

Design and Validation of a Redundant Nitrogen Backup System for Gas Compressor Dry Gas Seals in an Oil Refinery Facility

Diego Ayala-Vega¹; Edwin Peña-Galvan²; José Velásquez-Costa³; Herbert Vilchez-Baca⁴
^{1,2,3,4}Universidad Continental, Perú, 71245642@continental.edu.pe, 40604850@continental.edu.pe,
jvelasquezc@continental.edu.pe, hvilchez@continental.edu.pe

Abstract—This paper presents the design of a nitrogen backup system for dry gas seals in the gas compressor of an FCC unit. The VDI 2221 methodology was applied to structure the design process from problem definition to the technical solution, incorporating the Deming cycle (PDCA) as a basis for future improvement. The theoretical calculation determined a total nitrogen volume of 23.8 m³, distributed in four accumulators of 5.95 m³ each, and MATLAB simulation confirmed that this volume is capable of supplying nitrogen to the dry gas seal for an estimated period of 8 hours in the event of a loss of the main supply. It was also identified that the system could prevent an unplanned shutdown of the FCC unit, evaluated using an indicator of USD 30,500 per hour of avoided downtime, and reduce the risk of damage to the dry gas seal, whose replacement cost may range between USD 40,000 and 70,000. Finally, the automatic and manual operating logic was defined for implementation in a Siemens S7-1200 PLC, allowing the activation of nitrogen backup in the event of a pressure drop and enabling recharge when the main line is restored, ensuring safe system switching.

Keywords— Dry gas seal, gas compressor, Deming cycle, VDI 2221, FCC.

Diseño y validación de un sistema redundante de respaldo de nitrógeno para sellos secos de compresores de gas en una refinería de petróleo

Diego Ayala-Vega¹; Edwin Peña-Galvan²; José Velásquez-Costa³; Herbert Vilchez-Baca⁴
^{1,2,3,4}Universidad Continental, Perú, 71245642@continental.edu.pe, 40604850@continental.edu.pe,
jvelasquezc@continental.edu.pe, hvilchez@continental.edu.pe

Resumen– El presente trabajo desarrolla el diseño de un sistema de respaldo de nitrógeno para sellos secos en el compresor de gases de la unidad FCC. La metodología VDI 2221 permitió estructurar el diseño desde la definición del problema hasta su solución técnica, incorporando el ciclo Deming (PDCA) como base para futura mejora. El cálculo teórico determinó un volumen total de 23.8 m³ de N₂, distribuido en cuatro acumuladores de 5.95 m³ cada uno, y la simulación en MATLAB permitió corroborar que dicho volumen es capaz de mantener el nitrógeno para el sello seco durante un periodo estimado de 8 horas ante pérdida del suministro principal. Se identificó además que el sistema podría evitar el paro no programado de la unidad FCC, evaluable mediante el indicador 30,500 USD/h de parada evitada, y disminuir el riesgo de daño del sello seco, cuyo reemplazo puede costar entre USD 40 000–70 000. Finalmente, se definió la lógica de operación automática y manual para su implementación en un PLC Siemens S7-1200, permitiendo activar el respaldo de nitrógeno ante una caída de presión y habilitar la recarga cuando la línea principal se restablezca, garantizando una conmutación segura del sistema.

Palabras clave– sello seco, compresor de gases, ciclo Deming, VDI2221, FCC.

I. INTRODUCCIÓN

El propósito de esta investigación es aplicar de forma integrada la metodología desarrollada por la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI 2221) y el ciclo Deming (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar) en el diseño de un sistema de respaldo de nitrógeno para el sello seco del compresor de gases en la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC). Esta propuesta combina un enfoque metodológico de diseño estructurado con principios de mejora continua y automatización industrial con un Controlador Lógico Programable (PLC), orientados a incrementar la confiabilidad operativa del compresor y garantizar la continuidad del proceso.

En los compresores centrífugos de unidades FCC, la confiabilidad del sello seco constituye un factor crítico para la operación continua y segura del proceso [1]. Estos sistemas requieren un suministro estable de nitrógeno como gas de sellado, cuya pérdida puede generar desequilibrios de presión y provocar paradas no programadas del compresor [2]. En este contexto, la pérdida del suministro de nitrógeno representa una problemática relevante que afecta directamente la continuidad operativa de la unidad FCC.

Ante esta situación, surge la necesidad de diseñar un sistema de respaldo que garantice la continuidad del sellado

durante interrupciones del suministro principal. En este sentido, el objetivo de la presente investigación es diseñar y validar un sistema automatizado de respaldo de nitrógeno capaz de mantener las condiciones de operación del sello seco, asegurando una autonomía suficiente y una conmutación segura del sistema.

El diseño se desarrolla bajo la metodología VDI 2221 y se complementa con el ciclo Deming como marco de mejora continua [3]. Asimismo, incorpora la automatización mediante un PLC encargado de controlar las válvulas, monitorear la presión y gestionar la activación automática del respaldo de nitrógeno, lo que permite reducir riesgos operativos y aumentar la disponibilidad del compresor de gases en la unidad FCC [4].

II. MARCO TEÓRICO

A. Utilización del ciclo Deming

El ciclo Deming, también conocido como ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), constituye un modelo fundamental de mejora continua utilizado en procesos organizacionales, industriales y educativos. Su aplicación permite establecer un enfoque estructurado que busca la optimización progresiva mediante la planificación, ejecución, verificación y acción correctiva [3].

Durante la etapa de planificación, se definen los objetivos, los recursos y las estrategias necesarias para alcanzar las metas propuestas. En la fase de ejecución, se implementan las acciones planificadas y se recopilan los resultados iniciales para su posterior evaluación [5]. La verificación implica comparar los resultados obtenidos con los objetivos establecidos, determinando deficiencias en el desempeño [3]. La fase de acción correctiva busca ajustar los procesos con base en los hallazgos de la verificación, consolidando los cambios que mejoran la calidad [5].

B. Metodología VDI 2221

Esta metodología se organiza en etapas que comprenden la clarificación de la tarea, el diseño conceptual, el diseño preliminar y el diseño detallado [6]. Además, fomenta el uso de herramientas para el análisis y evaluación de alternativas, tales como matrices morfológicas, modelos funcionales y cálculos técnico-económicos, que facilitan la identificación de configuraciones viables y alineadas con los requisitos del diseño [7].

C. *Proceso de craqueo catalítico fluidizado (FCC)*

El craqueo catalítico fluidizado (FCC) es un proceso de conversión de refinería que emplea un lecho de partículas catalíticas fluidizadas a alta temperatura para romper hidrocarburos pesados y obtener fracciones ligeras [8]. Su objetivo es obtener productos más valiosos, como gasolina de alto índice de octano, gas licuado del petróleo y olefinas para petroquímica [9]. Persigue maximizar conversión y selectividad minimizando coque y gas seco, mediante control de temperatura, relación catalizador-aceite, y tiempo de residencia [10]. Este proceso se compone de tres secciones fundamentales: la sección de reacción y regeneración, la sección de fraccionamiento principal y la sección de recuperación de gas [11].

La sección de recuperación de gas está integrada por el compresor de gas húmedo (Wet Gas Compressor), los enfriadores inter-etapa, los separadores de condensado, el condensador de gas comprimido, la torre de absorción, la torre de fraccionamiento de GLP, el sistema de recuperación de gasolina ligera (C5+) y el separador de gas combustible. Esta sección es esencial para la recuperación de los productos livianos y el aprovechamiento energético del proceso [12]. Siendo el compresor de gas húmedo el equipo principal dentro de esta etapa.

D. *Compresor de gas húmedo*

El compresor de gas húmedo es un equipo rotodinámico utilizado para comprimir mezclas gaseosas que contienen pequeñas fracciones de líquido, típicas en procesos petroquímicos, de refinación o gas natural [1].

En la industria de refinación, los compresores de gas húmedo son esenciales para el transporte, procesamiento y recuperación de hidrocarburos, evitando pérdidas energéticas y permitiendo el aprovechamiento de gases residuales [14]. Su uso optimiza la eficiencia del proceso, mejora la seguridad y reduce impactos ambientales por emisiones no controladas [13]. En este contexto, el compresor de gas húmedo cuenta con dos sistemas auxiliares fundamentales para garantizar su operación confiable y continua: el sistema de lubricación y el sistema de sello seco. Ambos sistemas desempeñan funciones críticas en la protección y confiabilidad del compresor, por lo que se describen a continuación.

El sistema de lubricación del compresor garantiza su funcionamiento seguro y continuo al suministrar aceite limpio y presurizado a los cojinetes y componentes móviles. Su función principal es reducir la fricción entre superficies en movimiento, disipar el calor generado por la operación y minimizar el desgaste mecánico [15].

El sello seco del compresor es un sistema de sellado avanzado que evita fugas de gas desde el eje hacia el ambiente sin necesidad de aceite o líquidos sellantes. Opera mediante la formación de una delgada película de gas entre dos superficies metálicas altamente pulidas [16]. El gas de sellado, generalmente nitrógeno, mantiene presión positiva para impedir fugas. Además, el sistema incluye anillos de respaldo, sensores

de presión y filtros que aseguran operación estable y protección del equipo frente a contaminantes [17].

Entre las ventajas del sello seco destacan: mantenimiento reducido gracias a la menor fricción y desgaste, mayor confiabilidad operativa en comparación con sellos lubricados y cumplimiento de normativas ambientales por ausencia de emisiones fugitivas. Estos beneficios hacen que el sello seco sea estándar en compresores modernos de alto desempeño [20]. Dentro del sistema de sello seco, se distinguen dos componentes principales: el sello primario y el sello de separación, cada uno con funciones específicas que garantizan la estanqueidad del gas y la confiabilidad del compresor.

El sello primario constituye el elemento principal del sistema de sello seco y su función es evitar la fuga del gas procesado desde la carcasa del compresor hacia la atmósfera. Para ello, mantiene un diferencial de presión mediante el suministro de gas barrera limpio y presurizado, asegurando la estanqueidad durante la operación del compresor. Su correcto funcionamiento es fundamental para garantizar la confiabilidad operativa del equipo [18].

El sello de separación cumple un rol fundamental para garantizar la confiabilidad operativa. Su función principal es evitar la migración del aceite de lubricación hacia la cavidad del sello seco, ya que la contaminación por aceite puede generar sobrecalentamiento, desgaste acelerado de las caras del sello y fallas prematuras [19].

La confiabilidad del sello primario y de separación en el sello seco está directamente asociada a la estabilidad del flujo y la presión del gas de sellado. Para asegurar esta condición durante fallas en el suministro principal, se puede incorporar un acumulador de nitrógeno como sistema de respaldo.

E. *Acumuladores de nitrógeno*

Son dispositivos que almacenan energía en forma de fluido presurizado utilizando gas nitrógeno como elemento compresible [21]. Se componen principalmente de un cuerpo metálico, un separador interno y una cámara de gas precargada [22]. El nitrógeno, al comprimirse, actúa como un resorte gaseoso que almacena energía durante los picos y la libera cuando la presión desciende [23].

F. *Automatización con PLC*

La automatización ha avanzado notablemente, incorporando tecnologías que mejoran la eficiencia industrial y reducen errores humanos [24]. El PLC, compuesto por CPU, módulos de entrada/salida y software, automatiza procesos mediante la lectura de entradas, ejecución lógica y control de salidas, sustituyendo sistemas manuales con mayor precisión, seguridad y flexibilidad [25][26]. Es capaz de manejar secuencias lógicas, temporizaciones, alarmas y comunicación con interfaces Interfaz humano-máquina (HMI) o sistemas de Supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). Su capacidad de autodiagnóstico reduce fallas, mejora la trazabilidad de eventos y aumenta la confiabilidad global del proceso [27].

III. Metodología

La presente investigación adopta un enfoque aplicado y experimental, orientado al diseño, validación y mejora continua de un sistema automatizado de respaldo de nitrógeno (N₂) para el sello seco del compresor de gas húmedo en la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC).

El ciclo PDCA se empleó como marco general para organizar el desarrollo del proyecto. En la fase Planificar se identificó el problema y se definieron los requisitos del sistema; en Hacer se aplicaron las cuatro etapas de la metodología VDI 2221; en Verificar se validó el diseño mediante simulaciones y pruebas de control; y en Actuar se realizaron ajustes y se propusieron acciones de mejora continua.

Para este estudio se asumió comportamiento de gas ideal del nitrógeno, temperatura constante, ausencia de fugas y consumo constante en los sellos primario y de separación.

A. Planificar

Se realizó un análisis de fallas del compresor de gas húmedo en una planta FCC mediante un diagrama de Pareto. El estudio evidenció que la pérdida de presión de nitrógeno en el sello seco constituye una de las causas más frecuentes de parada del 2023 al 2025, lo cual justifica el diseño de un sistema de respaldo para mantener la estanqueidad del compresor.

TABLA I

CAUSAS RECURRENTES DE PARADAS DEL COMPRESOR DE GASES

Causas más recurrentes de paradas del compresor de gas húmedo de FCC (2023-2025)			
Causa	Freq.	Freq. (%)	F. acum. (%)
A. Problemas en generadores de vapor (GE)	9	25.7%	25.70%
B. Caída de presión de N ₂ (sello seco / sistema NIS)	7	20.0%	45.70%
C. Exceso de surge en el compresor	5	14.3%	60.00%
D. Alto nivel en drum inter-etapa	3	8.6%	68.60%
E. Desplazamiento axial de turbina	2	5.7%	74.30%
F. Paro del sistema de enfriamiento	2	5.7%	80.00%
G. Falla de suministro eléctrico externo	1	2.9%	82.90%
H. Baja presión en succión del compresor	1	2.9%	85.70%
I. Falla eléctrica (bombas de lubricación)	1	2.9%	88.60%
J. Sobre velocidad	1	2.9%	91.40%
K. Reset manual del DCS	1	2.9%	94.30%
L. Baja presión de vapor de alta presión	1	2.9%	97.10%
M. Falla en turbina generadora eléctrica	1	2.9%	100%

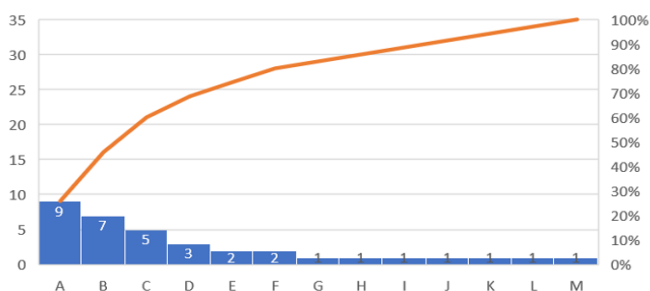


Fig. 1 Diagrama de Pareto de causas más recurrentes de paradas del compresor de gases

Según el análisis de la Tabla I y la Fig. 1, las paradas no programadas del compresor de gas húmedo se concentran principalmente en dos causas: problemas en los generadores de vapor (25.7%) y la caída de presión de N₂ en el sello seco (20%). Debido al impacto directo de esta última en la confiabilidad del sellado y la operación continua del compresor, se prioriza el diseño de un sistema automatizado de respaldo de nitrógeno. Con base en el diagnóstico y las condiciones de operación del compresor y su sello seco, se estableció como requisito mantener el rango de presión del gas de barrera entre 5 y 8 kg/cm², garantizar una autonomía suficiente ante una eventual pérdida del suministro de nitrógeno y permitir la operación automática del sistema mediante un PLC, cumpliendo además con las restricciones de espacio, seguridad y normativa interna aplicable.

B. Hacer: aplicación de la metodología VDI 2221

1) Fase 1: Clasificación de la tarea

En esta etapa se definieron los requerimientos operativos y las restricciones que condicionan el diseño del sistema de respaldo de nitrógeno. Se identificó la necesidad de mantener la presión mínima de sellado para asegurar la hermeticidad del sello seco del compresor durante una interrupción del suministro principal de nitrógeno, garantizando la continuidad operativa del sistema de sellado y evitando la exposición del equipo a condiciones inseguras durante una detención no programada. Asimismo, se estableció que el sistema de respaldo debe proporcionar un intervalo de funcionamiento autónomo suficiente para mantener activo el sellado mientras el compresor permanece lubricado después de una parada. Este requisito es fundamental para proteger los componentes mecánicos del compresor y asegurar la integridad del sello seco en condiciones transitorias. Por otra parte, se consideraron restricciones físicas y de integración propias del área de instalación, tales como la disponibilidad limitada de espacio alrededor del compresor, la necesidad de mantener distancias de seguridad conforme a normativas internas de la refinería y la obligación de integrar el sistema de respaldo sin modificar la arquitectura de la línea principal de suministro de nitrógeno. También se evaluaron limitaciones asociadas al recorrido máximo admisible de la tubería hacia el sistema de sellado, con el fin de evitar pérdidas significativas de presión. Estos elementos constituyen la base técnica y operativa que orientó el

desarrollo del diseño conceptual del sistema en las fases posteriores.

2) Fase 2: Diseño conceptual

En esta etapa se desarrolló el diseño conceptual del sistema de respaldo de nitrógeno mediante la elaboración del diagrama funcional, el cual permite descomponer el sistema en módulos operativos y visualizar sus interacciones. El diagrama presentado en la Fig. 2 muestra los componentes principales del sistema: el módulo de recarga desde la red principal de nitrógeno, el sistema de almacenamiento en el acumulador, el sistema de activación del respaldo, el sistema de control y automatización y el sistema de monitoreo y alarmas. Esta descomposición funcional permitió identificar las funciones esenciales necesarias para garantizar la continuidad del suministro de N₂ hacia el sello primario y de separación del compresor de gases.

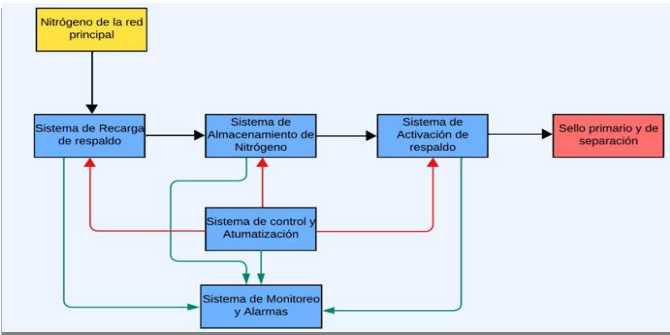


Fig. 2 Diagrama funcional del sistema de respaldo de nitrógeno

Posteriormente, se elaboró una matriz morfológica como se muestra en la Fig.3 con el objetivo de evaluar distintas alternativas de solución para el sistema de respaldo de nitrógeno. Para esta evaluación se definieron criterios técnicos y económicos tales como eficiencia operativa, automatización y control, facilidad de mantenimiento, costo de implementación, compatibilidad con la infraestructura de la unidad FCC, confiabilidad del sistema y escalabilidad futura. Cada criterio fue calificado según una escala de 0 a 4, donde 0 representa un desempeño muy deficiente y 4 un desempeño excelente, tal como se muestra en la Tabla II. Con esta escala se asignaron puntajes a cada alternativa, como se muestra en la Tabla III, permitiendo realizar una comparación objetiva entre configuraciones y establecer la base para la selección final, cuyo resultado se presenta en la sección de resultados.

Matriz Morfológica				
Función Principal	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Sistema de almacenamiento de nitrógeno	Acumulador de pistón	Acumulador vertical de gas comprimido	Acumulador de vejiga	Acumulador de membrana
Sistema de activación de respaldo	Presostato mecánico	Reguladores manuales	Presostato electrónico con 2 salidas relay	Presostato electrónico con 1 salida relay
Sistema de recarga de respaldo	Válvulas solenoides	Válvulas neumáticas	Válvulas manuales	Válvulas motorizadas
Sistema de control y automatización	Sn automatización	PLC Siemens SF-1200 + Módulo digital	Controlador digital de presión	Controlador de Automatización Programable (PAQ)
Sistema de monitoreo y alarmas	HMI (Human Machine Interface)	Indicadores analógicos	Alarma visual y sonora	Sistema Scada

Soluciones	
Solución 1	→
Solución 2	→
Solución 3	→
Solución 4	→

Fig. 3 Matriz morfológica

TABLA II
ESCALA DE EVALUACIÓN DE CRITERIOS

Nivel	Estado	Criterio de evaluación
0	Muy deficiente	No cumple el criterio.
1	Deficiente	Cumplimiento muy limitado
2	Regular	Cumplimiento parcial
3	Bueno	Cumplimiento adecuado
4	Excelente	Cumplimiento pleno

TABLA III
EVALUACIÓN COMPARATIVA DE SOLUCIONES TÉCNICAS

Nº	Criterios técnicos y económicos	Soluciones			
1	Eficiencia operativa	1	2	3	4
2	Automatización y control	1	4	4	2
3	Facilidad de mantenimiento	0	5	5	1
4	Costo de implementación	3	2	1	4
5	Compatibilidad con planta FCC	2	4	3	2
6	Confiabilidad del sistema	2	5	4	2
7	Escalabilidad futura	2	3	3	2
Total		13	25	20	17

3) Fase 3: Diseño preliminar

En la fase de diseño preliminar se desarrollaron los cálculos técnicos necesarios para dimensionar el sistema de respaldo de nitrógeno. Para ello se consideraron las condiciones operativas del sello seco del compresor, el rango de presión requerido para mantener la hermeticidad, y el consumo total de nitrógeno, correspondiente a 1 Nm³/h para el sello primario y 7 Nm³/h para el sello de separación. Asimismo, se incorporó el requisito de garantizar una autonomía mínima de 8 horas, conforme a las recomendaciones del fabricante para mantener el sellado durante una detención no programada. Este tiempo de autonomía se justifica porque, durante una parada no programada, el sistema de lubricación del compresor debe permanecer en operación para permitir el enfriamiento adecuado de los cojinetes. Estos experimentan contacto metal-metal y un incremento significativo de temperatura durante los ciclos de arranque y detención, acumulando calor justo antes

del reposo del eje [28]. Asimismo, se evidencian que la lubricación se pierde progresivamente en la desaceleración, generando esfuerzos térmicos que requieren la presencia continua del aceite para su disipación [29]. Por ello, la autonomía establecida constituye un requisito esencial para garantizar el enfriamiento controlado y proteger la integridad del sello seco. Este comportamiento térmico del cojinete exige que, mientras se completa el enfriamiento interno del compresor, todos los sistemas asociados al sello seco continúen operando bajo condiciones controladas.

Mientras la lubricación sigue activa, el sello primario y de separación continúan expuestos a presión y rotación residual, por lo que es imprescindible mantener el suministro de nitrógeno. En especial, el sello de separación requiere presión positiva para impedir la migración de aceite hacia la cavidad del sello seco, evitando desgaste y pérdida de hermeticidad. Por ello, la autonomía recomendada constituye un requisito esencial para proteger la integridad del compresor durante este proceso de enfriamiento. Con la autonomía debidamente definida, se procedió a estimar el volumen teórico del acumulador considerando el comportamiento del gas comprimido y la variación esperada de presión durante el periodo de respaldo, verificándose que se mantuviera la presión mínima requerida en el sello seco durante toda la autonomía. Finalmente, se elaboró un diagrama esquemático del sistema de respaldo de nitrógeno que definió la disposición inicial de tuberías, válvulas, instrumentos y puntos de conexión del sistema de respaldo, estableciendo la base funcional para el desarrollo del diseño detallado en la fase siguiente.

4) Fase 4: Diseño detallado

En la fase de diseño detallado se estableció la configuración final del sistema de respaldo de nitrógeno, integrando los componentes seleccionados, la instrumentación asociada y la arquitectura de control requerida para su operación automática. El diseño se representó mediante un diagrama esquemático final, en el cual se definió la disposición de los acumuladores, válvulas automáticas, dispositivos de protección y líneas de distribución hacia los sellos primario y de separación del compresor. De manera complementaria, se definió la arquitectura de control, la cual fue implementada en un PLC Siemens S7-1200, encargado de gestionar la activación del sistema de respaldo, supervisar la presión del suministro, verificar la disponibilidad de los acumuladores y generar alarmas ante condiciones anómalas. Para ello, se estableció la estructura de entradas y salidas del PLC, considerando señales de sensores y pulsadores, así como salidas para el accionamiento de válvulas automáticas, indicadores luminosos y dispositivos de alarma. La Tabla IV resume la organización de estas señales.

Asimismo, se definieron los modos de operación del sistema, incorporando un modo automático basado en la conmutación del suministro cuando la presión del sistema principal cae por debajo del umbral establecido, y un modo local destinado a pruebas funcionales y actividades de

mantenimiento. Esta estructura permitió completar el diseño funcional y operativo del sistema, sentando las bases para su validación, presentada en la sección de resultados.

TABLA IV
ASIGNACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS EN EL PLC S7-1200

Tipo	Dirección	Descripción
Entrada Digital	I0.0	Selector en modo LOCAL
Entrada Digital	I0.1	Selector en modo AUTOMÁTICO
Entrada Digital	I0.2	Botón START Respaldo (modo LOCAL)
Entrada Digital	I0.3	Botón STOP Respaldo (modo LOCAL)
Entrada Digital	I0.4	Botón START Recarga (modo LOCAL)
Entrada Digital	I0.5	Botón STOP Recarga (modo LOCAL)
Entrada Digital	I0.6	Parada de emergencia
Entrada Digital	I1.0	Presión Acumulador 1 < 4 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.1	Presión Acumulador 2 < 4 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.2	Presión Acumulador 3 < 4 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.3	Presión Acumulador 4 < 4 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.4	Presión Acumulador 1 ≥ 7.5 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.5	Presión Acumulador 2 ≥ 7.5 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.6	Presión Acumulador 3 ≥ 7.5 kg/cm ²
Entrada Digital	I1.7	Presión Acumulador 4 ≥ 7.5 kg/cm ²
Entrada Analógica	IW64	Transmisor de presión de la red principal (4–20 mA)
Salida Digital	Q0.0	Solenoides Acumulador 1 - Suministro
Salida Digital	Q0.1	Solenoides Acumulador 2 - Suministro
Salida Digital	Q0.2	Solenoides Acumulador 3 - Suministro
Salida Digital	Q0.3	Solenoides Acumulador 4 - Suministro
Salida Digital	Q0.4	Solenoides Acumulador 1 - Recarga
Salida Digital	Q0.5	Solenoides Acumulador 2 - Recarga
Salida Digital	Q0.6	Solenoides Acumulador 3 - Recarga
Salida Digital	Q0.7	Solenoides Acumulador 4 - Recarga
Salida Digital	Q1.0	Lámpara: sistema en respaldo
Salida Digital	Q1.1	Lámpara: sistema en recarga
Salida Digital	Q1.2	Lámpara: alerta por fin de respaldo / falla

C. Verificar

En la fase Verificar se evaluó la coherencia y funcionalidad del diseño propuesto, con el objetivo de confirmar el cumplimiento de los requisitos definidos en la etapa de Planificación. Dado que el estudio se orientó al diseño conceptual y de detalle, la verificación se realizó mediante análisis técnico y simulación computacional. En este contexto, se revisó la consistencia del dimensionamiento del sistema y se desarrolló una simulación en MATLAB para analizar el comportamiento del acumulador ante un escenario de interrupción del suministro de nitrógeno, empleándose como mecanismo de verificación teórica. Asimismo, se verificó la

correspondencia entre la lógica de control propuesta y la estructura de señales definida para el PLC Siemens S7-1200, asegurando la coherencia funcional entre entradas, salidas y condiciones de operación consideradas en el diseño. Los resultados obtenidos se presentan en la sección de Resultados.

D. Actuar

En la fase Actuar se identificaron oportunidades de mejora orientadas a fortalecer el diseño propuesto y preparar su futura implementación. Dado que el estudio se centró en el desarrollo conceptual y detallado del sistema, las acciones se enfocaron en recomendaciones para su validación en condiciones reales de operación, tales como la realización de pruebas funcionales posteriores a la instalación para ajustar los parámetros de conmutación, verificar los tiempos de respuesta de las válvulas automáticas y validar la interacción del PLC con el sistema de suministro de nitrógeno existente. Asimismo, se recomendó evaluar alternativas de instrumentación con mayor precisión o redundancia, así como la incorporación de funciones de diagnóstico para el monitoreo en tiempo real del estado de los acumuladores y del sello seco, junto con la implementación de un plan de mantenimiento preventivo y pruebas periódicas que aseguren la disponibilidad operativa y confiabilidad del sistema a largo plazo.

IV. RESULTADOS

A. Selección final de la alternativa de diseño

La evaluación de las alternativas generadas en la matriz morfológica se realizó mediante el sistema de puntaje definido en la metodología, considerando criterios técnicos y económicos tales como eficiencia operativa, automatización y control, facilidad de mantenimiento, costo de implementación, compatibilidad con la unidad FCC, confiabilidad y escalabilidad futura. Los puntajes asignados a cada alternativa se presentan en la Tabla 3.

Como resultado de esta evaluación, la alternativa 2 obtuvo el puntaje más alto (25 puntos), superando a las alternativas 1, 3 y 4. Esta alternativa presenta la mejor combinación entre confiabilidad del sistema, nivel de automatización, compatibilidad con la infraestructura existente y viabilidad técnica de implementación. En consecuencia, la alternativa 2 fue seleccionada como la configuración base para el diseño final del sistema de respaldo de nitrógeno.

B. Cálculo final del volumen y autonomía del acumulador

Para determinar la capacidad necesaria del sistema de respaldo, se calculó el volumen total de nitrógeno requerido para abastecer los sellos primario y de separación durante un periodo de ocho horas. El consumo total de gas se obtuvo considerando los valores proporcionados por el fabricante.

El volumen total de nitrógeno requerido se calculó en función del caudal de consumo de los sellos y el tiempo de operación, como se muestra en (1).

$$V_{N_2} = (Q_{prim} + Q_{sep})t \quad (1)$$

donde $Q_{prim} = 1 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $Q_{sep} = 7 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y $t = 8\text{h}$.

Al sustituir los valores correspondientes, se obtiene el volumen total requerido de nitrógeno:

$$V_{N_2} = (1 + 7) 8 = 64 \text{ Nm}^3 \quad (2)$$

El número de moles asociado a este volumen, bajo condiciones estándar, se determinó mediante la ecuación del gas ideal, como se expresa en (3).

$$n = \frac{P_0 V_{N_2}}{RT_0} \quad (3)$$

donde $P_0 = 101325 \text{ Pa}$, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ y $T_0 = 273.15 \text{ K}$.

Al reemplazar los valores numéricos, el número de moles de nitrógeno requerido es:

$$n = \frac{(101325)(64)}{(8.314)(273.15)} = 2855.52 \text{ mol} \quad (4)$$

El volumen necesario para almacenar este gas en un acumulador presurizado se calculó considerando el rango operativo del sistema y una temperatura ambiente de 22°C . Para el desarrollo del cálculo, las presiones mínima y máxima del sistema se expresaron en valores absolutos y se convirtieron a unidades del Sistema Internacional. Asimismo, la temperatura se transformó de grados centígrados a kelvin, de acuerdo con los requerimientos de la ecuación del gas ideal, como se muestra en (5).

$$V = \frac{nRT}{P_{max} - P_{min}} \quad (5)$$

donde $P_{max} = 882599 \text{ Pa}$ y $P_{min} = 588399 \text{ Pa}$.

El volumen total requerido del acumulador se obtiene al sustituir los valores en (5):

$$V = \frac{(2855.52)(8.314)(295.15)}{882599 - 588399} = 23.8 \text{ m}^3 \quad (6)$$

Finalmente, el volumen total se distribuyó en cuatro acumuladores para optimizar su instalación y asegurar redundancia operativa, como se indica en (7).

$$V_1 = \frac{V}{4} = \frac{23.8}{4} = 5.95 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Con base en este valor, se definieron las dimensiones aproximadas del acumulador individual, tomando como referencia un diámetro comercial estándar de $d_1 = 1.37 \text{ m}$. La altura necesaria para alcanzar el volumen efectivo se calculó mediante (8).

$$h_1 = \frac{4V_1}{\pi d_1^2} = \frac{4(5.95)}{\pi(1.37)^2} \approx 4 \text{ m} \quad (8)$$

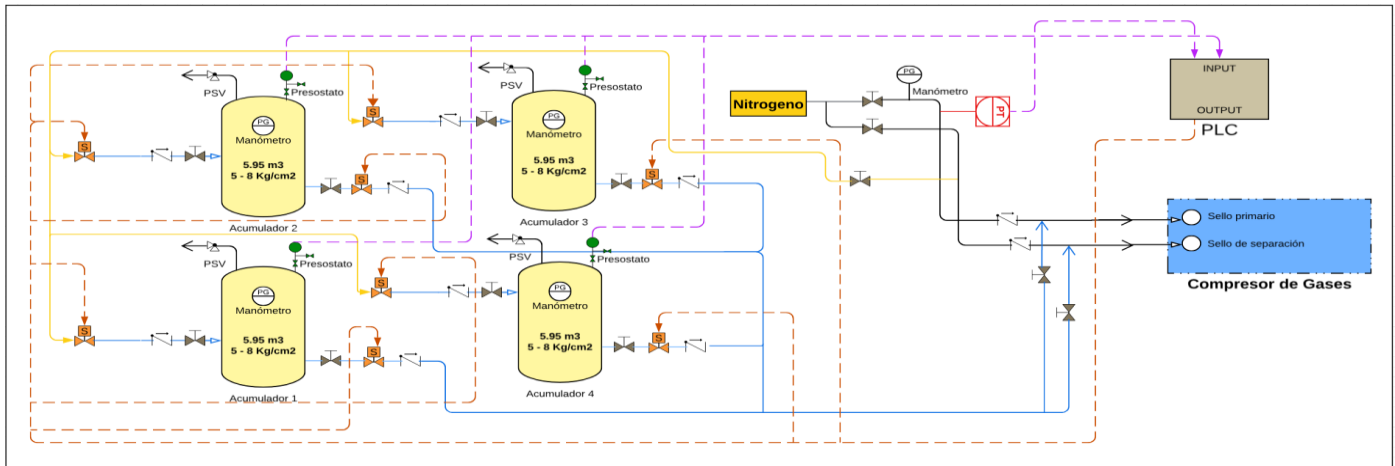


Fig. 4 Diseño final del sistema de respaldo de nitrógeno

C. Diseño final del sistema de respaldo de nitrógeno

El diseño final del sistema de respaldo de nitrógeno se elaboró considerando la alternativa seleccionada y el volumen total requerido para garantizar la continuidad del sellado del compresor. La Fig. 4 muestra el esquema resultante, en el que se integraron cuatro acumuladores presurizados de 5.95 m³ cada uno, conectados en paralelo mediante válvulas de aislamiento para permitir su operación individual o conjunta. Cada acumulador se equipó con un manómetro, un presostato y una válvula de alivio, lo que permitió asegurar su operación dentro del rango de presión requerido. El suministro hacia los sellos primario y de separación se controló mediante válvulas automáticas, las cuales permanecían cerradas en condiciones normales y se abrían cuando la presión del sistema principal caía por debajo del umbral establecido.

El sistema también incorporó sensores de presión y señales de estado conectadas a un PLC Siemens S7-1200, que ejecutaba la lógica de supervisión y la conmutación automática entre la línea principal y los acumuladores. Este diseño final permitió establecer una arquitectura confiable y compatible con la operación de la unidad FCC.

D. Simulación del comportamiento del acumulador (MATLAB)

Para evaluar el desempeño del sistema de respaldo se simuló, mediante MATLAB, la variación de presión del nitrógeno durante la descarga en dos escenarios: un volumen equivalente de 23.8 m³ y un solo acumulador individual de 5.95 m³. La Fig. 5 muestra ambas curvas comparativas dentro del rango de presión permitido por el sello seco del compresor. Por un lado, la curva de 23.8 m³ (línea azul) mantuvo la presión por encima del valor mínimo operativo durante todo el periodo analizado, demostrando que este volumen total es suficiente para garantizar la autonomía requerida de 8 horas. En cambio, el escenario correspondiente a un acumulador individual de 5.95 m³ (línea roja) mostró una disminución acelerada de presión, alcanzando el límite mínimo en aproximadamente 2 horas, lo que confirma que un solo acumulador no es capaz de sostener el sellado durante una interrupción prolongada. Sin embargo, al emplear cuatro acumuladores de 5.95 m³

conectados en paralelo, el sistema dispone nuevamente del volumen total equivalente a 23.8 m³, garantizando así la autonomía completa de 8 horas establecida como requisito operativo.

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios recientes sobre el comportamiento de sellos secos, donde se destaca la importancia de mantener condiciones estables de presión para garantizar su confiabilidad operativa [2]. En este sentido, el sistema de respaldo propuesto permite asegurar la continuidad del suministro de nitrógeno bajo condiciones críticas, lo cual coincide con enfoques de redundancia utilizados en sistemas de compresión en la industria. Asimismo, la simulación confirma que el dimensionamiento del sistema cumple con la autonomía requerida, aportando una solución técnicamente viable para mejorar la confiabilidad del compresor en unidades FCC.

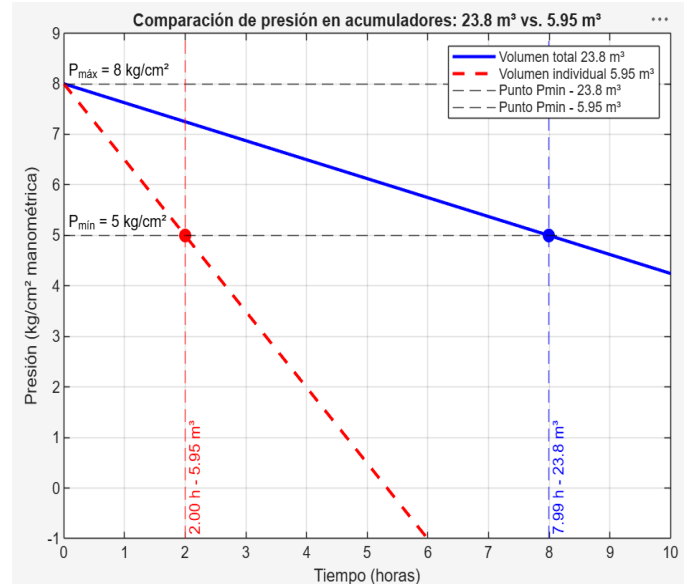


Fig. 5 Comparación de presión de acumuladores vs el tiempo de descarga en MATLAB

E. Validación del control automático (PLC)

La validación del sistema de control se realizó revisando la coherencia de la lógica programada en el PLC para los modos automático y local. Las Fig. 6 y Fig. 7 muestran el diagrama de flujo correspondiente a la secuencia operativa.

En modo automático, el PLC supervisó la presión de la línea principal de nitrógeno y la disponibilidad de los acumuladores. Ante una caída de presión por debajo del umbral establecido, se habilitó la conmutación automática, activando el suministro desde los acumuladores hacia los sellos primario y de separación, así como la generación de alarmas por pérdida del suministro principal. Asimismo, el controlador gestionó la recarga automática de los acumuladores cuando se restableció la línea principal, manteniendo la disponibilidad del sistema de respaldo.

En modo local, el operador pudo realizar pruebas de válvulas y acumuladores con la secuencia automática bloqueada, bajo condiciones de habilitación que aseguraron una operación segura. La verificación de la lógica de control confirmó que el sistema permitió una conmutación segura, el respaldo automático y la recarga autónoma de los acumuladores, cumpliendo los requisitos funcionales del diseño.

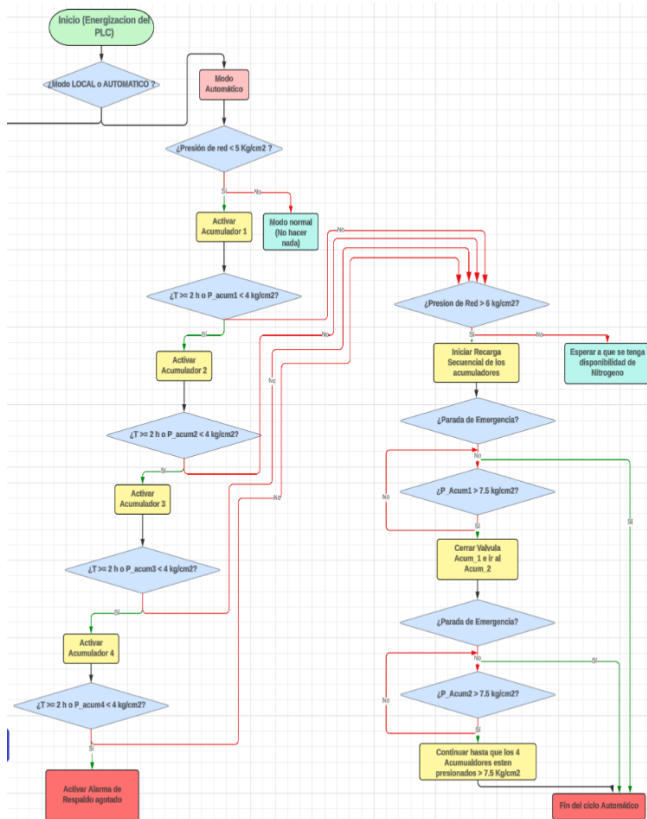


Fig. 6 Diagrama de flujo del funcionamiento del control automático del sistema de respaldo de nitrógeno.

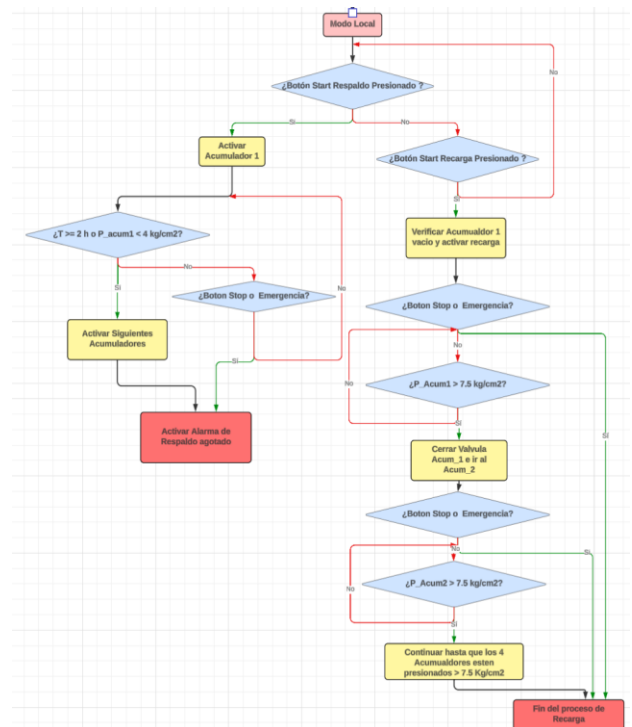


Fig. 7 Diagrama de flujo del funcionamiento del control local del sistema de respaldo de nitrógeno.

V. CONCLUSIONES

El sello de separación presurizado con nitrógeno cumple una función crítica al impedir la migración de aceite de lubricación hacia las caras del sello seco, contribuyendo a preservar un componente de alto valor económico. Considerando que su reemplazo puede implicar costos entre USD 40 000 y 70 000 por unidad, el sistema propuesto presenta el potencial de reducir el riesgo de deterioro prematuro del sello seco y mejorar la confiabilidad operativa del compresor, generando un beneficio económico asociado al costo evitado de reemplazo.

Asimismo, la incorporación del sistema de respaldo en el sello primario permitiría evitar disparos por pérdida de suministro y reducir la probabilidad de paradas no programadas en la unidad FCC. Dado que estas detenciones generan pérdidas productivas relevantes [8], asegurar la continuidad del equipo representa un beneficio económico directo, cuantificado en 30,500 USD/h de parada evitada. Para un evento de 8 horas, esto equivale a pérdidas evitadas superiores a USD 240,000, evidenciando el impacto económico significativo de la propuesta.

La simulación realizada en MATLAB permitió validar el dimensionamiento del sistema de respaldo, obteniéndose un volumen total requerido de 23.8 m³ de nitrógeno, distribuido en cuatro acumuladores de 5.95 m³ cada uno, lo cual garantiza teóricamente hasta 8 horas de autonomía ante la pérdida del suministro principal. Asimismo, se comprobó que un solo cilindro puede sostener temporalmente la presión de sellado, respaldando técnicamente la selección de cuatro acumuladores

como configuración óptima para una futura implementación industrial.

El desarrollo del sistema se estructuró bajo la metodología VDI 2221, permitiendo un diseño ordenado desde la definición del problema hasta la evaluación funcional del respaldo de nitrógeno. De manera complementaria, el ciclo Deming (PDCA) proporcionó un enfoque de mejora continua aplicable a futuras etapas de implementación, pruebas reales y optimización del consumo de N₂, constituyendo un aporte metodológico reproducible para proyectos similares en maquinaria rotativa del sector refinero.

La integración del sistema en un PLC Siemens S7-1200 permitiría automatizar la gestión del respaldo, activando el suministro ante caídas de presión y habilitando la recarga cuando se restablece la línea principal, mejorando así la respuesta operativa y reduciendo la intervención manual.

Como limitación, la validación se realizó bajo condiciones de simulación, por lo que se recomienda su evaluación en campo para verificar el comportamiento del sistema en condiciones reales. Asimismo, la metodología y el diseño propuesto pueden ser adaptados a otros sistemas de compresión en la industria de refinación y sectores afines, donde la continuidad del suministro de gas de sellado sea un factor crítico.

REFERENCIAS

- [1] D. Mæland and L. E. Bakken, "Fouling effects on wet gas compressor performance," *ASME Turbo Expo*, June 2021, doi: 10.1115/GT2021-59543.
- [2] L. Zhang, X. Ding, S. Wang, S. Zhang, and J. Ding, "Research progress on the dynamic stability of dry gas seals," *Processes*, vol. 12, no. 3, p. 575, 2024, doi: 10.3390/pr12030575.
- [3] V. Nguyen, C. K. B. Chau, and T. Tran, "PDCA from theory to effective applications: A case study of design for reducing human error in assembly process," *Advances in Operations Research*, vol. 2023, Article 8007474, 2023, doi: 10.1155/2023/8007474.
- [4] S. M. Demina and A. N. Basamykina, "Automation of processes at oil and gas enterprises as the main factor of resource saving," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1045, p. 012096, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1045/1/012096.
- [5] H. Sayah and A. Khaleel, "The application of accreditation standards institutional Iraqi in Iraqi universities using Deming cycle (PDSA): Applied study in colleges of Sumer University-Iraq," *Proceedings on Engineering Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 23–32, 2022, doi: 10.24874/PES04.01.004.
- [6] P. Kröpf, C. Landschützer, H. Hick, W. H. Awan, and C. A. Brown, "A comparison of educational perspectives on VDI 2221 and axiomatic design," *Procedia Computer Science*, vol. 253, pp. 94–103, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.01.073.
- [7] C. L. Nieto-Yalí et al., "Design of a semi-automatic hydraulic extruder machine for the manufacture of pastry bricks using VDI 2221," *E3S Web Conf.*, vol. 465, p. 01016, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202346501016.
- [8] O. Adefarati, Y. Zhang, and C. S. Hsu, "State-of-the-art review of fluid catalytic cracking (FCC) catalyst regeneration intensification technologies," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2061, 2022, doi: 10.3390/en15062061.
- [9] J. G. Acosta-López and H. de Lasa, "Artificial intelligence for hybrid modeling in fluid catalytic cracking (FCC)," *Processes*, vol. 12, no. 1, p. 61, 2024, doi: 10.3390/pr12010061.
- [10] Y. Zhang, Z. Li, Z. Wang, and Q. Jin, "Optimization study on increasing yield and capacity of FCC units," *Processes*, vol. 9, no. 9, p. 1497, 2021, doi: 10.3390/pr9091497.
- [11] Q. Wang et al., "Spent FCC catalyst enhances pyrolysis of refinery waste activated sludge," *J. Clean. Prod.*, vol. 295, p. 126382, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126382.
- [12] Y. Zhang, D. Li, G. Xin, and S. Ren, "CO-selective catalytic reduction of NO_x in FCC units and applications of the generated exhaust gas," *Energy & Fuels*, vol. 37, no. 16, pp. 11754–11764, 2023, doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c01620.
- [13] M. Bakken, T. Bjørge, and L. E. Bakken, "Wet gas compressor model validation," in *Proc. ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Phoenix, AZ, USA, 2019, Paper No. GT2019-90354, doi: 10.1115/GT2019-90354.
- [14] J. Sun et al., "Theoretical and experimental study on effects of wet compression on centrifugal compressor performance," *Applied Thermal Engineering*, vol. 212, p. 118163, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118163.
- [15] K. Górny, A. Stachowiak, P. Tyczewski, and W. Zwierzycki, "Mixtures of lubricants and ecological refrigerants under starved lubrication conditions," *Materials*, vol. 15, no. 21, p. 7747, 2022, doi: 10.3390/ma15217747.
- [16] Q. Deng et al., "Analysis of dynamic tracking characteristics of dry gas seals during start-up process," *Lubricants*, vol. 13, no. 5, p. 201, 2025, doi: 10.3390/lubricants13050201.
- [17] A. V. Zahorulko and Y.-B. Lee, "Dynamic behavior and difference pressure control of difference pressure regulator for dry gas seals," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 165, p. 108350, 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108350.
- [18] F. Hu, Q. He, Y. Yin, and W. Huang, "Wear monitoring of dry gas seals through seal face structure design," *Tribology Transactions*, 2025, doi: 10.1080/10402004.2025.2495240.
- [19] L. R. Ferrill, N. D. Ronsky, and T. A. Harris, "Explosions in gas turbine lube oil reservoir result in installation of dry gas seal system," *ASME Turbo Expo*, 1989, doi: 10.1115/89-GT-222.
- [20] I. Shahin, M. Gadala, M. Alqaradawi, and O. Badr, "Centrifugal compressor spiral dry gas seal simulation working at reverse rotation," *Procedia Engineering*, vol. 68, pp. 285–292, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.181.
- [21] W. Zhang et al., "Experimental and numerical study of the liquid nitrogen accumulator based on two-phase thermal stratification," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 184, p. 107937, 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107937.
- [22] R. Garbil et al., "Euratom research and training in 2025," *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, vol. 11, p. 37, 2025, doi: 10.1051/epjn/2025037.
- [23] T. Ten-Gallardo, S. Gallardo, M. Lorduy-Alós, and G. Verdú, "Analysis of nitrogen intrusion from ECCS accumulators in SBLOCA scenarios," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 189, p. 105954, 2025, doi: 10.1016/j.pnucene.2025.105954.
- [24] L. Escalante-Llanos, R. Astete-Contreras y J. Velásquez-Costa, "Color sorting process of materials in a plastics recycling company automated with Arduino," *Proc. LACCEI Int. Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2025, doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.973.
- [25] W. Alsabbagh and P. Langendörfer, "Security of programmable logic controllers and related systems," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 4, pp. 659–693, 2023, doi: 10.1109/OJIES.2023.3335976.
- [26] F. Mo et al., "PLC orchestration automation to enhance human-machine integration in adaptive manufacturing systems," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 71, pp. 172–187, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.015.
- [27] M. Gryczka, "Industrial automation: Understanding the potential disappointment behind recent global advancements," *Procedia Computer Science*, vol. 225, pp. 635–644, 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.10.049.
- [28] D. E. Sander and H. Allmaier, "Starting and stopping behavior of worn journal bearings," *Tribology International*, vol. 127, pp. 478–488, 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.06.031.
- [29] C. Gu, L. Dai, and D. Zhang, "Research on Start-Stop Performance of Journal Bearing Based on an Isothermal and Mixed Lubrication Model with Different Acceleration and Deceleration Forms in Consideration," *Journal of Tribology*, vol. 145, no. 5, p. 054101, 2023, doi: 10.1115/1.4056517.