 8:32:13 PM	Cleared
T_OX	TEMP. OXIGENO	T_OX	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:17:53 PM	6/21/2025 8:17:53 PM	Cleared
P_OX	PRESSION OXIGENO	P_OX	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:17:47 PM	6/21/2025 8:17:47 PM	Cleared
Q_RE	CAUDAL METANO	Q_RE	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:16:52 PM	6/21/2025 8:16:52 PM	Cleared
T_RE	TEMP. METANO	T_RE	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:16:49 PM	6/21/2025 8:16:49 PM	Cleared
P_RE	PRESSION METANO	P_RE	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:16:43 PM	6/21/2025 8:16:43 PM	Cleared
Q_FIG	CAUDAL FUEGAS	Q_FIG	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:16:04 PM	6/21/2025 8:16:04 PM	Cleared
T_FIG	TEMP. FUEGAS	T_FIG	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:15:59 PM	6/21/2025 8:15:59 PM	Cleared
Q_OX	CAUDAL CO2/SHHT	Q_OX	0.00	CLEARED	6/21/2025 8:11:32 PM	6/21/2025 8:11:32 PM	Cleared

Fig. 50. Vista de la pantalla Alarmero.

Además de toda esta información, según una alarma se encuentre activa o no dependerá el color con que aparezca en la lista, siendo el verde para condiciones normales de operación y rojo para llamar la atención del usuario e indicar alarmas activas. De esta manera, la pantalla de alarmas se presenta como un complemento a las animaciones de advertencia simuladas en la pantalla de proceso, de forma que el operario pueda advertir en la misma cuando se presente alguna anomalía o punto de atención, y luego dirigirse al alarmero para constatar que variables son las afectadas y por qué.

Adicionalmente, el alarmero cuenta con una pestaña historial, en la que se despliega un registro de actividad, detallando el momento de activación y desactivación de alarmas durante la operación, nuevamente diferenciando dichos eventos por color (rojo=activación; azul=desactivación). Este es un excelente recurso que contribuye a la trazabilidad del proceso para mantenerlo controlado y mantener un seguimiento de su evolución a lo largo del tiempo.

PROCESO ALARMERO GRÁFICOS 1 GRÁFICOS 2

MONITOREO DE ALARMAS

Condition Name	Category	Category Name	Block Name	Block Description	Node Number	Node Name	Start Time	Time	Status	A Value	Alarm Description	State
TSA2 HIGH	Category 0	TSA2	TSA2	TEMP. SALIDA 2	0	NoName	8/7/2025 9:30:04 AM	8/7/2025 9:30:04 AM	HIGH	800.00	T SALIDA 2	C
TSA1 HIGH	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	8/7/2025 9:28:52 AM	8/7/2025 9:28:56 AM	CLEARED	570.00	TEMP. SALIDA 1	C
TSA1 HIGH	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	8/7/2025 9:28:52 AM	8/7/2025 9:28:52 AM	HIGH	800.00	TEMP. SALIDA 1	C
PSA LOW	Category 0	PSA	PSA	PRESION SALIDA	0	NoName	8/5/2025 8:39:53 PM	8/7/2025 9:28:39 AM	CLEARED	10.00	PRESIÓN DE SALIDA ABSORCIÓN	C
PSA LOW	Category 0	PSA	PSA	PRESION SALIDA	0	NoName	8/5/2025 8:39:53 PM	8/5/2025 8:39:53 PM	LOW	0.00	PRESIÓN DE SALIDA ABSORCIÓN	C
TSA1 LOW	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	8/5/2025 8:39:50 PM	8/7/2025 9:28:47 AM	CLEARED	550.00	TEMP. SALIDA 1	C
TSA1 LOW	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	8/5/2025 8:39:50 PM	8/5/2025 8:39:50 PM	LOW	0.00	TEMP. SALIDA 1	C
Q_SA LOW	Category 0	Q_SA	Q_SA	CAUDAL SALIDA	0	NoName	7/18/2025 12:52:39 PM	8/7/2025 9:28:44 AM	CLEARED	400.00	CAUDAL SALIDA	C
Q_SA LOW	Category 0	Q_SA	Q_SA	CAUDAL SALIDA	0	NoName	7/18/2025 12:52:35 PM	7/18/2025 12:52:35 PM	LOW	0.00	CAUDAL SALIDA	C
TSA3 LOW	Category 0	TSA3	TSA3	TEMP. SALIDA 3	0	NoName	7/2/2025 4:02:39 PM	8/7/2025 9:28:57 AM	CLEARED	555.00	T SALIDA 3	C
TSA3 LOW	Category 0	TSA3	TSA3	TEMP. SALIDA 3	0	NoName	7/2/2025 4:02:39 PM	7/2/2025 4:02:39 PM	LOW	0.00	T SALIDA 3	C
TSA2 LOW	Category 0	TSA2	TSA2	TEMP. SALIDA 2	0	NoName	7/2/2025 4:02:23 PM	8/7/2025 9:28:53 AM	CLEARED	555.00	T SALIDA 2	C
TSA2 LOW	Category 0	TSA2	TSA2	TEMP. SALIDA 2	0	NoName	7/2/2025 4:02:23 PM	7/2/2025 4:02:23 PM	LOW	0.00	T SALIDA 2	C
PSA LOW	Category 0	PSA	PSA	PRESION SALIDA	0	NoName	7/2/2025 4:02:22 PM	8/5/2025 8:39:02 PM	CLEARED	10.00	PRESIÓN DE SALIDA ABSORCIÓN	C
PSA LOW	Category 0	PSA	PSA	PRESION SALIDA	0	NoName	7/2/2025 4:02:22 PM	7/2/2025 4:02:22 PM	LOW	0.00	PRESIÓN DE SALIDA ABSORCIÓN	C
TSA1 LOW	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	7/2/2025 4:02:18 PM	8/5/2025 8:38:45 PM	CLEARED	550.00	TEMP. SALIDA 1	C
TSA1 LOW	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	7/2/2025 4:02:18 PM	7/2/2025 4:02:18 PM	LOW	0.00	TEMP. SALIDA 1	C
TSA1 LOW	Category 0	TSA1	TSA1	TEMP. SALIDA 1	0	NoName	7/2/2025 3:54:42 PM	7/2/2025 3:54:48 PM	CLEARED	550.00	TEMP. SALIDA 1	C

Record 8 of 400

Fig. 51. Historial de alarmas en pantalla Alarmero.

4.2.4 Pantalla Gráficos:

Para este caso, se han diseñado dos pantallas dedicadas a gráficos que muestran el comportamiento en tiempo real (Gráficos 1) y evolución histórica de las variables (Gráficos 2).

Si se observa la Figura 52, la pantalla de *monitoreo real time* exhibe las gráficas correspondientes a Temperatura, Presión y Caudal para las corrientes de salida y *Fluegas* como las principales variables de control del proceso. Luego se representan también los valores de caudal para las corrientes de *Coldshot*, Metano, Oxígeno y Reciclo, además de los niveles de concentración durante absorción y desorción. Con toda esta información, el operador puede constatar que el proceso transcurra dentro de cierto marco de referencia según los parámetros operativos, monitoreando la fluctuación de variables en las distintas etapas. Por ejemplo, en la Figura 52, si se presta atención a las gráficas de TSA y PSA puede advertirse claramente como durante la fase de absorción el proceso atraviesa por un incremento escalonado de temperatura, a la vez que se despresuriza el recinto hasta la presión atmosférica. Desde ya, cada gráfico se encuentra escalado conforme los parámetros definidos para la variable que corresponda. Si ocurriera alguna variación repentina que escape de lo normal, esta herramienta permite detectar con rapidez dónde y en qué proporción ha ocurrido dicha alteración.



Fig. 52. Pantalla de gráficos en tiempo real.

Por su parte, en la pantalla de históricos se puede visualizar como han ido evolucionando ciertos parámetros a lo largo del tiempo. Nuevamente, los casos más evidentes son los de temperatura y presión a la salida puesto que dichos valores fluctúan cíclicamente. Para esta pantalla, se optó por representar las variables de temperatura, presión y caudal a la salida, como así también el caudal de FG en el ingreso a la columna. Estos son los valores más relevantes para mantener un control de flujo del proceso, a lo que se suman los históricos de concentración de CO₂. Mantener un control periódico de esto último resulta una herramienta interesante para obtener trazabilidad respecto de las emisiones generadas y la pureza del CO₂ almacenado. Asimismo, cualquier variación de estos parámetros quedará registrada para su posterior análisis, proporcionando información útil para evaluar cómo se desarrolla el proceso a lo largo del tiempo. Esto permitiría, por ejemplo, la confección de indicadores y métricas sobre el funcionamiento de la planta.



Fig. 53. Pantalla de gráficos históricos.

4.3 Secuencia de desarrollo del SCADA

Inicialmente, desde la herramienta Project se creó un nuevo proyecto denominado TF1 sobre el que se trabajó a lo largo de todo el proceso de diseño y simulación (Figura 54). Dicho proyecto fue seteado como *default* (indicado con un tilde verde sobre la carpeta), para que al abrir el software PULSE automáticamente comience a correr el mismo.

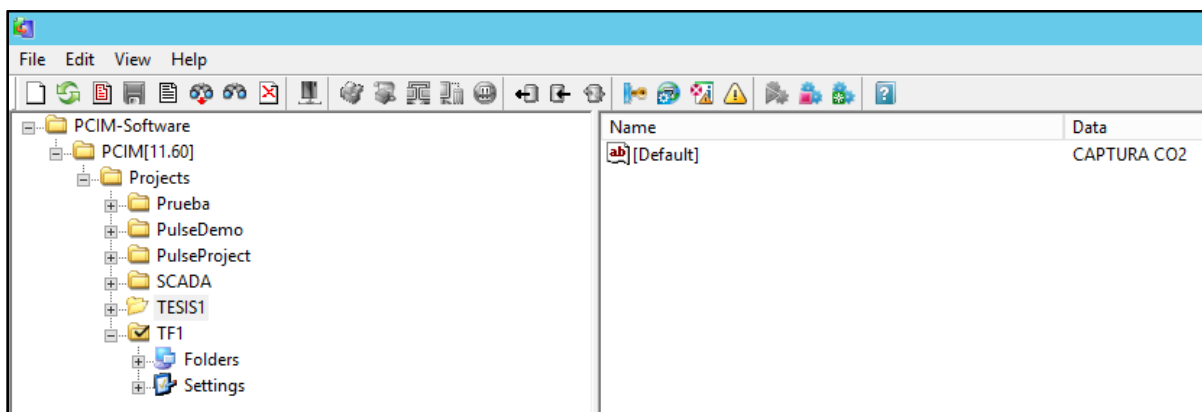


Fig. 54. Detalle de la pantalla de la herramienta *Project*.

Aquí he la primera limitación de las mencionadas por utilizar una versión de prueba (demo): inevitablemente los servicios se caen cada 1h (en pantalla aparecen las ventanas emergentes de las figuras 55 y 56), lo cual obliga a reiniciar los mismos en forma periódica para que el programa siga corriendo.



Fig. 55. Recordatorio de versión demo que figura al iniciar el programa.

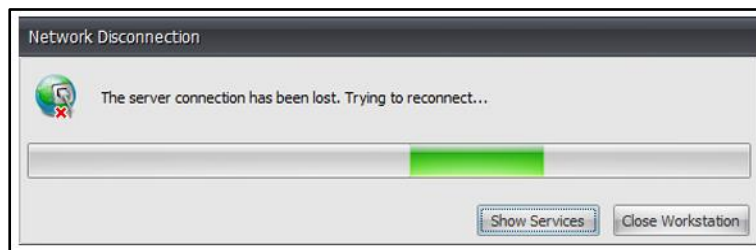


Fig. 56. Alerta por caída de servicio luego de 1h de inicializado el programa.

Dicho esto, una vez creado el proyecto ya se pudo comenzar a trabajar en el modo desarrollador. Allí, el entorno posee una barra de herramientas superior, con múltiples recursos para la edición de gráficos, gestión de archivos, opciones de vista, centro de ayuda, etc. Asimismo, en el lateral izquierdo se despliega un panel con 4 opciones, de las cuales las dos primeras son de uso imprescindible para diseñar el SCADA. Desde *Graphics* se pueden crear las distintas pantallas que componen al SCADA, insertar elementos, configurar animaciones y demás recursos que componen la parte visual del sistema. En tanto, desde *Database* se crean y gestionan las distintas variables utilizadas para generar la simulación.

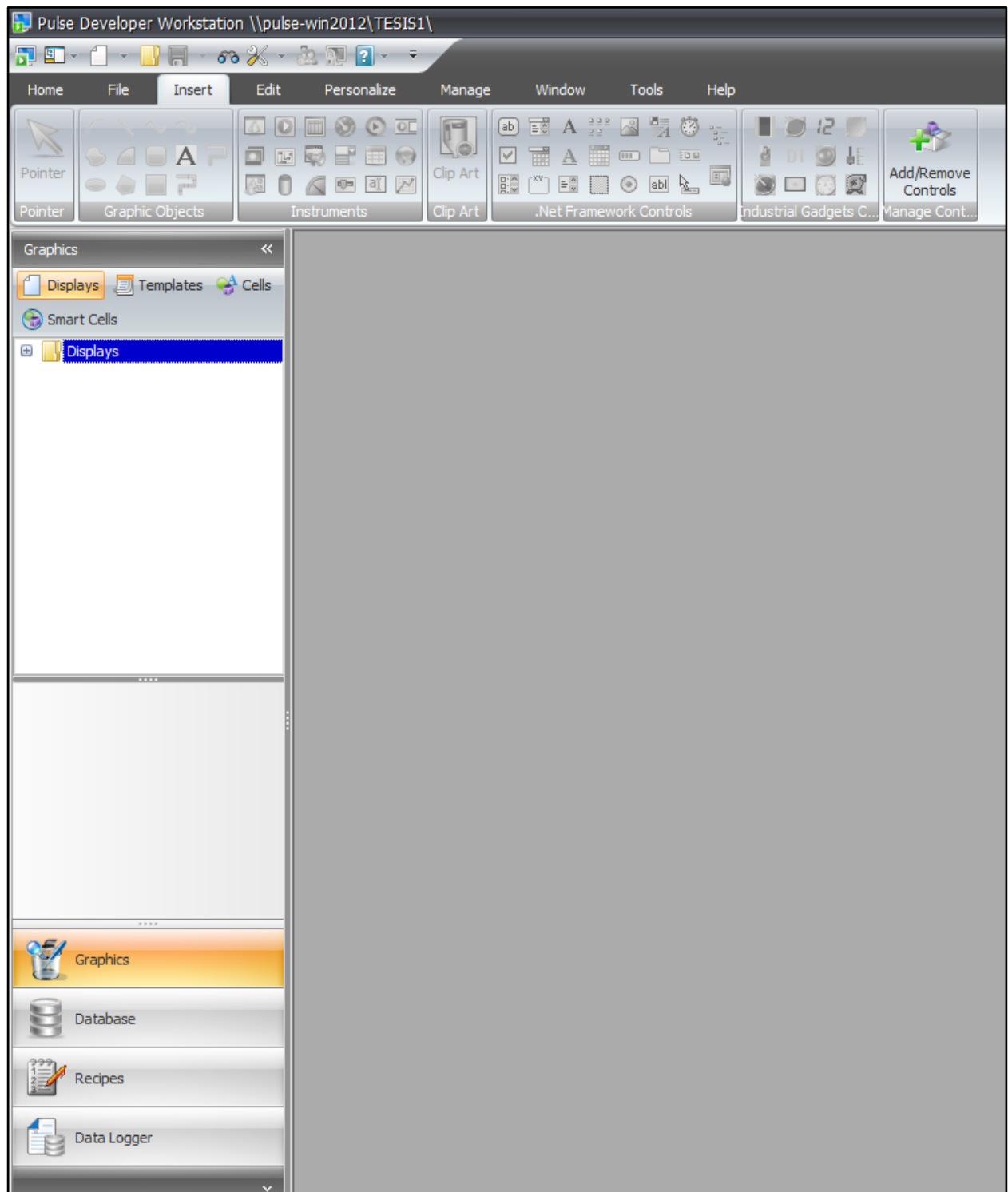


Fig. 57. Pantalla del modo desarrollador, con barra superior de herramientas y panel lateral de pestañas.

Siguiendo con el proceso, en la pestaña *Graphics* se crearon los distintos *displays* que luego serían usados: layout principal, alarmero, gráficos, *Popups*, etc, tal como se evidencia en el listado de la carpeta *Displays* en la Figura 58.

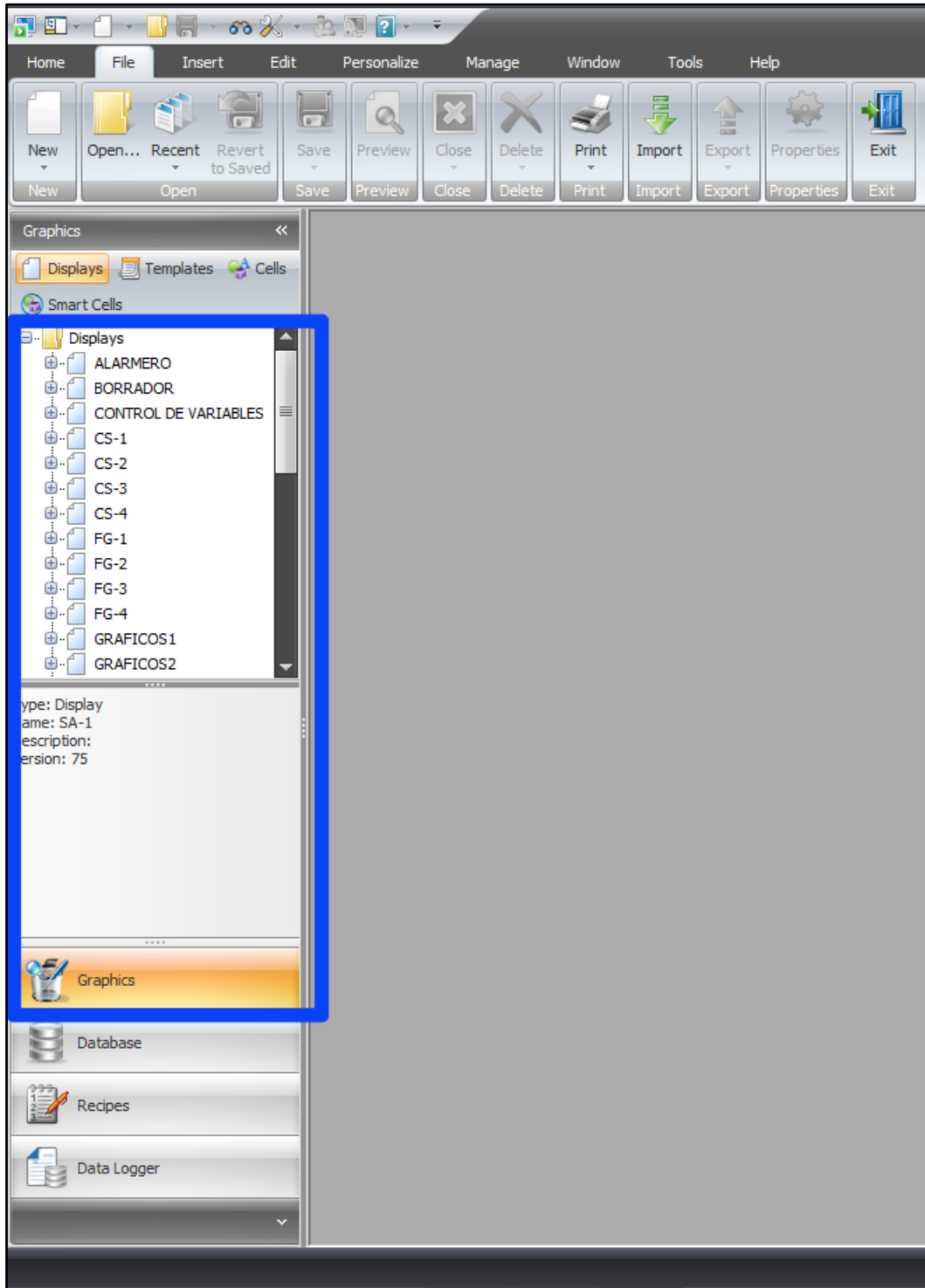


Fig. 58. Detalle de la pestaña *Graphics* y expansión de la carpeta *Displays*.

Cada *display* creado ofrece la posibilidad de configurar su tamaño y apariencia, y es en ellos donde se insertan los elementos gráficos. A modo de ejemplo, en la Figura 59 se muestra el detalle del *display* de uno de los Pop Ups. Obsérvese cómo al seleccionar uno de los botones que contiene, sobre el lateral derecho se despliega el menú de configuración para editar su apariencia y crear animaciones. Entre las opciones de apariencia (*Graphics*) es posible cambiar los colores de fondo, borde, estilo y formato de texto.

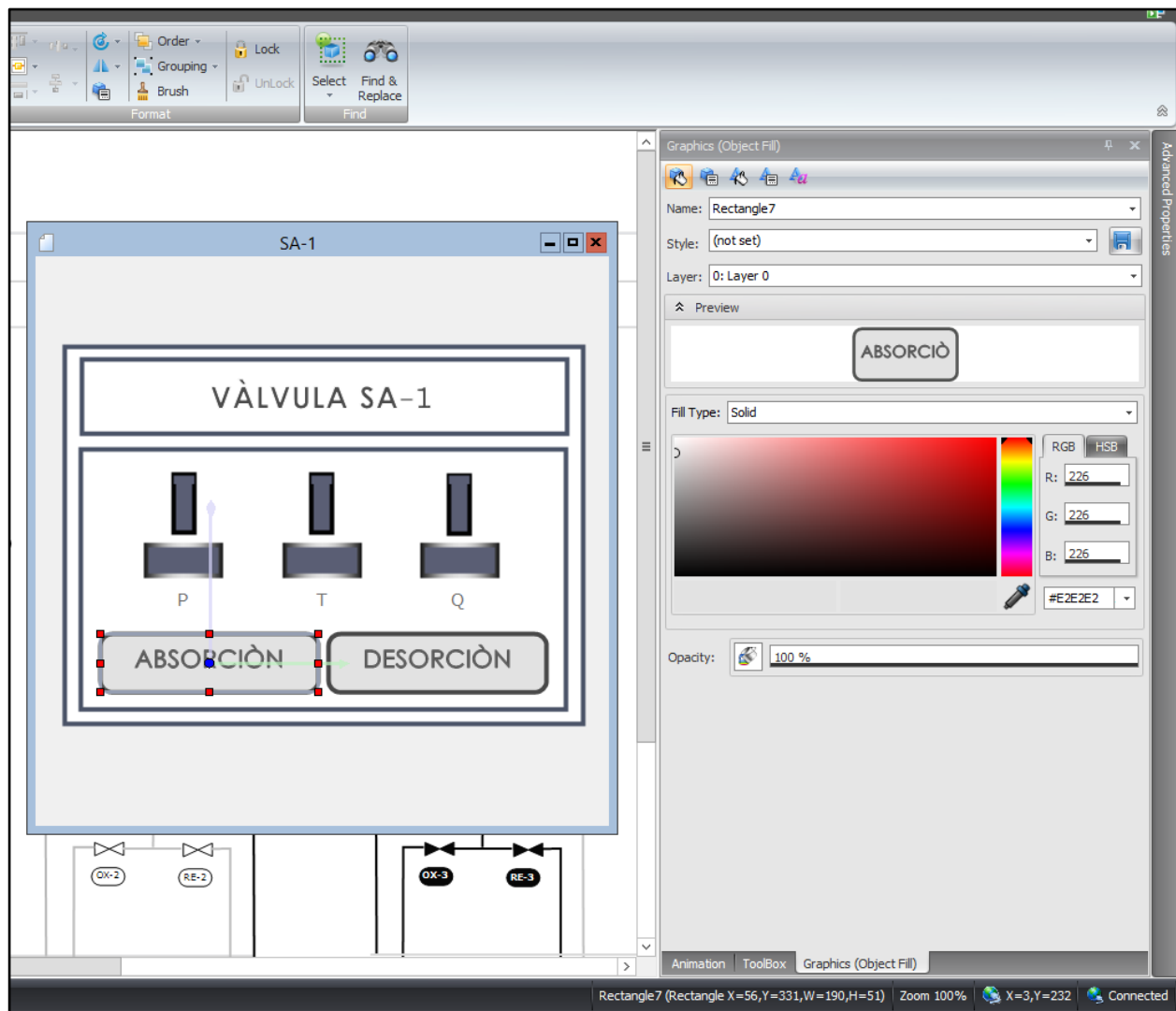
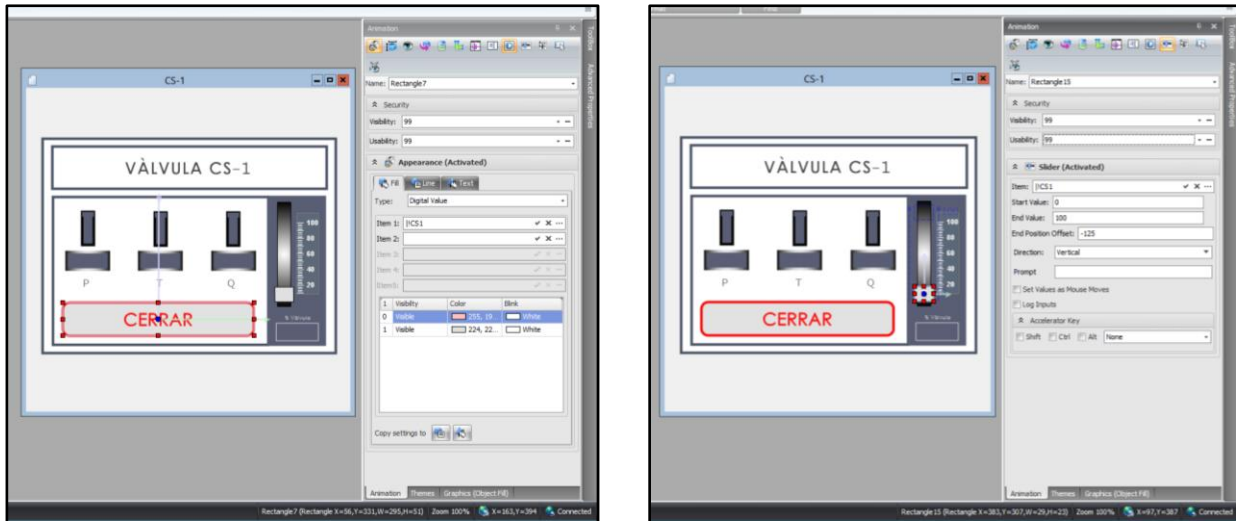


Fig. 59. Display del *Popup* de válvula SA-1 y configuración de apariencia para el botón *ABSORCIÓN*.

Por otro lado, entre las opciones de animación (*Animations*) se despliegan diversas opciones para modificar la apariencia según el valor que tomen las variables (se pueden generar elementos visibles, invisibles, intermitentes, etc), crear botones, medidores de nivel, comandos deslizantes, menús de búsqueda, flujos de cañería, entre otros. En efecto, los comandos

deslizantes para regular la apertura de válvulas en los *Popups* fueron creados haciendo uso de este recurso. Mismo caso para los visores e indicadores de nivel de temperatura, presión y caudal. Todo esto permite diseñar soluciones a medida, para adaptarlas a las necesidades del usuario, pudiendo configurarlas en base a distintos parámetros funcionales.



Figs. 60 y 61. Detalle de botones y deslizadores creados con animaciones.

Pasando al menú *Database*, en él aparecen diversas opciones para crear distintos tipos de variables, ver Figura 62. Para este proyecto se utilizaron únicamente variables digitales y analógicas. Como se puede observar en la Figura, existe un gestor de variables donde se listan las mismas, indicando su nombre y descripción, como así también se dispone de marcadores para habilitar alarmas, históricos, etc. Un recurso muy útil es la posibilidad de generar una planilla de Excel, o bien en pdf, con todas las variables empleadas y sus características de configuración. En el ANEXO B se adjunta un enlace para acceder a una carpeta de Google Drive, que contiene la documentación detallada de las variables del proyecto. También allí hay imágenes del listado emitido por PULSE.

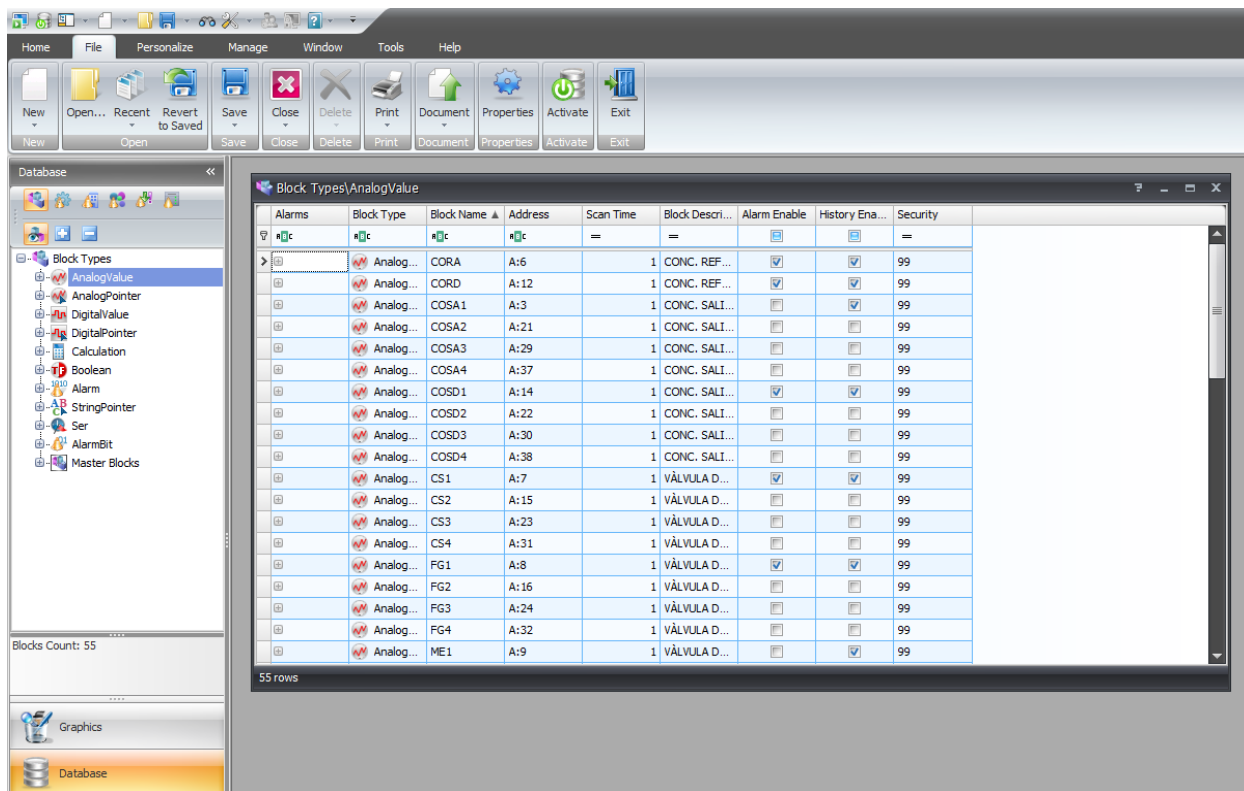


Fig. 62. Gestor de variables en *Database*.

En la Figura 63 se detallan las propiedades del *Database*, a modo de resumen sobre cantidad de variables utilizadas, almacenamiento, base de datos, etc.

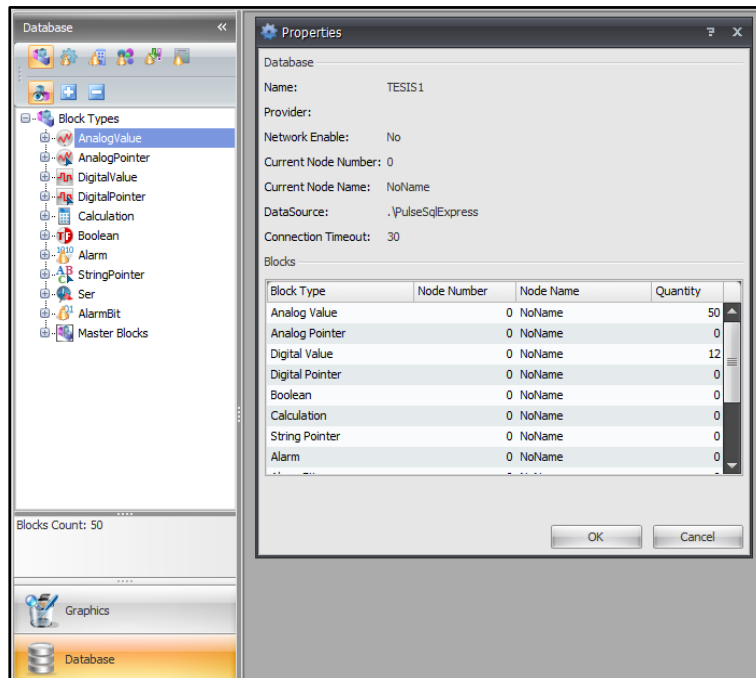


Fig. 63. Propiedades del *Database*.

Adicionalmente, como se mencionó antes se designaron ciertas variables en formato INI para preservar el sistema ante potenciales caídas de servicio. Se decidió implementar este formato para las variables que rigen a las válvulas de entrada y salida a las columnas (*iFG* para las válvulas de *Fluegas*; *iSA* para las válvulas derivadoras de salida). De esta manera, si el sistema dejase de funcionar, al restituirse el mismo las columnas podrán seguir operando en la fase que estuvieran al momento de frenar, sin necesidad de reiniciar el proceso. Por lo tanto, a esas variables se les asigna un alias, tal como se observa en la lista de la Figura 64.

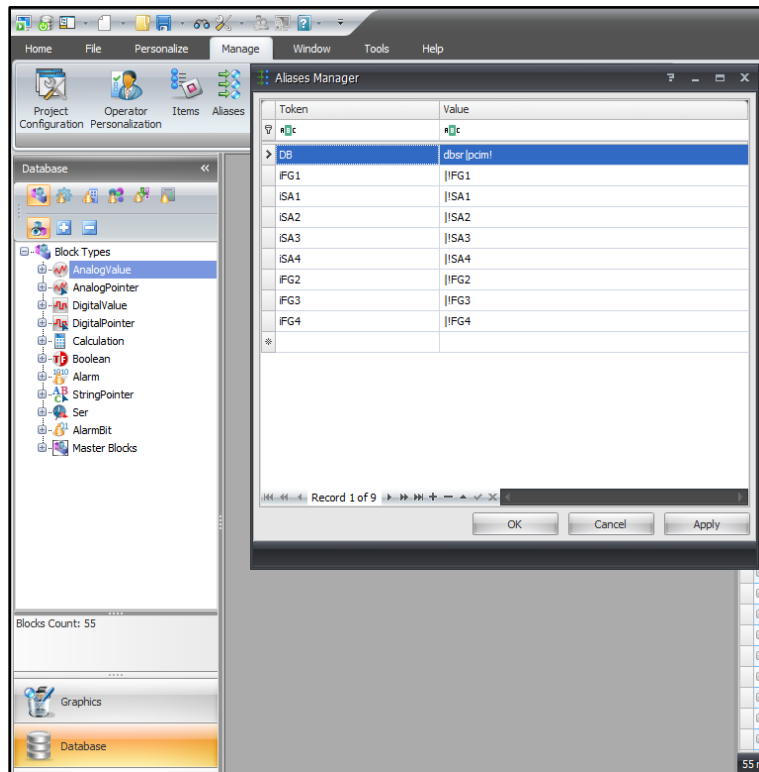


Fig. 64. Gestor de alias para variables INI.

Una vez ya creadas las pantallas y configuradas las variables, el siguiente paso fue la programación de *Workflows* para poder ejecutar las simulaciones. Básicamente, se trata de diagramas de flujo programados en bloque para definir la secuencia de ejecución de las distintas funcionalidades del proceso. Estos fueron realizados en base a la estrategia operativa y condiciones de funcionamiento automatizado que se abordaron previamente en el capítulo 3.

Por cuestiones de practicidad, lo que se hizo inicialmente fue programar un workflow por cada etapa operativa, permitiendo identificar fallas y/o puntos críticos con mayor facilidad. Esta es una buena práctica para depurar los programas y verificar su correcto funcionamiento. Una vez completadas con éxito todas las etapas, se procedió a juntarlas en un único Workflow por fase. Es decir, existe un Workflow para la fase de absorción, y otro para desorción. Ambos están vinculados para funcionar en forma cíclica y simular la operación continua de planta.

Como se dijo, la programación de estos diagramas es mediante bloques definidos para las distintas acciones que se quieran ejecutar. Así, se dispone de bloques condicionales, de secuencia, de alerta, autoacciones, etc. Y cada uno de ellos implica distintas estructuras de programación predefinidas. Por ejemplo, en la Figura 65 se muestra una parte del workflow de absorción. Obsérvese el menú a la derecha en la pantalla. En la parte superior se pueden elegir

los distintos bloques a utilizar, divididos en categorías *Pulse* y *General*. Estos se arrastran hacia el área de trabajo, conectándose entre sí según la secuencia definida. Particularmente, en esta imagen se encuentra seleccionado el bloque condicional WHILE para la evaluación de temperatura. En la parte inferior del menú derecho se despliegan las opciones de configuración del mismo, y en la ventana *Editor de condiciones de regla* se puede apreciar el código que condiciona a la estructura. Del mismo modo es posible editar otros bloques condicionales (*if*, *else if*, etc), siguiendo siempre un esquema propio y predefinido para su programación. Al principio puede resultar confuso y tedioso, pues la codificación no está estandarizada ni ligada a lenguajes conocidos como C o Python, pero el software dispone de algunos diagramas ejemplo que permiten extrapolar código a los *Workflows* creados por el usuario.

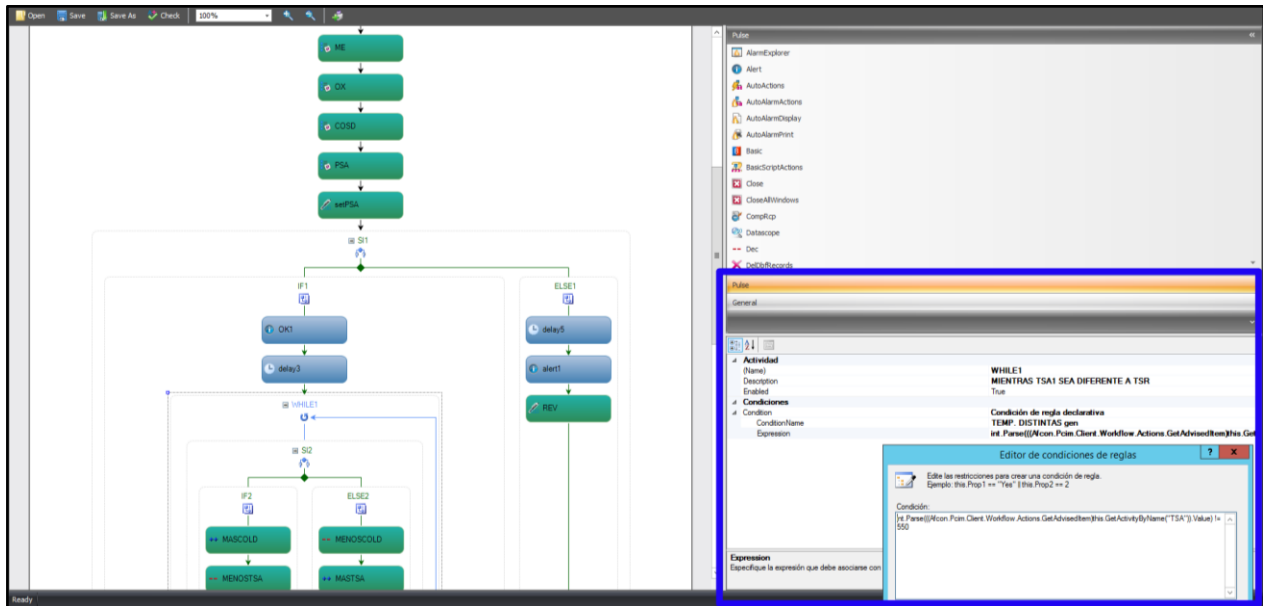


Fig. 65. Editor de *Workflows* y detalle del editor de condiciones de regla.

A la hora de confeccionar estos diagramas, existe la posibilidad de hacerlo en forma paramétrica. Esto permite diseñar una estructura general a la que luego se asocian las variables deseadas. Es un recurso muy útil para ahorrar tiempo y espacio de almacenamiento. Para este proyecto, lo que se hizo fue programar dos *Workflows* genéricos (ABSORCIONGEN y DESORCIONGEN), que luego pueden vincularse a las variables de las distintas columnas al programar su activación. De otro modo hubiese sido necesario dos diagramas con variables fijas por cada columna, totalizando un mínimo de 8 diagramas para operar. En la Figura 66 se ejemplifica la parametrización de los bloques utilizados en el diagrama de absorción, y su posterior asignación a las variables de la primera columna al configurar el botón *Start*. Luego, esto resulta extrapolable para el resto de las columnas.

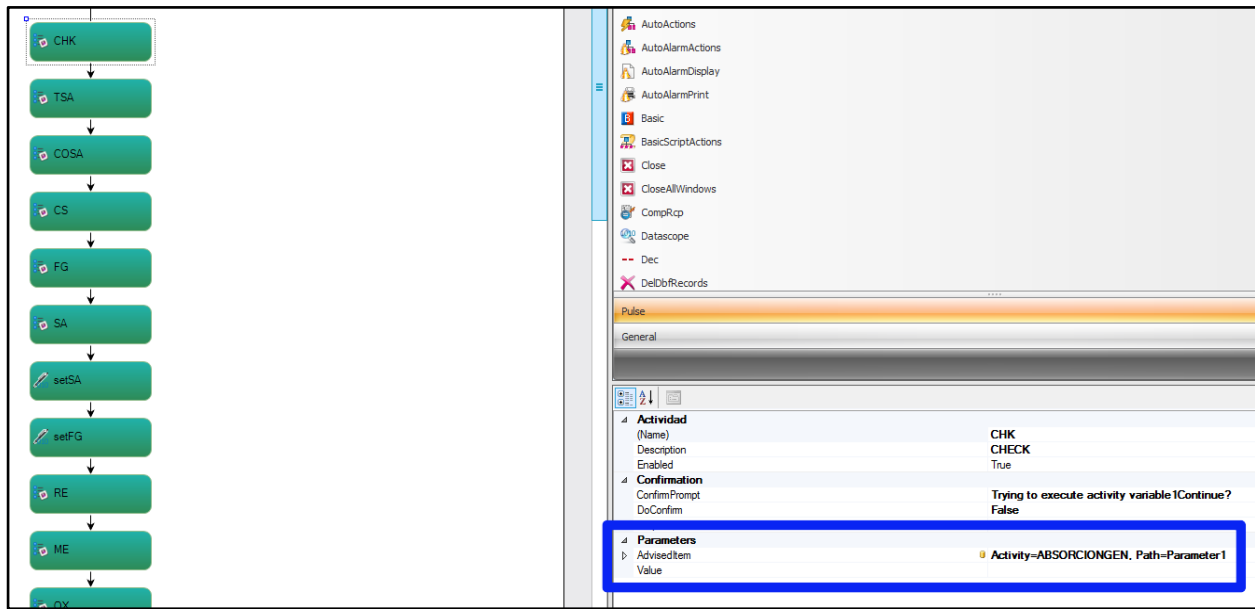


Fig. 66. Parametrización de bloques para diagrama de absorción.

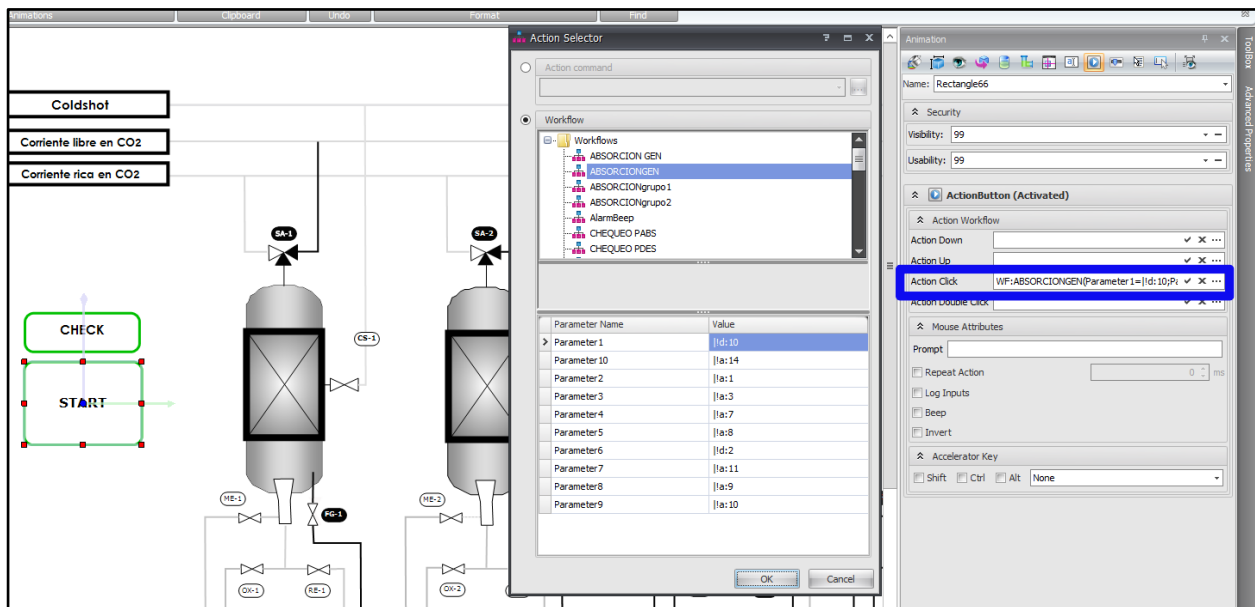


Fig. 67. Asignación de parámetros al botón START.

Sin embargo, al implementar esta modalidad surgió inconveniente: por trabajar con la versión demo de PULSE, la cantidad de parámetros disponibles para utilizar se encuentra limitada solamente a 10, razón por la cual se debieron fraccionar los diagramas iniciales para poder abarcar todas sus funciones. De este modo, se terminó programando un workflow de chequeo inicial (CHEQUEOPABS), dos de proceso (ABSORCIONGEN y DESORCIONGEN) y otro para la

despresurización del recinto (DESPRESURIZAR). El primero de ellos (CHEQUEOPABS) depende del botón *CHECK*, y verifica la presencia de CO₂ en la columna, para luego chequear la presión. Habiendo garantizado las condiciones operativas, se notifica al usuario *Sistema OK*. Una vez obtenido ese mensaje de habilitación, presionando el botón *Start* se procede a activar el primer workflow de proceso (ABSORCIONGEN). Por último, al switchear a la fase de desorción (se activa el workflow DESORCIONGEN en forma automática), previamente se ejecuta el diagrama DESPRESURIZAR. En síntesis, por cada ciclo de proceso que se complete, deben sucederse estos 4 workflows en el orden citado: CHEQUEOPABS - ABSORCIONGEN - DESPRESURIZAR - DESORCIONGEN. Desde ya que todo este desglose atenta contra el concepto de optimizar recursos, pero es una solución de compromiso en vistas de mantener al sistema en funcionamiento.

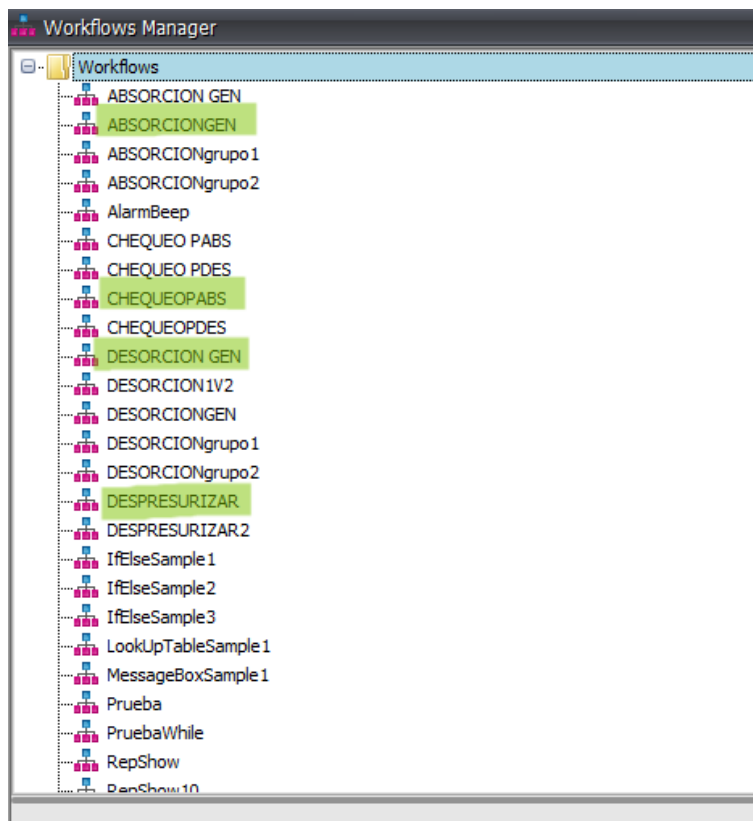


Fig. 68. Listado de *Workflows* realizados, en verde se resaltan los mencionados anteriormente.

Respecto de la vinculación entre diagramas, se han utilizado *bloques de activación de Workflows* en su estructura de programación. De esta forma, partiendo de la ejecución de un diagrama se puede habilitar la activación de otro, y así sucesivamente. Ahora bien, esto podría ser fácilmente reemplazado por el recurso de *autoacciones* disponibles en el software. De hecho,

fue lo primero que se hizo, programando diferentes *triggers* para activar uno u otro diagrama. Sin embargo, al correr la simulación se detectó que los *Workflows* entraban en un bucle infinito, por lo que se bloqueaban a la mitad de su ejecución. Resulta que al haber diversidad de estructuras condicionales, secuencias de incremento y decremento encadenados, los tiempos de ejecución son variables, por lo que ciertas acciones terminaban superponiéndose entre sí. Entonces, muchas veces los *triggers* no llegaban a activarse o lo hacían a destiempo. Esto responde a una limitación por parte del programa y su capacidad de procesamiento, también ligado a las capacidades de la computadora utilizada. Por lo tanto, la solución fue implementar el recurso de vinculación mencionado al principio, de manera tal que puedan activarse los *Workflows* sin depender de un *trigger* ni se solapen instrucciones.

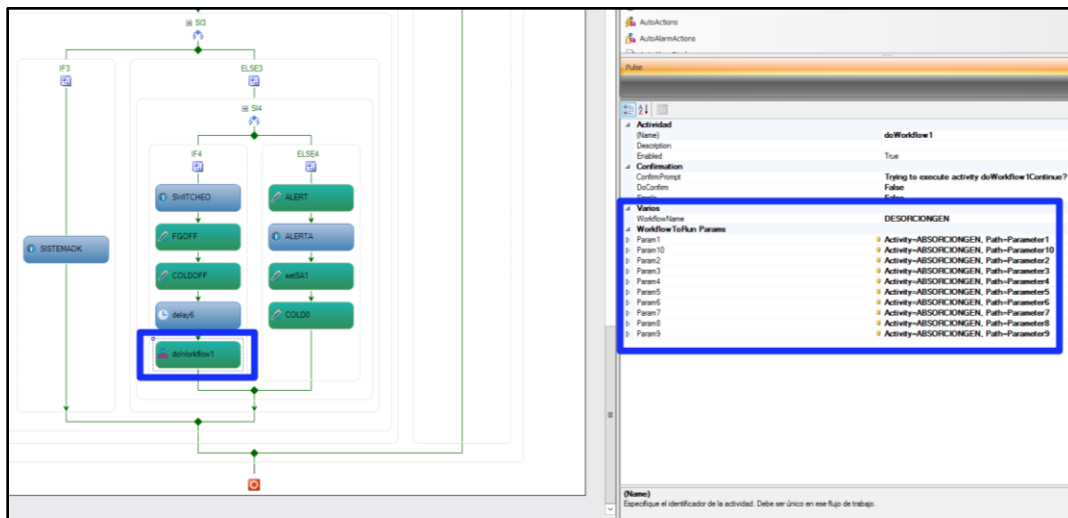


Fig. 69. Detalle y configuración de un *bloque de activación de Workflow* .

Habiendo ya configurado los *Workflows*, resta abordar la configuración de gráficos y alarmas que complementarán la simulación del proceso. En el caso de los gráficos, lo que se hizo fue crear un nuevo *display* (pantalla) en el que se fueron insertando y distribuyendo en forma de recuadro, haciendo uso de la herramienta Pulse Trend Graph. Cada gráfico debe configurarse para asociar la/las variable/s implicada/s, definir rangos de valor, escalas, tiempos de muestreo entre otros. En la fig 70 se muestra el menú de configuración donde inicialmente se puede elegir que tipo de gráfico utilizar. Para este proyecto se utilizaron las 2 primeras opciones: *Real Time Trend Graph* y *Historical Trend Graph* (para gráficos en tiempo real e históricos, respectivamente). Luego, dentro del mismo menú, en la pestaña *Pens* (Figura 71) se configura el resto de los parámetros de funcionamiento.

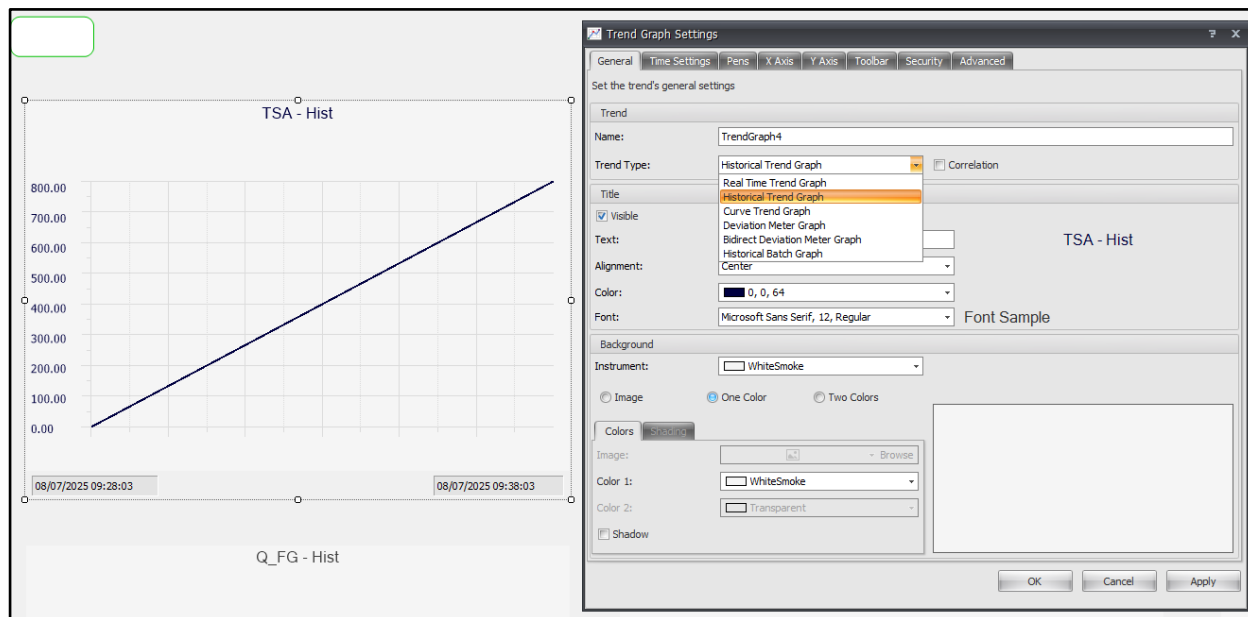


Fig. 70. Configuración de gráficos con herramienta *Pulse Trend Graph* .

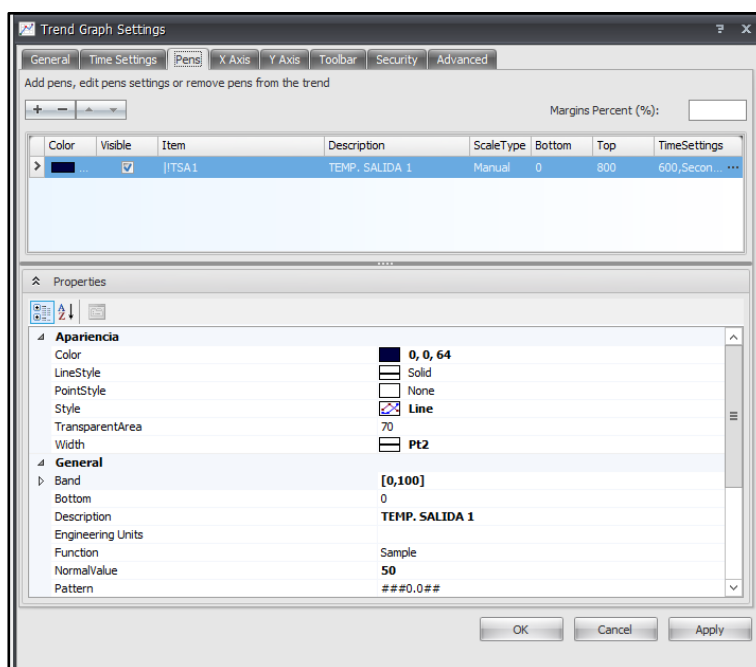


Fig. 71. Configuración de parámetros en la pestaña *Pens* .

Un detalle a tener en cuenta es que, a la hora de designar la variable cuyos valores se van a graficar (campo *Item* en el configurador), el rango de esos valores se puede ajustar en forma manual, automática o *desde bloque*. Esta última opción permite vincularse directamente a la configuración del *Database*, por lo tanto en dicho caso es importante verificar que la variable esté definida dentro del rango especificado, de otro modo el sistema no podrá leer la misma. Lo

más recomendable es utilizar directamente el seteo manual y setear el rango de valores deseado para evitar inconvenientes. Por último, es fundamental habilitar la pestaña *History Enable* desde el listado de variables en la base de datos, tal como se mencionó anteriormente. En las Figuras 72 y 73 se muestra la configuración tanto desde el menú de gráficos (izquierda) como desde el *Database* (derecha).

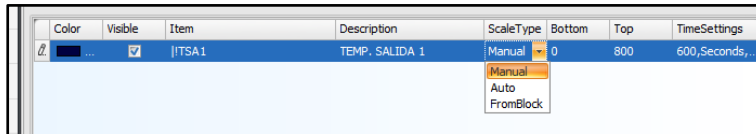


Fig. 72. Vinculación del gráfico con *Database* desde la pestaña *Pens* .

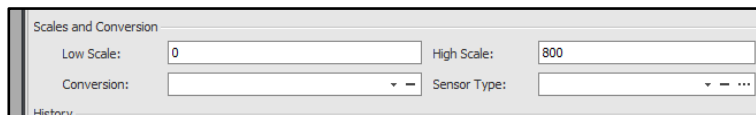


Fig. 73. Configuración de un rango de valores en *Database*.

Para configurar las alarmas también se creó un nuevo *display*, y en él se insertó la herramienta *Pulse Alarm Explorer* (desde menú *Insert* en barra superior). Al igual que en los gráficos, aquí es necesario configurar el menú propio del recurso y luego hacer lo propio con las variables involucradas desde la base de datos. Dentro de la customización del alarmero, lo más relevante es setear el apartado *General* y *Fields*, en este último se puede administrar qué información se desea mostrar en el panel de alarmas. Es posible remover aquellos campos que resulten irrelevantes, ordenarlos, personalizar el formato, encabezados, etc. El objetivo es que la pantalla resulte funcional y no abrume al operador, por ello es importante seleccionar y estructurar adecuadamente los datos que se mostrarán, de otro modo la información importante puede terminar perdiéndose ante distracciones y/o confusiones.

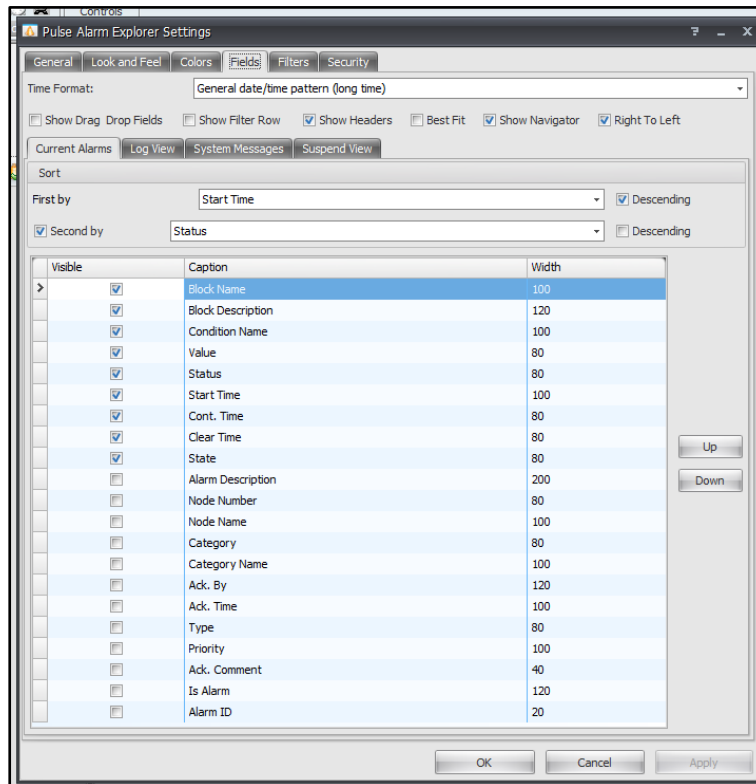


Fig. 74. Configuración de la herramienta *Pulse Alarm Explorer*.

Yendo a la configuración de Variables, desde el *Database* se pueden habilitar todas aquellas que se deseen mostrar en el alarmero. Luego, en la configuración de cada bloque existe una pestaña específica (*Alarms*) dedicada a configurar los parámetros y condiciones de activación de cada caso. Por ejemplo, en la Figura 75 está ejemplificado el seteo de alarma para la temperatura de la columna 2 (TSA2). Allí se observa el casillero *Enable Alarms* tildado, y 2 alarmas configuradas: *TSA2 HIGH* y *TSA2 LOW*. En cada una de ellas, además de su descripción, se puede determinar el tipo de activación. Para estos casos se han seleccionado las opciones *HIGH* y *LOW*, de modo tal que cuando la variable tome valores por encima o por debajo de los especificados se active una u otra alarma respectivamente. También existen otras alternativas de activación como analizar rangos de valores o alcanzar máximos y mínimos, entre otros. Adicionalmente, es posible armar carpetas con alarmas (por defecto se guardan en *Functional*), definir tipos de alarma (mediciones de nivel, riesgo eléctrico, incendio, etc) y hasta desencadenar eventos utilizando la propia alarma como *trigger*.

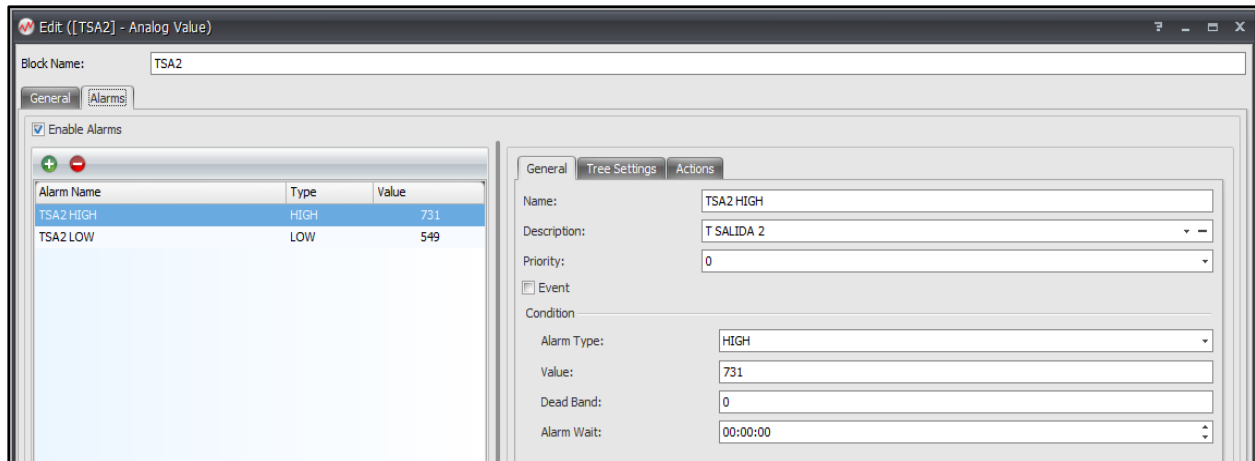


Fig. 75. Configuración de alarmas en *Database*.

Con todas las pantallas ya definidas y configuradas, se terminó por confeccionar el *Toolbar* mencionado anteriormente, dándole al usuario la posibilidad de navegar el SCADA y migrar entre *displays* de forma intuitiva. La configuración es muy sencilla, desde la pestaña *Manage* en la barra superior se accede al *Toolbars & Context Menus Manager*, donde se puede setear la apariencia, agregar botones, imágenes, texto, vincular *Workflows*, etc.

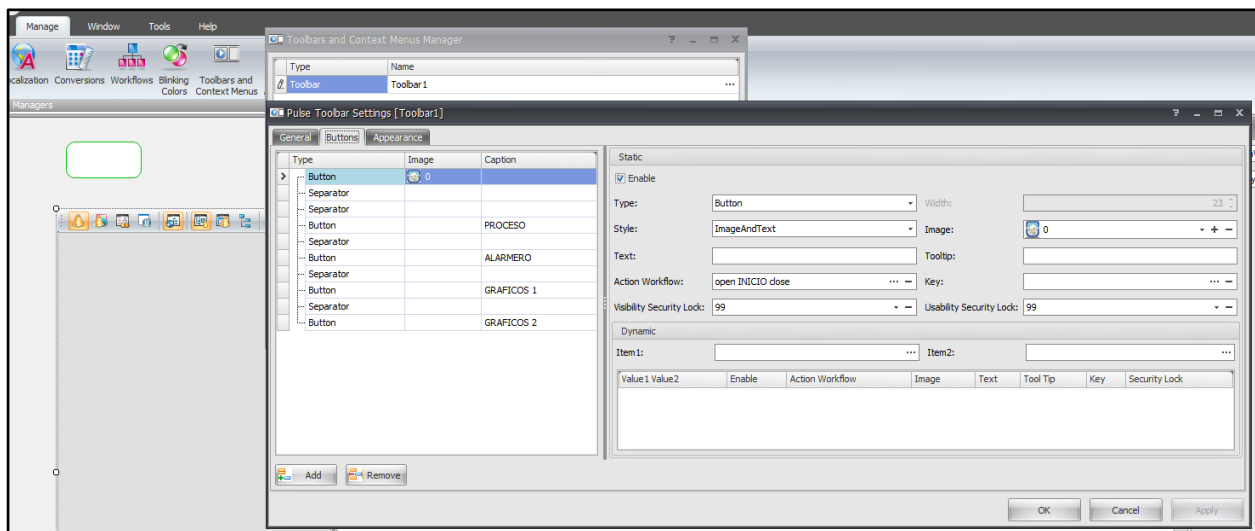


Fig. 76. Configuración de *Toolbar*.

Hasta aquí, el proceso descrito se enmarca en el *modo desarrollador* del software, pero lo cierto es que existe un ida y vuelta continuo con la modalidad operador. Esto resulta inevitable, pues por cada elemento, rutina o secuencia que se configure es necesario comprobar su funcionamiento mediante simulación. En ese aspecto, entre las herramientas que ofrece el programa, una de las más utilizadas es el *Datascopes*. Este recurso permite asignarle valores a

las distintas variables del proceso, y evaluar cómo se comporta el programa durante su ejecución. En este caso, resulta un agregado de suma utilidad al no contar con valores de entrada al sistema, puesto que al tratarse de un entorno proyectado el programa no puede implementarse físicamente. Por lo tanto, para poder simular el proceso resulta necesario forzar arbitrariamente el valor de las variables implicadas.

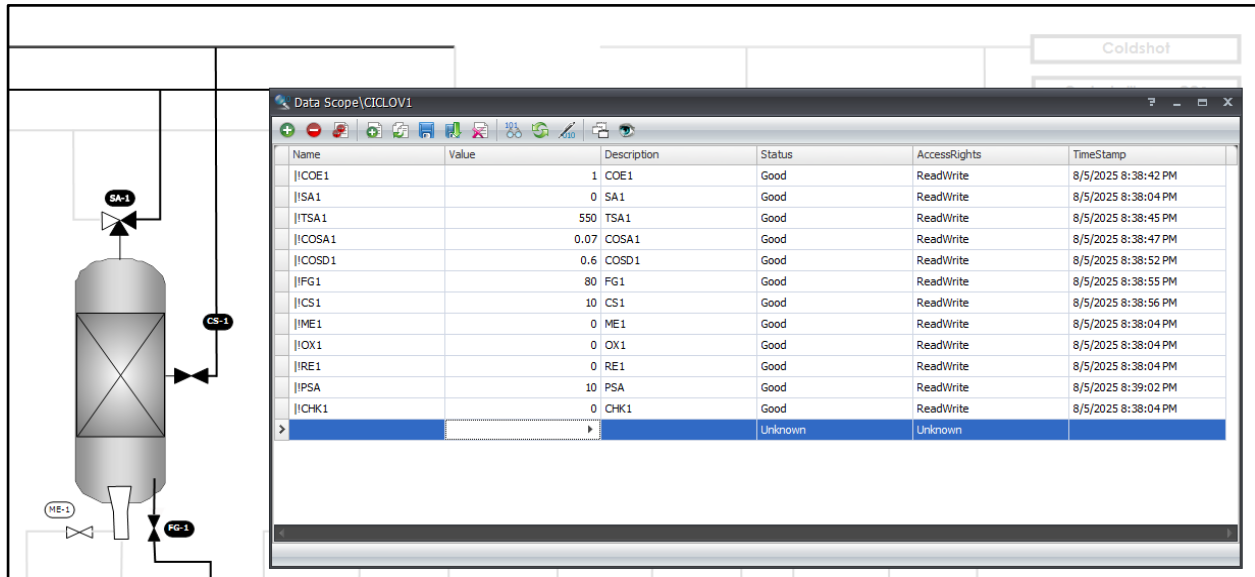


Fig. 77. Herramienta *Datascope*.

Una vez ya programados todos los componentes del SCADA y verificado su correcto funcionamiento, el software pasa a utilizarse casi en su totalidad como Operador, siendo únicamente necesario intervenir en el desarrollo descrito para modificar parámetros o referencias del proceso.

CAPÍTULO 5: Recursos y Análisis de Costos

En este apartado se detallan los recursos humanos, físicos y económicos contemplados para desarrollar el proyecto. Si bien el mismo no cuenta con implementación física, se ha considerado un inventario de equipamiento e infraestructura propuestos para su potencial aplicación. Se trata de un análisis con fines orientativos, a fin de plasmar el trabajo del estudiante y plantear una base para futuros avances al respecto.

5.1 Recursos Humanos:

Se considera la dedicación individual del estudiante para desarrollar el trabajo, sumado al asesoramiento y trabajo conjunto con director, codirector y asesores. En la siguiente tabla se desglosa el tiempo invertido (horas estimadas) para las distintas tareas a lo largo del trabajo:

Tabla 26. Desglose de tareas y tiempo de dedicación para desarrollar el trabajo.

Actividad	Detalle	Dedicación estimada del estudiante (hs)	Profesional de consulta y dedicación	
Estudio del proceso y adecuación al proyecto	Introducción al proyecto de investigación, delimitación de alcances e implicancias	35	Belzunce Magaldi	10 hs
	Determinación de layout preliminar de planta y equipos (cantidad, ubicaciones, etc)	20	Belzunce	10 hs
	Análisis y diagramación de flujo operativo	20	Belzunce	5 hs
Investigación y selección de equipamiento e infraestructura de automatización	Investigación de tecnologías para medición y control + red de comunicación	30	Demichelis Martínez Magaldi	5 hs
	Exploración de opciones comerciales y aplicaciones de referencia	30	Demichelis Martínez Magaldi	5 hs
	Selección de inventario	15	Demichelis Martínez Magaldi	2 hs
Determinación de estrategia de automatización	Vinculación de eventos entre equipos y definición de secuencia operativa	50	Belzunce Demichelis	15 hs

Diseño del SCADA	Diseño de layout y elementos de interfaz	40	Demichelis	10 hs
	Programación de eventos, animaciones y <i>Workflows</i>	60	Demichelis	20 hs
	Simulación del proceso y ajustes de diseño.	50	Belzunce Demichelis	8 hs
Redacción de informe	Estructuración del trabajo, registro y documentación del proceso de diseño	100	Belzunce Demichelis Martínez Magaldi	40 hs
TOTAL DEDICADO (HS)		450	130	

Cabe aclarar que la tabla considera el *costo horario* del proyecto como un conjunto entre la dedicación del estudiante y los profesionales consultados. Este enfoque cobra particular relevancia al extrapolar el análisis al escenario de un proyecto industrial, donde el costo de la mano de obra no depende exclusivamente del desarrollador, sino también de la contribución de áreas soporte para la implementación y funcionamiento del sistema, involucrando a proyectistas, técnicos, etc.

Por ello, en el presente trabajo se ha considerado el costo horario de los profesionales de consulta como un componente complementario al costo total de desarrollo, que debe contemplarse a la hora de cotizar este último.

5.2 Recursos físicos:

Aquí se toma en cuenta todo aquello que haya sido necesario para desarrollar el trabajo: desde estudiar el proceso, investigar y seleccionar equipos hasta diseñar el SCADA. Mayoritariamente aquí se considera el material de estudio, equipamiento computacional y de software empleados para ello, careciendo de herramientas o recursos adicionales ya que no hay implementación del proyecto.

Tabla 27. Recursos utilizados para desarrollar el trabajo.

Recurso	Utilización
Resúmenes, papers e informes relativos al	Introducción y estudio del proceso

proyecto de investigación	
Notebook personal	Diseño de diagramas, layout, diseño y simulación del SCADA, selección de inventario, documentación
Máquina virtual ORACLE	Ejecución del programa PULSE
Software PULSE by AFCON	Diseño de SCADA (interfaz, simulación, etc)
Microsoft Office	Diagramas de flujo, esquemas (Microsoft Visio) y redacción de informe (Microsoft Word)

5.3 Recursos Económicos:

A continuación se despliega el presupuesto de equipamiento e infraestructura conforme el inventario propuesto en el desarrollo del trabajo. Para simplificar el análisis, se expresa una estimación de valores en USD (dólares americanos). Cabe destacar que el presupuesto adjunto es únicamente una aproximación representativa de los costos a abordar en forma hipotética. Adicionalmente debe considerarse el cálculo de llave asociada al sistema SCADA en particular.

Desde ya , en caso de concretar alguna implementación a futuro, deberá reverse la adecuación de equipos y sus valores al momento específico. De igual manera, ante la necesidad de establecer un esquema de redundancia deberá anexarse al análisis la infraestructura considerada para tal fin. Lo mismo aplica en caso de adquirir una licencia paga del software. Dicho esto, se adjuntan las tablas correspondientes al equipamiento de campo e infraestructura de red proyectados.

5.3.1 Equipamiento de Campo

Tabla 28. Desglose de presupuesto para equipamiento de campo.

Equipo	Cant.	Modelo comercial sugerido	Precio Unitario (USD)	Total (USD)	Fuente/ Observaciones
Medidor de concentración para gases	8	YOKOGAWA TDLS8000	10.000 (estimado importado)	80.000	VVA Industrial en Argentina; precio base ~USD 8.000-12.000 ajustado por importación (+20%)

Válvula de control tipo mariposa	20	Batley Valve BV10000	1.800 (estimado importado)	36.000	No disponible localmente; estimado desde Trillium Flow (~USD 1.500) + 20% arancel/logística
Válvula de control de 3 vías	4	Batley Valve BV 831	960 (estimado importado)	3.840	Estimado desde Batley (~USD 800) + 20%
Actuador eléctrico	24	Rotork IQ3 IQT	3.600 (estimado importado)	86.400	estimado desde Rotork (~USD 3.000) + 20%
Sensor de presión	24	YOKOGAWA EJA-530E	600 (estimado local)	14.400	Disponible vía VVA Industrial en Argentina; estimado ~USD 500-600
Caudalímetro de Vórtice - Tipo 1	12	YOKOGAWA VY c/ sensor de T	1.800 (estimado local)	21.600	Distribuidores como VVA; estimado ~USD 1.500-2.000
Caudalímetro de tubo de Pitot- Tipo 2 (Q*)	12	KROHNE OPTIBAR	1.200 (estimado importado)	14.400	Estimado desde KROHNE (~USD 1.000) + 20%. Consulta a KROHNE Argentina
Termorresistencia 1	16	WIKA TR10-F	409 (estimado local)	6.544	Disponible vía WIKA Argentina; precio base ~USD 341 + 20%
Termorresistencia 2	8	WIKA TC10-F	322 (estimado local)	2.576	Disponible vía WIKA Argentina; precio base ~USD 268 + 20%
Transmisor de temperatura	24	WIKA TIF50 / TIF52	240 (estimado local)	5.760	Disponible vía WIKA Argentina; estimado ~USD 200 + 20%
Lira Pitgail	16	ASHCROFT Pigtail Siphon 1100	172 (estimado importado)	2.752	Estimado desde Ashcroft (~USD 143) + 20%. Posible vía importadores

→ Subtotal aproximado para Equipamiento de Campo ~ **USD 274.312**

5.3.2 Infraestructura de Red

Tabla 29. Desglose de presupuesto para infraestructura de red.

Equipo	Cant.	Modelo comercial sugerido	Precio Unitario (USD)	Total (USD)	Fuente/ Observaciones
PLC	1	SIEMENS S7-1200	1.380 (estimado local)	1.380	Disponible vía Siemens Argentina; precio base ~USD 1.150 + 20%
SERVIDOR PC	1	Dell PowerEdge R240	1.400 (estimado local)	1.400	Disponible vía importadores ~USD 1.200 + 20%
SWITCH PROFINET	1	SIEMENS SCALANCE <ul style="list-style-type: none"> • XC206-2SFP • XC316-8 	1.223 (XC206 estimado local)	1.223	Disponible vía Siemens Argentina; precio base ~USD 1.019 + 20%
PROXY	4	Phoenix Contact GW PL ETH/UNI-BUS - Pepperl+Fuchs LB PROFINET-HART	5.702 (Pepperl+Fuchs estimado)	22.808	Disponible vía importadores; precio base ~USD 4.752 + 20%
Cable Ethernet STP CAT6	-	Cable De Red Cat6a Rj45 Sftp 10gbps 3 Metros Vention	12 por metro (estimado local)	-	Disponible vía Mercado Libre Argentina
Cable simple par de cobre	-	Belden 82841 877500	24 por metro (estimado local)	-	Disponible vía importadores; precio base ~USD 20/m + 20%. Ajusta por longitud
Ficha conectora RJ45	8	SIEMENS RJ45 Industrial	65 (estimado local)	520	Disponible vía Siemens Argentina; precio base ~USD 54 + 20%
Borne de tornillo o resorte	192	Phoenix Contact PT 1,5/S	1,61	309	Disponible vía Phoenix Contact

		Weidmüller PDL 4			Argentina; precio base ~USD 1.34 + 20%
--	--	------------------	--	--	--

→ Subtotal aproximado para Infraestructura de Red ~ **USD 27.640**

→ Total general aproximado ~ **USD 300.000**

Aclaración: El 20% extra aplicado sobre los precios base refleja impuestos, aranceles, IVA y/o costos logísticos para equipos que deban ser importados.

A modo ilustrativo, en el siguiente gráfico (Figura 78) se representa la relación de proporción que existe entre el costo estimado para equipamiento de campo e infraestructura de red. Resulta evidente que la mayor parte del gasto estará focalizado en la instrumentación del proceso, lo cual debe complementarse a la propia inversión edilicia que representaría una hipotética construcción de planta. Mientras tanto, la incorporación de una infraestructura de comunicación acorde representa un costo mínimo en comparación al total. Esta es una clara ventaja a la hora de proyectar la automatización de la planta, manifestando una relación costo-beneficio muy atractiva, máxime al considerar las múltiples ventajas que ello supondría para su operación.

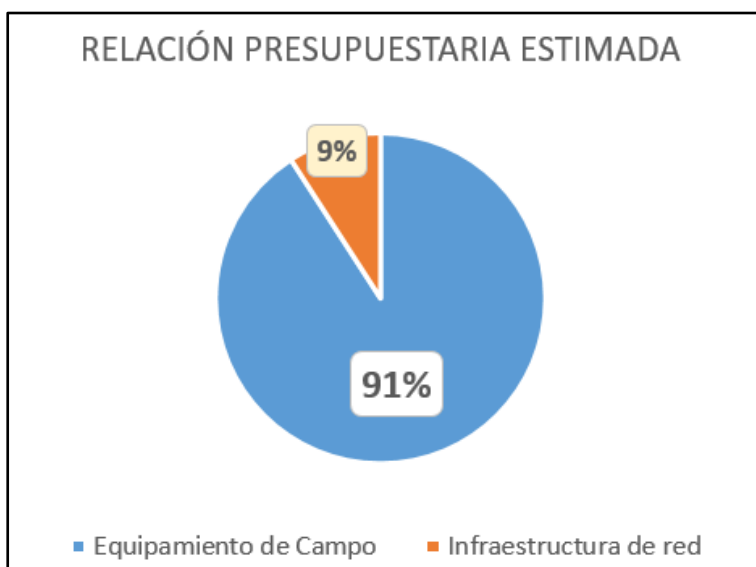


Fig. 78. Gráfico de relación presupuestaria entre equipamiento de campo e infraestructura de red.

5.3.3 Determinación de llave asociada

El último paso luego de diseñar un SCADA consiste en calcular la llave asociada al software, mediante la especificación de sus prestaciones y limitaciones, mayoritariamente en términos de licencia de uso. Conceptualmente, dicha llave representa cuáles son las características disponibles en el sistema, como ser cantidad de variables, eventos o usuarios habilitados. En forma general, esto dependerá del proyecto a realizar y sus requisitos particulares, con una fuerte influencia del proveedor de servicios (empresas propietarias como Siemens, Rockwell Automation, etc.), en el contexto de un mercado de plataformas que compiten entre sí, con diferentes recursos y valores a disposición.

Por todo esto, la llave es considerada como una herramienta de planificación y cuantificación presupuestaria, pues de ella dependerá el costo de adquirir e implementar el sistema a nivel informático.

Entonces, para calcular la llave del presente proyecto se propone un análisis cuantitativo y cualitativo basado en los siguientes parámetros:

- **Puntos de entrada/salida:** se consideran los equipos conectados a PLC, con una base de 110 elementos activos aproximadamente.
- **Cantidad de variables:** a partir del SCADA diseñado se estima el uso de al menos 62 variables, 50 de ellas analógicas y 12 digitales.
- **Cantidad de usuarios:** se asume como mínimo 1 desarrollador y 1 operador. Puede pensarse la posibilidad de incorporar otro operador y algún monitor que totalizan 4 en total.
- **Modalidad de uso:** versión demo para prototipado y simulación en modos *runtime* y *development*
- **Tipo de licencia:** versión de prueba gratuita
- **Escalabilidad y redundancia:** 1 servidor Client/Server con posibilidad de acceso web. Se podría incorporar servidor adicional o de redundancia (puede ser una en forma virtual o física, ej: PC).
- **Proveedor y región:** distribuidor/partner autorizado para Latinoamérica de AFCON Control and Automation Ltd (Israel).

Algo importante al momento de establecer estos criterios es que conviene generar cierto margen de reserva para adaptar el sistema a posibles cambios o futuras ampliaciones, por lo que se sugiere sobredimensionar las especificaciones detalladas. Por ejemplo, en vez de considerar una cantidad justa de entradas y salidas o variables, se redondeará un número ligeramente mayor (para este caso podrían ser 200 entradas/salidas y 100 variables).

Como en este proyecto se utilizó la versión de prueba gratuita con los recursos mínimos e indispensables para desarrollar el SCADA, no se puede evidenciar ningún costo económico asociado. Las características del software en dicha versión permitieron abordar al sistema en su conjunto sin mayores complicaciones. Sin embargo, a la hora de pensar en una futura aplicación del sistema será de suma importancia considerar en detalle los factores mencionados, ante la necesidad de adquirir una licencia del software que sea funcional a la demanda de uso.

CAPÍTULO 6: Estudio de Impacto Ambiental

6.1 Objetivo del análisis

En el presente capítulo se evalúan los potenciales impactos ambientales asociados a la potencial implementación y operación futura del sistema de captura de CO₂ estudiado, considerando no sólo los efectos derivados del propio proceso de captura mediante ciclos de absorción/desorción, sino también aquellos vinculados a la incorporación del sistema de control y supervisión (SCADA), proyectado como parte integrante del diseño automatizado de la planta. El análisis se centra particularmente en la etapa de operación, dado que es la de mayor incidencia ambiental para este tipo de instalaciones

6.2 Marco normativo – legal

Si bien el proyecto analizado tiene un carácter prospectivo e hipotético y, por tanto, no se encuentra asociado a un emplazamiento específico, resulta pertinente enmarcar el análisis ambiental dentro de las directrices y requisitos que habitualmente fijan las reglamentaciones de carácter nacional y provincial. Tomando como referencia el caso de la provincia de San Luis (Argentina), puede mencionarse la **Ley N° IX-0876-2013**, que establece la obligatoriedad de llevar a cabo estudios de impacto ambiental para todo proyecto cuyo desarrollo pueda generar alteraciones sobre los recursos naturales o el medio ambiente [39]. Dicha ley define la necesidad de evaluar impactos en todas las fases del ciclo de vida del proyecto (instalación, operación y cierre) e incorporar medidas de mitigación y planes de monitoreo.

A nivel general, normativas de este tipo son aplicables a plantas termoeléctricas, y el sistema automatizado/SCADA debe considerarse parte integrante del proyecto, dado que influye tanto en los niveles de consumo como en el desempeño ambiental global. El análisis que se presenta a continuación adopta ese criterio regulatorio, adaptándolo al enfoque académico del trabajo.

6.3 Línea de base ambiental

Como condición de referencia se considera el funcionamiento de una central térmica de ciclo combinado genérica. En este escenario base el impacto ambiental se caracteriza por la emisión directa de gases de efecto invernadero (principalmente CO₂), el consumo de combustibles fósiles y la generación de residuos sólidos y efluentes propios del proceso de generación.

Se asume un entorno operativo bajo condiciones medias típicas (temperatura ambiente, niveles de emisión permitidos por normativa, suministro energético sin restricciones), y se considera como línea base el valor promedio de emisiones específicas de CO₂ correspondiente a una central de 400 MW sin captura.

En la siguiente tabla se listan algunos valores de referencia:

Tabla 30. Valores de referencia para el funcionamiento de una CTCC.

Variable	Valor típico	Comentarios / Rango de referencia
Potencia eléctrica instalada	400 MW	-
Eficiencia térmica global	55–58 %	Se asume ciclo combinado moderno a gas
Consumo específico de combustible	6.8–7.2 MJ/kWh	Equivale a ~0.19–0.2 Nm ³ de gas natural por kWh generado
Emisión específica de CO₂	~403 g CO₂/kWh	Tomando factor de emisión IPCC 2019 para centrales termoeléctricas de ciclo combinado (gas natural)
Generación de residuos sólidos	1–2 kg/MWh	Principalmente residuos de mantenimiento (filtros, aceites, lodos)

Consumo de agua de refrigeración	0.5–0.9 m ³ /MWh	Depende del sistema de refrigeración (torre húmeda, circuito cerrado, etc.)
---	-----------------------------	---

Fuente: datos extraídos de múltiples fuentes online [40] – [47] con asistencia de IA (<https://chatgpt.com/>)

En base a estos parámetros se puede obtener un estimado general respecto de las emisiones anuales de CO₂. Principalmente, deben considerarse la producción anual de energía y el factor de emisión IPCC. Para el caso de Argentina, dado que la generación termoeléctrica con gas natural representa la mayor proporción, se emplea el factor para ciclo combinado, estipulado en 403g CO₂/kWh (rango entre 350-490).

Por tanto se tiene:

- 1 año = 7500 h (se asume operación continua)
- Potencia instalada = 400 MW

$$\text{Producción anual} = 400 \text{ MW} * 7.500\text{h} = 3000 \text{ GWh (5)}$$

- 3000 GWh = 3.000.000.000 kWh

$$\text{Emisiones} = 3.000.000.000 \text{ kWh} \times 0,403 \text{ kg/kWh (6)}$$

$$\text{Emisiones} = 1.209.000.000 \text{ kg de CO}_2 \text{ (7)}$$

$$1.209.000.000 \text{ kg} = 1.209.000 \text{ toneladas} = \mathbf{1,2 \text{ millones de toneladas de CO}_2}$$

Este último valor pone en evidencia la necesidad de incorporar procesos de captura sobre centrales térmicas de generación eléctrica, ante la enorme cantidad de emisiones de CO₂ liberadas al medioambiente en condiciones operativas estándar.

6.4 Identificación y evaluación de impacto

En este apartado se ha desagregado el ciclo de vida útil de la planta modelo en tres etapas. A continuación se describe cómo impactaría la misma, en conjunto con el sistema de automatización propuesto, sobre una central térmica de ciclo combinado estándar.

Tabla 31. Impactos asociados a la vida útil de la planta CCS.

Etapa	Impactos asociados a la planta de captura de CO ₂	Impactos asociados al sistema SCADA / Automatización
Instalación / integración	Emisiones indirectas por fabricación e instalación de equipos (reactores, ventiladores, bombas); generación de residuos durante la etapa de montaje	Consumo de recursos por instalación de sensores, actuadores, PLCs y cableado; posible generación de residuos electrónicos
Operación	Incremento del consumo energético por implementación del proceso de captura Potencial generación de residuos asociados al absorbente. Reducción neta de emisiones de CO₂ de la planta	Consumo energético asociado al funcionamiento del sistema automatizado Optimización de la operación , disminución de paradas no programadas, reducción de eventos con emisiones accidentales; mejora en seguridad operativa
Fin de vida / renovación	Gestión de residuos provenientes del desmontaje de equipos (estructuras, reactores, accesorios)	Gestión de residuos electrónicos (módulos PLC, sensores, servidores SCADA), necesidad de procesos adecuados de reciclaje

Fuente: elaboración propia con asistencia de IA (<https://grok.com/>)

Respecto de las etapas de Instalación y fin de vida, por ahora serán omitidas en virtud de que la planta carece de implementación física, aun así deben ser tenidas en cuenta para futuros avances al respecto.

Yendo al aspecto operativo, anteriormente se ha estimado la cantidad de emisiones correspondientes a la operación anual de una CTCC tipo. En líneas generales, se puede considerar una tasa de captura en torno al 90% de dichas emisiones en caso de adoptar un CCS post-combustión (para este caso serían ~1.088 millones de toneladas de CO₂ anuales). En contraste, esto también supondría un incremento en el consumo energético de la central per se.

Es decir, se tendría un consumo adicional de combustible para mantener la misma salida neta de energía (3000 GWh), pues el CCS genera una penalidad sobre el sistema al consumir energía para funcionar. Para tener una idea aproximada de esto, se propone el siguiente análisis, dividido en tres pasos:

1) Cálculo de eficiencia y consumo base

Aquí se tomarán los valores del paso anterior (estimativos) para una central termoeléctrica de ciclo combinado:

- **Consumo específico de combustible = 7 MJ/kWh**

→ Es la cantidad de energía térmica que se requiere para generar una unidad de energía eléctrica en kWh

- **Eficiencia de base = 51,4%**

→ Es la relación entre la equivalencia energética de 1 kWh eléctrico respecto al consumo específico de combustible

$$\frac{3.6 \text{ MJ/kWh eléctrico}}{7 \text{ MJ/kWh}} * 100\% = 51,4\% \text{ (8)}$$

- **Consumo térmico anual de base = 21 PJ**

→ Surge del producto entre producción de energía anual (3000 GWh) y consumo específico de combustible

$$3 \times 10^9 \text{ kWh} \times 7 \text{ MJ/kWh} = 2,1 \times 10^{16} \text{ MJ} = 21 \text{ PJ (petajulios)} \text{ (9)}$$

2) Penalización energética por CCS

Se estima una reducción en la eficiencia neta de la central en 8 puntos porcentuales (promedio) ante la adopción de un CCS post-combustión con disolvente sólido de Ortosilicato de Litio. Dicha penalidad responde a las siguientes consideraciones:

- **Calor para desorción: entre 2.5 y 3.5 MJ/kg CO₂ capturado**, suministrado por combustión suplementaria.
- **Electricidad parasítica: entre 0.1 y 0.15 MWh/t CO₂ capturado** para etapas de compresión, ASU y manejo de sólidos).
- **Pérdidas por ciclos intercalados** (absorción/desorción).

En función de esto, se puede aproximar un nuevo valor de eficiencia de la siguiente manera:

- **Nueva eficiencia (η_{nueva}) = 43.4%**

→ Resulta de la resta entre la eficiencia de base y la penalización por CCS

$$\text{Nueva eficiencia } (\eta_{\text{nueva}}) = 51.4\% - 8\% = 43,4\% \text{ (10)}$$

3) Cálculo de nuevo consumo energético

Puesto que la eficiencia base de planta ha sido en parte degradada, se recalcula el consumo para analizar el impacto sobre la operación estándar de la central térmica.

- **Nuevo consumo específico = 8.29 MJ/kWh**

→ Representa la energía necesaria para generar 1kWh respecto de la nueva eficiencia

$$3.6 \text{ MJ/kWh} / 0.434 = 8.29 \text{ MJ/kWh} \text{ (11)}$$

- **Incremento por kWh = 1.29 MJ/kWh.**

→ Surge por la diferencia entre consumo específico con y sin CCS

$$8.29 \text{ MJ/kWh} - 7 \text{ MJ/kWh} = 1.29 \text{ MJ/kWh} \text{ (12)}$$

- **Incremento anual = 3.87 PJ**

→ Se calcula como el incremento de energía por cada kWh aplicado a la producción anual de energía (3000GWh)

$$1.29 \text{ MJ/kWh} \times 3 \times 10^9 \text{ kWh} = 3.87 \times 10^9 \text{ MJ} \text{ (13)}$$

- **Porcentaje de incremento en consumo \approx 18.4%**

→ Es la fracción del aumento de consumo energético sobre el total

$$\left(\frac{8.29 \text{ MJ/kWh}}{7 \text{ MJ/kWh}} - 1 \right) \times 100\% \approx 18.4\% \text{ (14)}$$

Una aclaración respecto de estos resultados. Es evidente que la adopción de un sistema CCS conlleva un incremento apreciable por sobre el consumo energético de una central térmica estándar. En la Figura 79 se exhibe un gráfico comparativo para ejemplificar el análisis. Sin embargo, estos valores no son representativos por sí solos, luego deben contrastarse con los beneficios que supondría la incorporación de estas tecnologías en términos ambientales y

también económicos. A partir de ello, se deberá contemplar un balance costo-beneficio para determinar la viabilidad del proyecto en caso de una potencial aplicación.

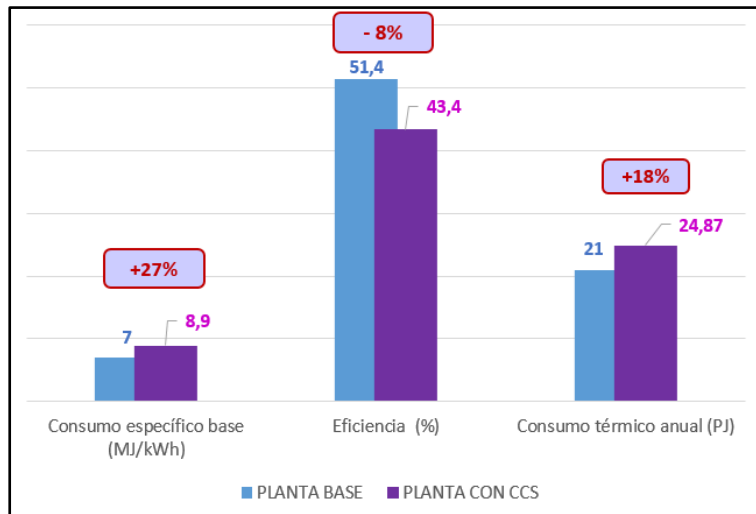


Fig. 79. Balance de consumos y eficiencia de una CTCC con y sin CCS.

Por su parte, adicionalmente se ha realizado un análisis de aproximación respecto del consumo energético de los componentes propuestos para el sistema automatizado. En la siguiente tabla se detallan los mismos, indicando su consumo estimado:

Tabla 32. Consumo energético del sistema de automatización.

Componente	Cant	Modelo	Consumo individual (W)	Consumo Total (W)	Fuente/Nota
Medidor de concentración de gases	8	YOKOGAWA TDLS8000	100	800	Hoja técnica: Alimentación 100-240 V AC, máx. 100 VA (aprox. 100 W en operación típica).
Actuador eléctrico	24	Rotork IQ3 IQT	20	480	Hoja técnica: Consumo en espera ~20-25 W (incluye calentador); motor ~50-100

					W al actuar, pero no continuo.
Sensor de presión	24	YOKOGAWA EJA530E	0.5	12	4-20 mA loop, ~0.5 W a 24 V DC.
Caudalímetro de vórtice	12	YOKOGAWA VY	1	12	Alimentación 10.5-42 V DC, ~1 W típico.
Caudalímetro de tubo de Pitot	12	KROHNE OPTIBAR	0.5	6	4-20 mA, ~0.5 W típico
Transmisor de temperatura	24	WIKA TIF50/TIF52	0.5	12	4-20 mA, ~0.5 W típico.
PLC	1	SIEMENS S7-1200	12	12	Consumo promedio 500 mA a 24 V DC (~12 W)
Servidor PC	1	Dell PowerEdge R240	100	100	Medición típica: Idle ~65 W, carga ~166 W; promedio asumido 100 W.
Switch	1	SIEMENS SCALANCE XC208	6	6	Máx. ~5.3-6 W.
Proxy/Gateway	4	Phoenix Contact / Pepperl+Fuchs PROFINET-HART	5	20	Típico ~3-5 W por unidad (HD2-GTR-4PA.PN ~3 W).
<u>CONSUMO TOTAL (W)</u>			<u>1460</u>		

Cálculo de consumo energético:

- **Potencia total del sistema:** 1460 W (1.46 kW).

$$\text{Consumo diario: } 1,46 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 35,04 \text{ kWh/día (15)}$$

$$\text{Consumo anual: } 35,04 \text{ kWh/día} \times 365 \text{ días} = 12790 \text{ kWh/año (16)}$$

Cálculo de emisiones implicadas:

Para aproximar las emisiones de CO₂ que representa dicho consumo, se utilizará el mismo factor IPCC que en el apartado anterior (0,403 kg CO₂/kWh, suponiendo que la propia central termoeléctrica se encargará de suministrar la energía necesaria). Caso contrario (ej: alimentación por conexasión a red nacional), puede utilizarse un factor de emisión aproximado, basado en datos de la Secretaría de Energía. El factor promedio estimado para 2025 es de 0.375 kg CO₂/kWh, el cual representa la participación de todas las fuentes de energía (renovables y no renovables) de la matriz energética nacional.

Por lo tanto, para este caso se tendrá lo siguiente:

$$\text{Emisiones} = 12790 \text{ kWh/año} \times 0,403 \text{ kg CO}_2/\text{kWh (17)}$$

$$\text{Emisiones} = 5154,4 \text{ kg de CO}_2 \sim 5 \text{ toneladas de CO}_2 \text{ (18)}$$

Puede observarse que tanto el consumo energético como las emisiones anuales de CO₂ resultan marginales en comparación al total de la central térmica (3000 GWh y más de 1,2 millones de toneladas de CO₂). A fines prácticos, dicha relación se ha representado en un gráfico de Excel, que puede observarse en la Figura 80. Por tanto, el impacto energético y ambiental de automatizar el sistema e incorporar un SCADA resulta ínfimo en comparación a la utilidad que esto supone para la operación de una central termoeléctrica; en virtud de optimizar su funcionamiento al reducir paradas no programadas y evitar consumos o emisiones no deseados.

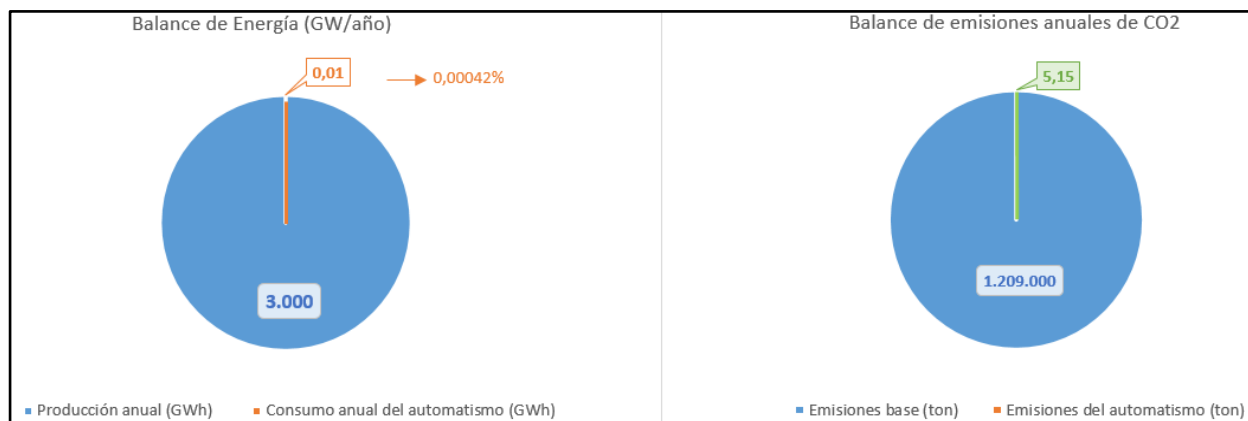


Fig. 80. Gráfico de impacto energético y ambiental correspondiente al sistema de automatización.

6.5 Medidas de mitigación potenciales

Para la planta de captura:

- Gestionar el tratamiento y disposición adecuada de potenciales residuos asociados al absorbente. Si bien resulta necesario avanzar los estudios en ese sentido, en caso de requerir un recambio del absorbente se obtendrá una mezcla de sólidos, compuesta de Carbonato de Litio, Ortosilicato de litio, Metasilicato de Litio, impurezas y cenizas. Priorizar la selección de materiales con menor huella ambiental en la etapa de diseño.

Para el sistema automatizado/SCADA:

- Aplicar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo que eviten fallos con consecuencias ambientales.
- Favorecer actualizaciones de software que no impliquen recambio de hardware.
- Incorporar procedimientos de reciclaje y disposición segura de componentes electrónicos fuera de servicio.

6.6 Plan de seguimiento y monitoreo

Se propone un conjunto de indicadores ambientales que permitan evaluar el desempeño del sistema integrado (estos son solo algunos, desde ya que podrían agregarse otros):

Tabla 33. Indicadores de seguimiento y monitoreo sugeridos.

Indicador	Descripción
Tasa de reducción neta de CO ₂	Toneladas de CO ₂ capturadas respecto a central termoeléctrica convencional.
Consumo energético específico	kWh por tonelada de CO ₂ capturado
Tasa de fallos operativos del sistema SCADA	Número de interrupciones/registros de falla relacionados con la automatización
Generación de residuos sólidos y electrónicos	Cantidad de residuos generada por reemplazo de absorbente y de componentes electrónicos

Para este apartado en particular, resulta de suma utilidad la aplicación del sistema SCADA, ya que permitiría obtener información constante respecto al desempeño de la planta durante su operación. Por ejemplo, a partir del análisis de caudal de gas a la entrada y salida de las columnas, se puede obtener un balance respecto de la proporción de CO₂ capturado. Se trata de información disponible para el usuario de manera intuitiva, incluso representada mediante gráficos en tiempo real e históricos para el control de flujo. En base a ello, luego se podrían crear reportes de sustentabilidad y monitoreo, que sirvan como material de soporte y evidencia operativa.

Por su parte, a la hora de proyectar un plan de seguimiento, resulta fundamental considerar la significativa reducción de emisiones a partir de la línea base, lo cual impacta de manera positiva en el medioambiente. En términos generales, considérese una tasa de reducción en torno al 90% del valor acumulado anual entre las emisiones de CTCC más las del CCS y SCADA. En efecto, dicho indicador pone de manifiesto la efectividad del proceso, con la ventaja adicional de disponer de CO₂ concentrado y comprimido listo para ser comercializado y utilizado en aplicaciones futuras. En forma aproximadamente puede tomarse el siguiente cálculo como parámetro:

$$\text{Emisiones totales CTCC + CCS + SCADA} = 222.461,4 \text{ ton. CO}_2 + 1.209.000 \text{ ton. CO}_2 \text{ (19)}$$

$$\text{Emisiones totales CTCC + CCS + SCADA} = 1.431.461 \text{ ton. CO}_2 \text{ (20)}$$

$$\text{Emisiones capturadas} = 1.431.461 \text{ ton. CO}_2 * 90\% = 1.288.315 \text{ ton. CO}_2 \text{ (21)}$$

6.7 Conclusiones

Del análisis realizado se desprende que la adopción de un CCS implicaría, naturalmente, un incremento en el consumo energético del proceso de generación de energía. No obstante el balance ambiental resultaría positivo ante la posibilidad de reducir significativamente las emisiones respecto a la situación base.

Por su parte, la incorporación de un sistema automatizado + SCADA representa una mejora adicional al desempeño global, dado que permitiría monitorear y optimizar las operaciones, minimizar riesgos de fallos, reducir tiempos improductivos y por consiguiente evitar situaciones de emisión no controlada, todo esto a un costo energético mínimo. En conjunto, ambos enfoques conforman una solución técnicamente viable y ambientalmente favorable, en concordancia con los principios que establecen las legislaciones ambientales vigentes aplicables a este tipo de proyectos.

CAPÍTULO 7: Propuestas de mejora y avances

A lo largo del desarrollo de este trabajo, y en retrospectiva luego de finalizar el mismo, se han identificado numerosos aspectos de interés que representan oportunidades de mejora. Esto resulta de suma importancia al tratarse de un proyecto con potencialidad de desarrollo hacia el futuro, en virtud de maximizar las utilidades para su hipotética aplicación. A continuación, se describe un conjunto de propuestas orientadas a enriquecer el trabajo presentado.

7.1 Adquirir Licencia de PULSE:

Sin dudas una de las limitaciones a la hora de diseñar el sistema SCADA fue la de contar con una versión demo del programa PULSE SCADA. Como se mencionó anteriormente, esto repercutió en ciertas concesiones a la hora de programar eventos y simulaciones. Se sugiere a futuro la adopción de una licencia oficial del software, de manera tal que puedan optimizarse los programas realizados, e incorporar nuevas funcionalidades. Sobre todo, se propone avanzar en la programación paramétrica para disminuir el costo computacional del sistema, flexibilizar su adaptación al proceso y darle una mayor escalabilidad de aplicación, para casos en los que se ejecuten secuencias de mayor complejidad o extensión. Considérese que para este trabajo se han contemplado una cantidad relativamente acotada de variables de control, pues el programa se rige mayormente por mediciones de temperatura, presión y caudal. Si se lo quisiera extrapolar hacia una aplicación industrial intensiva, seguramente deberían incorporarse una mayor cantidad de condiciones que permitan tener un control más fino sobre el proceso y su operación.

7.2 Programación del Supreme Report:

En concordancia con lo indicado en la descripción del sistema SCADA, uno de los recursos más interesantes de los que dispone AFCON dentro de su gama de productos, es el Supreme Report. Por cuestiones de tiempo y destreza en su utilización, en este trabajo no se ha incluido la programación de reportes. Si bien se dedicó un tiempo al estudio del programa para vincularlo al sistema SCADA por parte del alumno, lo cierto es que se evidenció la necesidad de un período más extenso para dominar la herramienta y aprovecharla plenamente. Por lo tanto, se ha decidido plantear su incorporación como futura oportunidad de mejora.

Se considera que este sería un agregado valioso, en pos de maximizar las utilidades de adquisición de datos, contribuyendo a incrementar el control y trazabilidad del proceso. Como complemento al SCADA - el cual ya dispone de alarmas y gráficos para el monitoreo de operaciones - Supreme Report agrega la posibilidad de generar informes automáticos y

personalizados a partir de la información recolectada sobre los ciclos de captura. En función de esto, por ejemplo, se podrían plantear comparativas en relación a ciertos márgenes de referencia para identificar puntos de atención y optimizar la eficiencia operativa en el día a día. Por otro lado, también se propone como una herramienta muy útil en términos de gestión ambiental para confeccionar informes e indicadores sobre emisiones y consumo energético, que permitan validar el cumplimiento de normativas y certificaciones ante autoridades regulatorias.

En síntesis, la incorporación de Supreme Report a este proyecto constituye una propuesta de alto valor para gestionar las instalaciones de planta, brindando soporte para la toma de decisiones y maximizando el control sobre la misma.

7.3 Incluir etapas restantes del proceso:

Tal como se mencionó al inicio del desarrollo, este trabajo se ha enfocado específicamente en la etapa de captura dentro del modelo de planta propuesto. Sin embargo, el proyecto de investigación del cual parte contempla un proceso mucho más amplio, por lo que deben considerarse las etapas previas y posteriores a dicha operación de captura para obtener una visión integral del mismo. En este sentido, habiendo abordado la proyección del automatismo y sistema SCADA para la fase central, resulta natural pensar en la expansión hacia las restantes. Tomando como base lo trabajado, se deberán anexar los trenes de compresión implicados y evaluar cuáles son sus condiciones operativas, para completar la secuencia de automatización planteada preliminarmente y reconstruir el flujo de operaciones. Asimismo, deberá evaluarse la incorporación de equipamiento y/o actualización de infraestructura para vincular nuevos componentes al sistema. Esto es muy importante porque hasta aquí se ha dimensionado el proyecto de manera tal que sea funcional a una cantidad específica de instrumentación, en caso de incurrir en una ampliación debe prestarse especial atención en no sobrepasar los límites del equipamiento proyectado. De otra manera, se estaría atentando contra la premisa de eficientizar el proceso, representando incluso un riesgo de seguridad ante la inminencia de fallas y/o anomalías imprevistas.

Por el lado del SCADA, se sugiere agregar nuevas pantallas que complementen a la del proceso representado hasta ahora, para no saturar de información al operador. Asimismo, será necesario configurar nuevas variables de control y programación de *Workflows*. Se trata, en todos los casos, de extrapolar lo que ya se hizo a mayor escala, para obtener un sistema más abarcativo y completo sobre la planta de tratamiento de gases.

7.4 Implementación física piloto:

Uno de los avances que podrían pensarse es la aplicación preliminar de un automatismo sobre la planta piloto de ensayos para la operación de captura. Particularmente, la parte experimental del proyecto de investigación se desarrolla en los laboratorios del Instituto Balseiro, en la localidad rionegrina de San Carlos de Bariloche. En virtud de fortalecer el vínculo colaborativo entre instituciones, podría pensarse en una iniciativa de participación conjunta sobre los ensayos para evaluar el impacto de automatizar el proceso a pequeña escala.

Para ello en primer lugar sería necesario relevar las instalaciones de prueba y el equipamiento utilizado. Luego, a partir de ello analizar la factibilidad de adaptar un sistema de automatización sobre la infraestructura existente, y de ser posible disponer de una mínima parte del equipamiento proyectado para monitoreo y control del proceso. Seguramente las condiciones de funcionamiento no sean exactamente las mismas que se consideran en el trabajo, que considera su aplicación a una central termoeléctrica. Aun así, resultaría interesante obtener una primera aproximación sobre la respuesta y comportamiento ante un sistema simplificado de automatización.

En tanto, el sistema SCADA diseñado en PULSE cuenta con la posibilidad de vincularse fácilmente a un PLC, el cual debería ser previamente programado en lenguaje ladder, vía software TIA PORTAL. Partiendo de los esquemas grafcet que se adjuntan en este trabajo, dicha tarea se vería agilizada. Luego sería necesario ajustar las entradas/salidas en función del equipamiento que se disponga y las condiciones operativas disponibles.

Entiéndase que todo esto demandaría una coordinación de tiempos y esfuerzos que requieren una planificación detallada a largo plazo (desde el vamos implicaría instalarse temporalmente en cercanía a los laboratorios de ensayo). Sin embargo, no deja de ser una propuesta interesante como futuro proyecto de extensión para estudiantes interesados en profundizar de manera práctica la formación obtenida en materia de automatización industrial. Y en lo que concierne a este trabajo, una iniciativa de este tipo permitiría obtener material valioso para futuras revisiones y/o mejoras sobre lo que se ha proyectado.

7.5 Incorporación de funciones IoT al SCADA:

En el contexto de integración del proyecto a los estándares de la industria 4.0, uno de los posibles avances es la incorporación de herramientas como ser el control remoto del sistema SCADA, la visualización de notificaciones en el celular y el almacenamiento de datos en la nube.

Si bien esto no fue explícitamente contemplado en esta fase del proyecto, no se debe a restricciones del software elegido, sino al hecho de que se limitó el abordaje del trabajo a desarrollar el SCADA para ser operado desde una PC, en el entorno de una planta industrial. A partir de ello luego puede pensarse en posibles expansiones y diversificación de funcionalidades para el usuario. En este sentido, vale destacar las capacidades de PULSE para avanzar en dicho sentido:

- **Conectividad Nube (Cloud):** PULSE maneja bases de datos (generalmente SQL Server). Puede configurarse el SCADA para que registre datos en una base de datos alojada en la nube (como Azure SQL) o utilizar protocolos como **OPC UA** o **MQTT** para enviar datos a plataformas IoT.
- **Control Remoto/Móvil:** PULSE cuenta con módulos de **Web Server** (Smart Client / HTML5) que permiten visualizar y controlar la planta desde un navegador web o móvil. También posee la App AFCON PULSE Mobile para vincular directamente el SCADA a un teléfono celular inteligente.
- **Notificaciones:** El software permite el envío de correos electrónicos y SMS mediante *scripts* (códigos) o módulos de alarmas. Para notificaciones "*Push*" (por ejemplo, WhatsApp), se suele requerir una integración vía API o un servicio intermedio que facilite la comunicación entre el sistema y servicios conectados a internet.

CAPÍTULO 8: Conclusiones

El presente trabajo final de grado ha logrado proyectar con éxito la automatización y diseño de un sistema SCADA para una planta modelo de captura de CO₂ postcombustión, concebida para centrales térmicas de ciclo combinado. A lo largo del mismo, se consolidó la integración interdisciplinar entre las ingenierías mecatrónica y química, tomando como base el proyecto de investigación “Diseño, modelado y simulación de procesos químicos para la disminución de gases contaminantes”.

A partir del estudio conjunto del proceso, se trabajó en la definición y disposición de instrumentos e infraestructura necesarios, analizando las condiciones operativas para diagramar el flujo de operaciones y plantear una secuencia estratégica sobre las mismas. Este esquema de vinculación entre equipos sirvió como punto de partida para desarrollar el sistema SCADA.

Respecto a este último, se superaron múltiples limitaciones derivadas de la falta de licencia del software PULSE, constituyendo un sistema integral, concebido desde el inicio en base a los estándares del diseño de interfaces, y que refleja de manera intuitiva el proceso abordado. El SCADA integra múltiples pantallas y herramientas visuales que permiten tener un panorama completo de las operaciones para la supervisión y control en tiempo real.

Por otro lado, a pesar de no haber implementado el proyecto en forma física, se trabajó en una estimación presupuestaria orientativa del equipamiento seleccionado. En complemento, se realizó un análisis de impacto ambiental, destacando los beneficios de adoptar un sistema de automatización, con un impacto positivo ante la mitigación de riesgos y anomalías mediante el monitoreo de las operaciones y las emisiones de CO₂.

De cara al futuro se han identificado diversas propuestas de mejora, como adquirir una licencia paga del software, la programación de informes automatizados, y la incorporación de las etapas restantes para el acondicionamiento y tratamiento de gases, en vistas de avanzar hacia una potencial implementación física piloto del sistema, para validar y perfeccionar el mismo.

Por todo esto, se concluye que este trabajo no solo ha alcanzado los objetivos propuestos, sino que abre el camino para seguir mejorando y fomentar la continuidad colaborativa. Los resultados obtenidos evidencian la importancia de alinear la concepción de procesos con los lineamientos de la industria 4.0, permitiendo maximizar las utilidades desde la incorporación de tecnologías que permitan asistir y facilitar las tareas operativas. La ingeniería mecatrónica se posiciona así como disciplina integradora clave para desafíos de esta naturaleza, resultando de gran utilidad en el abordaje del proyecto.

Glosario

<i>CCS</i>	<i>Acrónimo de Carbon Capture and Storage (Captura y Almacenamiento de Carbono)</i>
<i>CO₂</i>	<i>Fórmula química del Dióxido de Carbono.</i>
<i>CTCC</i>	<i>Acrónimo de Central Térmica de Ciclo Combinado.</i>
<i>GRAF CET</i>	<i>Acrónimo de Gráfico de Control de Etapas y Transiciones</i>
<i>POPUP</i>	<i>Ventana emergente</i>

Referencias Bibliográficas

- [1] (n.d), *Energy Technology Perspectives 2023*. IEA [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023> [Accedido: 25-sep-2024]
- [2] *Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change*. IPCC intergovernmental panel on climate change, 2022.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
[Accedido: 25-sep-2024]
- [3] I. Havercroft, *Global Status of CCS - A Policy and Project overview*, 2024.
<https://www.env.go.jp/content/000305201.pdf> [Accedido: 25-sep-2024]
- [4] (n.d), *¿QUÉ ES EL CAMBIO CLIMÁTICO?* Acciona [En línea]. Disponible en: <https://www.acciona.com/es/cambio-climatico> [Accedido: 25-sep-2024]
- [5] A.Aneise, E.Möhle, D.Schteingart, *Emisiones de gases de efecto invernadero*, 2024. Argendata.Fundar [En línea]. Disponible en: <https://argendata.fund.ar/topico/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero/> [Accedido: 25-sep-2024]
- [6] (n.d), *La matriz energética de la Argentina*. Shale en Argentina [En línea]. Disponible en: <http://www.shaleenargentina.com.ar/la-matriz-energetica-de-la-argentina> [Accedido: 25-sep-2024]
- [7] (n.d), *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero y Monitoreo de Medidas de Mitigación*. Subsecretaria de Ambiente, Argentina [En línea]. Disponible en: <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/resultados> [Accedido: 25-sep-2024]
- [8] *Gobernanza para lograr una Transición Energética Justa en Argentina*. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2022.
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/se_planarte_transicion_energetica_v2.pdf
[Accedido: 25-sep-2024]

- [9] (n.d), *Cómo se produce electricidad en Argentina: mix de generación en 2024*. Alpes Energy, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.alpesenergy.com/blog/2024/08/27/como-se-produce-electricidad-en-argentina-mix-de-generacion-en-2024/#:~:text=de%20generaci%C3%B3n%202024-.C%C3%B3mo%20se%20produce%20electricidad%20en%20Argentina%3A%20mix%20de%20generaci%C3%B3n%20en,perfila%20el%20mix%20e> [Accedido: 25-sep-2025]
- [10] M. Strojny, P. Gładysz, D. P. Hanak, W. Nowak, *Comparative analysis of CO₂ capture technologies using amine absorption and calcium looping integrated with natural gas combined cycle power plant*. Energy, 284, 2023, 128599. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128599> [Accedido: 25-sep-2024]
- [11] D. Garrote, *IoT en la Industria 4.0 ¿Qué papel juega actualmente?* Nuclio, digital school, 2022 [En línea]. Disponible en: <https://nuclio.school/blog/el-iot-en-la-industria-4/> [Accedido: 03-mar-2025]
- [12] (n.d), *Impacto y aplicaciones del IoT en Industria 4.0 y sector productivo*. Telefónica, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/impacto-y-aplicaciones-del-iot-en-industria-4-0-y-sector-productivo/> [Accedido: 03-mar-2025]
- [13] J. Carletto, J. Demichelis, M. Romero, *Introducción a los SCADA*. Villa Mercedes, San Luis, 2024.
- [14] J. Carletto, J. Demichelis, M. Romero, *Introducción a las Comunicaciones Industriales*. Villa Mercedes, San Luis, 2023.
- [15] (n.d), *ISA112, SCADA Systems*. International Society of Automation [En línea]. Disponible en: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa112> [Accedido: 03-mar-2025]
- [16] J. Carletto, J. Demichelis, M. Romero, *Sistemas SCADA*. Villa Mercedes, San Luis, 2024.

- [17] (n.d), *Megaplantas de captura de CO₂*. Norvento Enerxia, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.norvento.com/blog/megaplantas-captura-co2/> [Accedido: 30-sep-2024]
- [18] *Air Liquide invierte en una unidad de captura de carbono en Argentina*. Air Liquide, Press Release, 2020. https://ar.airliquide.com/sites/al_ar/files/2020/12/15/air-liquide-argentina-8m-co2-plant-salta.pdf [Accedido: 30-sep-2024]
- [19] (n.d), *HIF Haru Oni*. HIF [En línea]. Disponible en: <https://es.hifglobal.com/locations/hif-haru-oni> [Accedido: 30-sep-2024]
- [20] L. Valente, *E-Fuel: cómo se fabrica el combustible sintético de Porsche en Chile*. Autoblog Argentina, 2023 [En línea]. Disponible en: <https://autoblog.com.ar/porsche-e-fuel-chile-produccion/> [Accedido: 30-sep-2024]
- [21] Open AI, *Como funciona la tecnología TDLS*. Chat GPT (versión 3.5) [En línea]. Disponible en: chat.openai.com [Accedido: 5-nov-2024]
- [22] (n.d), *Tunable Diode Laser Spectrometers*. YOKOGAWA [En línea]. Disponible en: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/measurement/analyzers/gas-analyzers/tunable-diode-laser-spectrometer/> [Accedido: 5-nov-2024]
- [23] (n.d), *Medición del caudal de vórtice*. EMERSON [En línea]. Disponible en: <https://www.emerson.com/es-mx/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-vortex#:~:text=Los%20caudal%C3%ADmetros%20de%20v%C3%B3rtice%20miden,repitivo%20de%20v%C3%B3rtices%20en%20remolino> [Accedido: 5-nov-2024]
- [24] (n.d), *Caudalímetros Vortex*. Endress + Hauser [En línea]. Disponible en: <https://www.ar.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-caudal/caudalimetros-vortex?filter.p=2&filter.fb=true> [Accedido: 5-nov-2024]
- [25] A. Creus, *Instrumentación Industrial*, 8va ed. México, D.F: Alfaomega, marcombo 2010.

- [26] (n.d), *Principio de medición del tubo de Pitot*. Fuji Electric [En línea]. Disponible en: <https://www.fujielectric.fr/es/tecnologias/tubos-pitot/#:~:text=La%20medici%C3%B3n%20del%20caudal%20mediante,el%20%C3%A1rea%20cubierta%20por%20cada> [Accedido: 6-nov-2024]
- [27] Matan, *Sensor de presión resonante*. Electricity-Magentism [En línea]. Disponible en: <https://www.electricity-magnetism.org/es/sensor-de-presion-resonante/#:~:text=En%20estos%20sensores%2C%20la%20presi%C3%B3n,convertidos%20en%20una%20se%C3%B1al%20el%C3%A9ctrica> [Accedido: 6-nov-2024]
- [28] (n.d), *5 conceptos fundamentales sobre los sifones cola de cerdo (pigtail syphon)*. RED FLUID, 2022 [En línea]. Disponible en: <https://redfluid.es/sifones-cola-cerdo-instrumentacion/> [Accedido: 6-nov-2024]
- [29] C. Kolstad, *Actuadores eléctricos*. TAMESON [En línea]. Disponible en: <https://tameson.es/pages/valvula-de-bola-neumatica-y-electrica-como-funcionan#electric-actuators> [Accedido: 10-nov-2024]
- [30] (n.d), *Cómo funciona un actuador eléctrico*. Dombor [En línea]. Disponible en: <https://www.dombor.com/es/how-does-an-electric-actuator-work/> [Accedido: 10-nov-2024]
- [31] (n.d), *Transmisores de Temperatura*. WIKA [En línea]. Disponible en: https://www.wika.com/es-es/transmisores_de_temperatura.WIKA [Accedido: 10-nov-2024]
- [32] Grupo WIKA, *Transmisor de temperatura para mediciones seguras en procesos industriales*. WIKA [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=xX90q9-uoLw> [Accedido: 10-nov-2024]
- [33] *Introducción a HART*. EMERSON Process Managment, PlantWeb University, 2002. <https://www.emerson.com/documents/automation/training-engsch-buses-201-es-es-41574.pdf> [Accedido: 12-dic-2024]
- [34] (n.d), *¿Qué es el PROTOCOLO HART?* Técnico Z [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=l6G1X5C1qbM> [12-dic-2024]

[35] J. Carletto, J. Demichelis, M. Romero, *Buses de campo*. Villa Mercedes, San Luis, 2023.

[36] (n.d), *PROFINET: ¿Qué es y cómo funciona?*. Profibus - Profinet [En línea]. Disponible en: <https://profibus.com.ar/profinet-que-es-y-como-funciona/> [Accedido: 12-dic-2024]

[37] (n.d), *Proxies y Gateways PROFINET*. UNIVERSIDAD PROFINET [En línea]. Disponible en: <https://profinetuniversity.com/caracteristicas-especiales-profinet/proxies-y-gateways-profinet/>

[Accedido: 12-dic-2024]

[38] J. Carletto, J. Demichelis, M. Romero, *Normativas para los sistemas SCADA*. Villa Mercedes, San Luis, 2025.

[39] *Ley N° IX-0876-2013*. Poder Legislativo Provincial, San Luis, 2013. https://www.ecofield.net/Legales/Sanluis/leyIX-876-13_SLuis/leyIX-0876-13_SLuis.pdf

[Accedido: 25-sep-2025]

[40] (n.d), *How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation?* EIA U.S. ENERGY ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11&utm_source=chatgpt.com

[Accedido: 28-ago-2025]

[41] B. Singh, A. Strømman, E. Hertwich, *Life cycle assessment of natural gas combined cycle power plant with post-combustion carbon capture, transport and storage*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5, 2011, 1006786. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.03.006>

[Accedido: 28-ago-2025]

[42] R. Myhre, *Water & Sustainability*. U.S. Water Consumption for Power Production—The Next Half Century, EPRI, 3, 2002. https://www.circleofblue.org/wp-content/uploads/2010/08/EPRI-Volume-3.pdf?utm_source=chatgpt.com [Accedido: 28-ago-2025]

[43] I. Rodriguez, *Combined cycle power plant efficiency: what you need to know*. ARANER [En línea]. Disponible en: https://www.araner.com/blog/combined-cycle-power-plant-efficiency-what-you-need-to-know?utm_source=chatgpt.com [Accedido: 28-ago-2025]

[44] (n.d), *Utilities and Industry Continue Learnings Around Benefits of Heat Rate Improvement*.

POWER [En línea]. Disponible en: https://www.powermag.com/utilities-and-industry-continue-learnings-around-benefits-of-heat-rate-improvement/?utm_source=chatgpt.com

[Accedido: 28-ago-2024]

[45] T-D. Hoang, D. Pawluskiewicz, *The efficiency analysis of different combined cycle power plants based on the impact of selected parameters*. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 5, 2016. <https://doi.org/10.12720/sqce.5.2.77-85> [Accedido: 28-ago-2025]

[46] *Study on the state of play of energy efficiency of heat and electricity production technologies*.

European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport.

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC70956/jrc%20efficiency%20of%20heat%20and%20electricity%20production%20technologies%20final%20revision%2020121115%20online.pdf?utm_source=chatgpt.com

[Accedido: 28-ago-2024]

[47] (n.d), *Most combined-cycle power plants employ two combustion turbines with one steam turbine*.

EIA U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2022 [En línea].

Disponible

en:

https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=52158&utm_source=chatgpt.com#

[Accedido: 28-ago-2025]

Anexo A - Videos descriptivos del SCADA

El siguiente [enlace](#) conduce a una carpeta en Google Drive donde puede accederse a un conjunto de cuatro videos demostrativos del sistema SCADA diseñado. Estos describen de manera detallada las características y funcionalidades de cada pantalla, como así también una breve simulación del proceso. Para acceder a la carpeta, dirijase a la siguiente dirección URL:

<https://drive.google.com/drive/folders/1b9UqBHz-mQDapeKagFAHNnkWUsydHwYe?usp=sharing>

Anexo B - Listado de variables del SCADA

El siguiente [enlace](#) conduce a una carpeta en Google Drive en la que se adjuntan los listados de variables analógicas y digitales creadas en software PULSE para el SCADA, tanto en formato PDF como xls. :

https://drive.google.com/drive/folders/19VTxGA0c6xUmsqyAfWfpHzl4_IgaQtdt?usp=sharing

Adicionalmente, en las figuras a continuación se muestra el listado de variables empleadas. El formato de la planilla responde a la estructura del software, en la que se identifica el nombre de cada variable en bloques (*Block Name*), seguido de su dirección (*Adress*) con las letras *A* o *D* según sea analógica o digital respectivamente. Luego, en *Block Description* se puede asociar una breve descripción a modo orientativo, en tanto los campos *History* y *Alarm Enable* indican si la variable está siendo historizada y si tiene alguna alarma asociada:

Block Name	Address	Block Description	Alarm Enable	History Enable
COSA1	A:3	CONC. SALIDA ABSORCION 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
COSA2	A:21	CONC. SALIDA ABSORCION 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COSA3	A:29	CONC. SALIDA ABSORCION 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COSA4	A:37	CONC. SALIDA ABSORCION 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COSD1	A:14	CONC. SALIDA DESORCION 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
COSD2	A:22	CONC. SALIDA DESORCION 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COSD3	A:30	CONC. SALIDA DESORCION 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COSD4	A:38	CONC. SALIDA DESORCION 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CS1	A:7	VÀLVULA DE COLDSHOT 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CS2	A:15	VÀLVULA DE COLDSHOT 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CS3	A:23	VÀLVULA DE COLDSHOT 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CS4	A:31	VÀLVULA DE COLDSHOT 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FG1	A:8	VÀLVULA DE FLUEGAS 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
FG2	A:16	VÀLVULA DE FLUEGAS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FG3	A:24	VÀLVULA DE FLUEGAS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
FG4	A:32	VÀLVULA DE FLUEGAS 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ME1	A:9	VÀLVULA DE METANO 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ME2	A:17	VÀLVULA DE METANO 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ME3	A:25	VÀLVULA DE METANO 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ME4	A:33	VÀLVULA DE METANO 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OX1	A:10	VÀLVULA DE OXÍGENO 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OX2	A:18	VÀLVULA DE OXÍGENO 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OX3	A:26	VÀLVULA DE OXÍGENO 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OX4	A:34	VÀLVULA DE OXÍGENO 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
P_CS	A:39	PRESION COLDSHOT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P_FG	A:40	PRESION FLUEGAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P_ME	A:41	PRESION METANO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P_OX	A:42	PRESION OXÍGENO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
P_RE	A:43	PRESION RECICLO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PSA	A:2	PRESION SALIDA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PSA2	A:5	PRESION SALIDA 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Q_CS	A:49	CAUDAL COLDSHOT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Q_FG	A:50	CAUDAL FLUEGAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Q_ME	A:51	CAUDAL METANO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Q_OX	A:52	CAUDAL OXIGENO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Q_RE	A:53	CAUDAL RECICLO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Q_SA	A:54	CAUDAL SALIDA	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
RE1	A:11	VALVULA DE RECICLO 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 81. Listado de variables analógicas en PULSE.

Block Name	Address	Block Description	Alarm Enable	History Enable
RE2	A:19	VÁLVULA DE RECICLO 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
RE3	A:27	VÁLVULA DE RECICLO 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
RE4	A:35	VÁLVULA DE RECICLO 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
T_CS	A:44	TEMP. COLDSHOT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
T_FG	A:45	TEMP. FLUEGAS	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
T_ME	A:46	TEMP. METANO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
T_OX	A:47	TEMP. OXIGENO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
T_RE	A:48	TEMP. RECICLO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TSA1	A:1	TEMP. SALIDA 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TSA2	A:20	TEMP.SALIDA 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TSA3	A:28	TEMP. SALIDA 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TSA4	A:36	TEMP. SALIDA 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 82. Listado de variables analógicas en PULSE.

Block Name	Address	Block Description	Alarm Enable	History Enable
CHK1	D:10	CHECK1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CHK2	D:11	CHECK2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CHK3	D:12	CHECK3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CHK4	D:13	CHECK4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COE1	D:1	PRESENCIA CO2 IN 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
COE2	D:7	PRESENCIA CO2 IN 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COE3	D:8	PRESENCIA CO2 IN 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COE4	D:9	PRESENCIA CO2 IN 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SA1	D:2	SALIDA 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SA2	D:4	SALIDA 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SA3	D:5	SALIDA 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SA4	D:6	SALIDA4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 83. Listado de variables digitales en PULSE.