



Metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos productivos en la industria criogénica, de la empresa Indura Ecuador en el año 2025.

## TESIS DOCTORAL

que, para obtener el Grado de Ph.D.

DOCTOR EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

PRESENTA

Raúl Heriberto Andrango Guayasamín

ASESOR

Dra. Zaida Mireya Osto de Sammataro

México, (2025)

La presente Tesis Doctoral debe ser citada como:

Andrango Guayasamín, Raúl Heriberto. (2025). Metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos productivos en la industria criogénica, de la empresa Indura Ecuador en el año 2025. [Tesis de Doctorado de la Universidad de Investigación e Innovación de México- UIIX]



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Se permite la reproducción total o parcial y la comunicación pública de la obra con reconocimiento de la autoría y mención de la Universidad de Investigación e Innovación de México - UIIX.

No se permite el uso comercial ni la creación de obras derivadas.

**Resumen.**

La gestión de proyectos en contextos industriales ha evolucionado hacia modelos eficientes, flexibles y orientados a la generación sostenida de valor. En sectores complejos como la industria criogénica, donde se requieren altos estándares de precisión y seguridad, la filosofía LEAN emerge como un enfoque estratégico para eliminar actividades que no agregan valor, optimizar recursos y promover la mejora continua. Esta investigación se enfoca en diseñar y validar una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva, centrada en la empresa Indura Ecuador como caso de estudio específico, debido a sus particularidades tecnológicas y operativas. Se propone evaluar la influencia de la implementación de LEAN sobre indicadores de eficiencia, calidad, costos y tiempos de ejecución, integrando un enfoque mixto que combina análisis cuantitativo de variables productivas con la interpretación cualitativa de prácticas organizacionales. El diseño metodológico incluye una revisión exhaustiva del estado del arte, diagnóstico del contexto actual y aplicación de técnicas estadísticas -analíticas para validar los resultados. Se anticipa que la adopción de esta metodología permitirá superar desafíos inherentes a la industria criogénica, como la resistencia al cambio y la complejidad técnica, generando beneficios tangibles en la competitividad y sostenibilidad. Así, la presente propuesta contribuye al desarrollo de herramientas prácticas y teóricas para optimizar procesos productivos especializados, aportando a la transformación efectiva del sector criogénico en un entorno global dinámico y exigente.

**Palabras clave:** gestión de proyectos, industria criogénica, eficiencia operativa, filosofía LEAN, mejora continua.

**Abstract.**

Project management in industrial contexts has evolved toward efficient, flexible models focused on sustained value creation. In complex sectors such as the cryogenic industry, where high standards of precision and safety are required, the LEAN philosophy emerges as a strategic approach to eliminate non-value-adding activities, optimize resources, and foster continuous improvement. This research focuses on designing and validating a methodology for project management in the production phase, centered on the company Indura Ecuador as a specific case study, due to its technological and operational particularities. The study proposes evaluating the impact of LEAN implementation on efficiency, quality, cost, and execution time indicators, integrating a mixed approach that combines quantitative analysis of productive variables with qualitative interpretation of organizational practices. The methodological design includes a comprehensive review of the state of the art, a diagnosis of the current context, and the application of statistical-analytical techniques to validate the results. It is anticipated that the adoption of this methodology will help overcome challenges inherent to the cryogenic industry, such as resistance to change and technical complexity, generating tangible benefits in competitiveness and sustainability. Thus, this proposal contributes to the development of practical and theoretical tools to optimize specialized production processes, supporting the effective transformation of the cryogenic sector in a dynamic and demanding global environment.

**Keywords:** project management, cryogenic industry, operational efficiency, LEAN philosophy, continuous improvement.

## **Agradecimientos.**

Este trabajo doctoral representa la culminación de un exhaustivo proceso de investigación que no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de numerosas personas e instituciones, cuya orientación y respaldo fueron esenciales en cada etapa.

Manifiesto mi más profunda gratitud a Dios, por otorgarme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para mantenerme firme durante este recorrido académico.

Agradezco sinceramente a mi familia, por su paciencia, apoyo incondicional y comprensión constante a lo largo de todo el proceso. Reconozco también la valiosa contribución de mis compañeros y colegas, quienes enriquecieron este camino mediante el intercambio de ideas y su respaldo en momentos decisivos.

Mi agradecimiento se dirige igualmente a la Universidad de Investigación e Innovación de México (UIIX), cuya acogida y compromiso con la excelencia académica y científica han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto de vida.

En especial, valoro la guía rigurosa, la motivación constante y la calidad humana de mi tutora, la Dra. Zaida Osto de Sammataro, cuyo acompañamiento enriqueció cada fase de esta investigación; a ella expreso mi profundo reconocimiento y agradecimiento.

Finalmente, agradezco a AIR PRODUCTS GROUP - Indura Ecuador SA por brindar los recursos y facilitar el acceso a la información indispensable para la realización de este estudio. Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo y del compromiso de quienes confiaron en mi trabajo y me apoyaron a lo largo de este camino.

**Dedicatorias.**

Dedico esta tesis a mis padres, Leónidas y Delia, quienes con su ejemplo y orientación me inculcaron que la educación constituye la verdadera fortaleza para la vida. Sus enseñanzas y la confianza depositada en mis capacidades han sido el cimiento sobre el cual he edificado cada logro académico y personal.

Asimismo, rindo homenaje a la memoria de mis abuelos, de quienes heredaron los principios y valores que hoy guían mi trayectoria. Su legado de integridad, dedicación y sabiduría ha sido un faro constante a lo largo de este camino académico.

Finalmente, dedico este trabajo con inmenso cariño y gratitud a mi hija Rafaella, cuya presencia, inspiración y amor incondicional se convirtieron en un pilar esencial para culminar esta investigación. Este logro es también suyo, pues su luz y motivación han guiado cada paso de mi camino. A todos ellos ofrezco este resultado como testimonio perdurable de su huella en mi vida y formación.

**ÍNDICE GENERAL**

Resumen.....	III
Abstract. ....	IV
Agradecimientos.....	V
Dedicatorias.....	VI
INTRODUCCIÓN. ....	17
CAPÍTULO I. Proyección de la investigación.....	20
1.1. Línea de investigación de la Universidad de Innovación e Investigación de México y su ámbito de estudio. ....	21
1.2. Planteamiento del problema. ....	23
1.3. Formulación del problema (Pregunta de investigación). ....	26
1.4. Justificación.....	26
1.5. Objeto de estudio.....	27
1.6. Campo de acción. ....	28
1.7. Objetivos. ....	28
1.7.1. Objetivo General. ....	28
1.7.2. Objetivos específicos. ....	29
1.8. Hipótesis.....	29
1.9. Alcance temático. ....	29

1.10. Delimitación Espacial y Temporal.....	30
CAPÍTULO II. Fundamentos Teóricos Referenciales.....	32
2.1. Estado del arte.....	33
2.1.1. Antecedentes.....	37
2.2. Marco Teórico.....	42
2.2.1. Filosofía LEAN.....	42
2.2.2. Gestión de proyectos.....	43
2.2.3. Industria criogénica.....	44
2.2.4. Investigación y estudios previos.....	45
2.2.5. Metodologías LEAN aplicadas a proyectos industriales.....	48
2.2.5.1. LEAN Manufacturing / Production.....	48
2.2.5.2. LEAN Construction.....	49
2.2.5.3. LEAN Project Management.....	50
2.3. Marco Conceptual.....	51
2.3.1. Principio 1 – El valor, definir el valor desde la perspectiva cliente.....	51
2.3.2. Principio 2 – Identificar el flujo del valor.....	52
2.3.3. Principio 3 – Optimizar el flujo de valor.....	53
2.3.4. Principio 4 – Tirar el flujo de valor Pull. Permitir que el cliente extraiga el valor.....	54
2.3.5. Principio 5 – Buscar la perfección a través de la mejora continua.....	54
2.4. Marco Histórico.....	56

2.5. Marco Contextual.....	60
2.5.1. Impacto en la optimización de recursos.....	61
2.5.2. Condiciones políticas relevantes.....	62
2.6. Marco Legal y Normativo.....	63
2.6.1. Normativa Nacional Aplicable.....	64
2.6.1.1. Seguridad y Salud Ocupacional.....	64
2.6.1.2. Manejo y Almacenamiento de Gases Criogénicos.....	64
2.6.1.3. Normativa Ambiental y Energética.....	64
2.6.2. Referencia Internacional y Estándares Corporativos.....	64
CAPÍTULO III. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación.....	67
3.1. Cuadro Operacionalización de variables.....	68
3.2. Diseño metodológico.....	72
3.2.1. Definición del enfoque, diseño y tipo de investigación de la tesis.....	72
3.2.1.1. Diseño de la Investigación.....	74
3.2.1.1.1. Enfoque mixto y diseño explicativo secuencial.....	74
3.2.1.1.2. Fase Cuantitativa: Diseño No Experimental – Transversal Correlacional.....	75
3.2.1.1.3. Fase Cualitativa: Diseño de Estudio de Caso con Enfoque Explicativo.....	76
3.2.1.2. Tipo de Investigación.....	77
3.2.1.2.1. Investigación Descriptiva.....	77
3.2.1.2.2. Investigación Correlacional.....	78

3.2.2. Definición de métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos. ....	80
3.2.2.1.1. Revisión Bibliográfica.....	82
3.2.2.1.2. Observación Directa.....	83
3.2.2.1.3. Análisis de datos.....	84
3.2.2.2. Instrumentos. ....	85
3.2.2.2.1. Bitácoras de operación. ....	85
3.2.2.2.2. Herramientas de gestión de proyectos.....	86
3.2.2.2.3. Manual de Operaciones (Planta ASU). ....	86
3.2.2.2.4. Value Stream Mapping (VSM). ....	87
3.2.3. Desarrollo de los instrumentos de obtención de datos. ....	87
3.2.3.1. Diseño del panel de expertos.....	87
3.2.3.2. Objetivo del Panel. ....	88
3.2.3.3. Compromiso del Panel. ....	88
3.2.3.4. Funcionamiento del Panel. ....	88
3.2.3.5. Resultados esperados.....	89
3.2.3.6. Evaluación y Renovación.....	90
3.2.4. Determinación de la muestra y su criterio de selección. ....	90
3.2.4.1. Acciones para los ajustes previos al trabajo de campo. ....	90
3.3. Trabajo de campo. ....	91
3.3.1. Prueba Piloto. ....	91

3.3.1.1. Descripción del proceso Planta ASU. ....	92
3.3.1.2. Aire proceso. ....	92
3.3.1.3. Refrigeración de aire. ....	94
3.3.1.4. Compresor de refuerzos o booster.....	95
3.3.1.5. Turbina de expansión. ....	95
3.3.1.6. Descripción mecánica de un turbo expansor.....	95
3.3.1.7. Separación de Oxígeno / Nitrógeno. ....	96
3.3.1.8. Columna de media presión. ....	97
3.3.1.9. Columna de baja presión. ....	98
3.3.2. Aplicación de los instrumentos. ....	99
3.3.2.1. Bitácoras de Operación. ....	100
3.3.2.1.1. Bitácora de Operación – Sala de Control. ....	100
3.3.2.1.2. Bitácora de Operación – Unidad de Refrigeración (R-2401) / Separador de Agua (Ciclón) / Totalizador Másico / Filtro Principal. ....	101
3.3.2.1.3. Bitácora de Operación – Compresor Principal (C-2101). ....	102
3.3.2.1.4. Bitácora de Planta – Compresor de Reciclo (C-2102). ....	103
3.3.2.1.5. Bitácora de Operación Turbina de Expansión (TBX-2501) – PPU’s (2601-2602). ....	105
3.3.3. Procesamiento de la información. ....	106
3.3.3.1. Análisis Cuantitativo. ....	107
3.3.3.1.1. Análisis de regresión polinómica. ....	107

3.3.3.1.2. Análisis de datos múltiple. ....	113
3.4. Análisis de los resultados en los datos obtenidos. ....	120
3.4.1. Graficación. ....	120
3.5. Redacción de resultados y discusión. ....	132
3.5.1. Estimación del caudal de Chiller. ....	132
3.5.2. Metodología para el cálculo del caudal másico. ....	133
3.5.3. Vinculación del Análisis con los Objetivos de Estudio. ....	134
CAPÍTULO IV: Propuesta de Transformación. ....	136
4.1. Fundamentación de la propuesta de transformación. ....	136
4.2. Estructura de la propuesta de transformación. ....	138
4.2.1. Tema. ....	138
4.2.2. Objetivos de la Propuesta. ....	138
4.2.2.1. Objetivo general de la Propuesta. ....	138
4.2.2.2. Objetivos Específicos de la Propuesta. ....	138
4.2.3. Representación Teórica y/o Práctica (mediante un esquema lógica). ....	138
4.2.4. Fases y/o etapas. ....	139
4.2.5. Acciones y/o actividades (vinculadas a las fases o etapas). ....	141
4.2.6. Selección de métodos, técnicas e instrumentos para su aplicación. ....	144
4.2.7. Recursos para su funcionamiento. ....	144
4.3. Valoración/ evaluación / validación de la propuesta de transformación. ....	154

4.3.1. Valoración de la pertinencia mediante el método Delphi. ....	154
CONCLUSIONES. ....	161
RECOMENDACIONES. ....	163
BIBLIOGRAFÍA.....	164
ANEXOS.....	174
Anexo 1. Diagrama de Procesos – Planta ASU. ....	174
Anexo 2: Manual Operación y Control Planta. ....	175
Anexo 3: Registro Bitácora de Operación.....	177
Anexo 4: Bitácora de Operación – Unidad de Refrigeración (R-2401) / Separador de Agua (Ciclón) / Totalizador Másico / Filtro Principal.....	179
Anexo 5: Bitácora de Operación - Compresor Principal (C-2101). ....	180
Anexo 6: Bitácora de Planta – Compresor de Reciclo (C - 2102). ....	181
Anexo 7: Bitácora de Operación Turbina de Expansión (TBX-2501) – PPU’s (2601-2602)..	182
Anexo 8: Análisis de regresión polinómica. ....	183

**Índice de figuras**

Figura 1 La filosofía LEAN en diferentes sectores económicos.....	48
Figura 2 Compresor – Cooling.....	94
Figura 3 Turbina de expansión.....	96
Figura 4 Torre de destilación .....	99
Figura 5 Información de red.....	114
Figura 6 Descripción del modelo MOD_1.....	115
Figura 7 Red Neuronal - TE 4331, temperatura, agua de enfriamiento del sistema. ....	126
Figura 8 Resultado de análisis múltiple para la temperatura (TI-5801).....	145
Figura 9 Mapa de respuesta de modelo lineal para TI-2510 (48,17-49,13°C) y TI-5870 (20-30°C). .....	147
Figura 10 Diagrama conceptual maestro - esclavo de control térmico. ....	153
Figura 11 Diagrama de flujo de la metodología.....	159

**Índice de gráficas.**

Gráfico 1	Análisis de regresión polinómica .....	121
Gráfico 2	Análisis de regresión polinómica. ....	121
Gráfico 3	Análisis de regresión polinómica. ....	122
Gráfico 4	Análisis de regresión polinómica. ....	122
Gráfico 5	Análisis de regresión polinómica. ....	123
Gráfico 6	Análisis de regresión polinómica. ....	123
Gráfico 7	Resumen de procesamiento de la variable T1 2132. ....	128
Gráfico 8	Resumen de procesamiento de la variable de T1 2182. ....	130
Gráfico 9	Nivel de consenso entre expertos mediante el coeficiente de Kendall (W). ....	157

**Índice de tablas.**

Tabla 1 Cuadro de Antecedentes.....	38
Tabla 2 Principios de la Filosofía LEAN.....	45
Tabla 3 Normas clave aplicables.....	65
Tabla 4 Operacionalización de variables matriz de consistencia científica metodológica. ....	68
Tabla 5 Análisis de regresión polinómica.....	108
Tabla 6 Análisis de modelos de regresión.....	117
Tabla 7 Detalle de la metodología.....	139
Tabla 8 Diseño de la Metodología LEAN.....	140
Tabla 9 Estructura Metodológica Propuesta. ....	142
Tabla 10 Instrumentación y monitoreo. ....	151
Tabla 11 Síntesis estadística de las variables térmicas. ....	152
Tabla 12 Interpretación del modelo estadístico como base de diseño. ....	153
Tabla 13 Resultados obtenidos en la valoración experta de la metodología propuesta. ....	156

## INTRODUCCIÓN.

La gestión de proyectos en contextos industriales ha evolucionado hacia modelos que buscan eficiencia, flexibilidad y generación sostenida de valor. En este marco, la filosofía LEAN se ha consolidado como un paradigma orientado a eliminar actividades que no generan valor y a optimizar los recursos disponibles, convirtiéndose en una estrategia ampliamente validada en diferentes sectores (Cleland & Ireland, 2019; Womack & Jones, 2018). Su pertinencia resulta especialmente relevante en industrias complejas, como la criogénica, donde los procesos demandan precisión técnica, elevados estándares de seguridad y altos costos operativos.

La investigación actual está orientada al diseño de la metodología de gestión de proyectos en base a la fase productiva, especialmente en la industria criogénica. Para adoptar la filosofía LEAN y se utiliza en la entidad “Indura Ecuador” como caso de estudio, esto permite aplicar y validar las bases de la metodología en el entorno industrial real y sumamente especializado. La elección de este escenario responde a las particularidades del sector, que combina automatización avanzada, procesos de separación de aire a gran escala y exigencias crecientes de eficiencia energética (Smith, 2018). Estas condiciones hacen indispensable contar con herramientas que permitan incrementar la productividad y reducir desperdicios preservando la seguridad operativa y calidad.

En términos de variables de análisis, la investigación considera como variable independiente la adopción de los conceptos LEAN, medida a través de principios como flujo de valor, estandarización y la mejora continua. La variable dependiente se relaciona con la eficiencia en la fase productiva de los proyectos, evaluada en términos de costos, tiempos de ejecución, flexibilidad y calidad de los resultados. La interacción entre estas variables constituye el eje central de la propuesta metodológica.

La problemática identificada parte de la constatación de que, si bien la filosofía LEAN ha mostrado resultados positivos en industrias como la automotriz o la construcción (Rad & Levin, 2018), su adaptación a proyectos criogénicos enfrenta desafíos vinculados con las normas organizacionales y reticencia a la transformación (Proudlove, 2018). En el caso de Indura

Ecuador, la ausencia de una metodología específica orientada a la fase productiva limita la competitividad, incrementa los costos y dificulta el cumplimiento de plazos y estándares de calidad (Boza, 2019; Vargas, 2020).

El propósito principal de esta investigación consiste en construir un modelo para la gestión de proyectos durante la etapa de producción que se sustenta en los principios LEAN, busca potenciar la eficiencia, calidad y capacidad competitiva en la industria criogénica, enfocándose especialmente en la empresa Indura Ecuador. Este objetivo general se apoya en objetivos específicos que incluyen la identificación de los procesos clave dentro de la cadena de valor, la evaluación del estado actual de la gestión, la caracterización de las características propias de los proyectos productivos y la elaboración de un modelo ajustado a las particularidades del entorno local.

La organización del trabajo responde a una secuencia lógica y progresiva:

Capítulo I. Proyección de la investigación. Este estudio se enfoca en identificar y abordar las dificultades asociadas con la gestión de proyectos en la industria criogénica, con especial atención a Indura Ecuador, donde se han observado problemas de productividad y altos costos. Se propone implementar la filosofía LEAN para optimizar los procesos productivos, minimizar los desperdicios y aumentar la competitividad. La investigación establece un enfoque metodológico fundamentado en LEAN, orientado a mejorar la eficiencia operativa en la planta ASU-Alóag, abarcando proyectos realizados desde 2022 hasta el presente, con un fuerte énfasis en la mejora continua y la sostenibilidad.

Capítulo II. Fundamentos teóricos referenciales. La investigación presenta un marco integral que amalgama elementos teóricos, conceptuales, normativos y legales relacionados con la gestión de proyectos bajo el enfoque LEAN en la industria criogénica. Se base en principios como la mejora continua y la minimización de desperdicios, apoyándose en el conocimiento de expertos destacados. Asimismo, tiene en cuenta regulaciones tanto nacionales como internacionales, así como sistemas de gestión de calidad que respaldan la eficiencia y sostenibilidad dentro del contexto de Indura Ecuador.

Capítulo III. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación. El análisis se llevó a cabo utilizando un enfoque mixto que integró tanto el análisis estadístico como la comprensión práctica para investigar los procesos de Indura Ecuador. Mediante métodos teóricos y de campo, que incluyeron observaciones y entrevistas, se recopilaron datos sobre eficiencia, consumo energético y rendimiento térmico. Los hallazgos indicaron que la implementación de la metodología LEAN resultó en un aumento de la productividad, una disminución de las pérdidas y un refuerzo de la cultura de mejora continua, subrayando su contribución a la sostenibilidad y competitividad del sector criogénico en Ecuador.

Capítulo IV. Propuesta de transformación. El capítulo presenta una propuesta de mejora fundamentada en la filosofía LEAN, comparando los principios teóricos con los resultados logrados en la planta criogénica de Indura Ecuador. Se propone una metodología de gestión que se desarrolla en cinco etapas, incorporando análisis estadísticos y herramientas inteligentes con el objetivo de optimizar la eficiencia térmica. La validación realizada a través del método Delphi, con la participación de expertos del sector, respalda su relevancia y factibilidad. En conjunto, esta propuesta evidencia que la implementación de LEAN refuerza tanto la sostenibilidad como el desempeño operativo en el ámbito industrial.

El trabajo incluye conclusiones y recomendaciones, donde se resaltan los aportes tanto teóricos como prácticos del estudio, se establecen directrices para la implementación de la metodología desarrollada y se proponen posibles líneas de investigación para trabajos futuros.

La investigación busca ofrecer una respuesta metodológica al reto de gestionar proyectos en un sector de alta especialización, demostrando que la filosofía LEAN, lejos de limitarse a un conjunto técnico de instrumentos, representa una estrategia integral que puede revolucionar la etapa productiva en la industria criogénica, al tiempo que impulsa el fortalecimiento competitivo de Indura Ecuador en un contexto global dinámico y en constante crecimiento.

## **CAPÍTULO I. Proyección de la investigación.**

Cleland e Ireland (2019), definen un proyecto como una iniciativa con duración limitada cuyo propósito es crear un servicio, producto o resultado. Esta definición destaca la naturaleza temporal del proyecto y su objetivo de generar algo distintivo. El sistema de gestión de proyectos, asimismo, denominada administración, dirección de proyectos o gerencia, se centra en organizar y unificar las actividades necesarias para iniciar, planificar, ejecutar, controlar y finalizar proyectos, con la finalidad de asegurar la culminación exitosa de todas las tareas y cumplir con las metas establecidas en alcance, presupuesto y tiempo.

La aplicación del sistema LEAN en la gestión de proyectos permite estructurar iniciativas que maximizan el valor entregado y minimizan las actividades que no aportan valor, conocidas como desperdicios.

Rad y Levin (2018) sostienen que esta forma de gestión busca alcanzar eficiencia, calidad y satisfacción del cliente, mientras reduce costos y tiempos de entrega. Ha sido aplicado con éxito en diversos sectores y es reconocido como un método ágil y orientado a generar valor (pp. 33-54).

El enfoque de gestión basado en fabricación esbelta se orienta a eliminar elementos innecesarios y perfeccionar procesos para aumentar el valor para el cliente y reducir los tiempos de entrega; para ello reconocer y erradicar actividades que no generan valor, así como la sobreproducción, esperas, movimientos sin propósito o defectos en la producción.

Womack y Jones (2018) señalan que la esencia de este pensamiento se dirige a crear un flujo continuo de valor y reducir las actividades que no añaden valor o desperdicios. El objetivo es eliminar el trabajo superfluo, tiempos de espera, movimientos inútiles, producciones excesivas, inventarios elevados, defectos y falta de competencias necesarias.

Es relevante destacar que el éxito en la adopción no depende exclusivamente de las herramientas y tecnologías implementadas, sino también de fomentar una cultura organizacional que respalde y promueva esta filosofía (Liker y Hoseus, 2019). Este enfoque requiere impulsar la

colaboración y participación en todos los niveles de la organización, promoviendo que todos los miembros contribuyan al reconocimiento y erradicación de residuos, así, valorando la mejora continua y la innovación.

Esta metodología empresarial se distingue por generar un rendimiento sobresaliente en aspectos como la satisfacción del cliente, compromiso del personal, resultados para los accionistas y beneficios sociales. Su principal objetivo es ofrecer a los clientes lo que necesitan, sin demoras ni inconvenientes, evitando errores costosos. Además, permite liberar capacidad adicional para incrementar el valor entregado en aproximadamente un tercio sin necesidad de recursos significativos, mediante la reconfiguración de activos y la simplificación de relaciones en la cadena de suministro.

La propuesta metodológica para la gestión de proyectos en fase productiva basada en estos principios responde a los desafíos actuales de Indura Ecuador, en un contexto marcado por la competencia y la dinámica del mercado. Por ello, resulta fundamental buscar modelos de gestión que satisfagan los requerimientos necesarios del cliente y fortalezcan la competitividad de la entidad.

Dicha metodología se adapta particularmente bien a los requerimientos de la industria criogénica, caracterizada por una alta automatización, procesos complejos y elevados costos operacionales. En este sector es clave reducir desperdicios en tiempo, recursos y energía para optimizar la productividad y minimizar costos.

Además, LEAN proporciona herramientas específicas, como el mapeo de flujo de valor y la gestión visual, que facilitan la comprensión y control de procesos complejos, aspectos fundamentales para garantizar el sistema de seguimiento y seguridad en la industria criogénica.

### **1.1. Línea de investigación de la Universidad de Innovación e Investigación de México y su ámbito de estudio.**

**Línea de Investigación:** Gestión empresarial y desarrollo directivo

**Ámbito de Estudio:** Mejora continua de la gestión administrativa de proyectos, a diversos niveles de áreas organizacionales.

La identificación y comprensión profunda de las líneas de investigación del programa de estudio representa un pilar esencial para la orientación efectiva y sistemática de la producción científica. Dichas líneas constituyen la base estructural sobre la cual se canalizan los esfuerzos tanto académicos como prácticos, dirigiéndose hacia problemáticas de relevancia contextual que requieren atención diferenciada (Politécnico Grancolombiano, s.f.). Este conocimiento resulta imprescindible para estructurar los currículos y planificaciones académicas de manera que conserven coherencia y continuidad con las demandas emergentes del entorno socioeconómico y productivo, favoreciendo la generación de soluciones técnicamente viables y socialmente pertinentes (Barrios, 1990).

En el contexto de la investigación sobre Gestión Empresarial y Desarrollo Directivo, con un enfoque en la mejora continua de la administración de proyectos a través de diversas estructuras organizativas, es esencial dirigir el análisis hacia procesos críticos que impactan directamente en la eficacia operativa y la competitividad empresarial. La adopción de metodologías inspiradas en la filosofía LEAN para gestionar proyectos durante su fase productiva en el sector criogénico, como se ejemplifica en Indura Ecuador, responde a la imperante necesidad de eliminar actividades que no aportan valor, optimizar los flujos laborales y reforzar la capacidad para tomar decisiones oportunas y fundamentadas (Miro, 2024).

El contexto productivo de Indura Ecuador evidencia problemáticas inherentes a la productividad, los tiempos sin valor agregado y los elevados costos operativos, condiciones que pueden ser mitigadas mediante la rigurosa adopción de la filosofía LEAN. Esta metodología, centrada en la mejora continua y la eficiencia operativa, permite atacar las causas fundamentales que originan dichas deficiencias, promoviendo intervenciones sostenibles y adaptadas a la dinámica del sector industrial actual (Cristhian Macias, 2025). Por consiguiente, la línea de investigación bajo análisis y el ámbito de mejora continua en gestión de proyectos no solo atienden las deficiencias superficiales, sino que facilitan la formulación de soluciones proactivas, con impacto duradero y estratégico.

Así, el conocimiento detallado y la aplicación rigurosa de esta línea de investigación constituyen un requisito indispensable para alinear los proyectos de investigación con las verdaderas necesidades del sector productivo. Esto garantiza que los resultados obtenidos sean, además de sólidos desde una perspectiva teórica, altamente aplicables, con una vocación claramente propositiva orientada hacia la transformación efectiva de la industria criogénica ecuatoriana, generando impactos positivos a nivel organizacional y sectorial (Suing, s.f.; Barrios, 1990).

## **1.2. Planteamiento del problema.**

La implementación de la filosofía LEAN a nivel global ha demostrado ser eficaz en enfrentar desafíos importantes en la gestión de proyectos durante su fase productiva. Se han documentado casos exitosos de aplicación de LEAN en la industria criogénica, tanto en la producción de equipos como en la supervisión de obras. Estos ejemplos han mostrado mejoras notables en eficiencia, reducción de costos, cumplimiento de plazos y optimización de calidad y seguridad. No obstante, persisten retos y aspectos que requieren atención para alcanzar una gestión óptima de proyectos en su fase productiva.

La industria criogénica incluye diversos proyectos que obtienen ventajas al implementar la filosofía LEAN en la gestión de estos:

La edificación de instalaciones de gas natural licuado (GNL) ha mostrado mejoras en la eficiencia operativa y una reducción de costos gracias a la aplicación de metodologías LEAN. Johnson y Smith (2018) afirman que “la adopción de enfoques LEAN permite optimizar el uso de recursos, acortar los plazos de construcción y disminuir el costo total del proyecto” (pp. 106-118). Esto demuestra claramente las ventajas y la relevancia de implementar la metodología LEAN en la construcción de plantas de GNL, con el fin de lograr una mayor efectividad y rentabilidad en estos proyectos.

La aplicación de principios LEAN en la fabricación de equipos criogénicos ha permitido mejorar la eficiencia de los procesos de producción.

Según López, Rodríguez y García (2019), argumenta que “la optimización de los flujos de trabajo y la eliminación de tareas superfluas o que no aportan valor resulta en una mayor eficiencia en la producción de equipos criogénicos. Asimismo, se ha evidenciado una mejora considerable en la calidad de los productos fabricados, lo que ha contribuido a un incremento en la satisfacción del cliente” (pp. 78-92).

Del mismo modo, en el caso de los proyectos de almacenamiento criogénico se han adoptado enfoques LEAN para optimizar la utilización de los recursos, Según Smith y Johnson (2018) “Mediante la aplicación de técnicas como el just-in-time y la estandarización de los procesos, se logra una optimización en la utilización de los recursos y una mejora en la gestión de inventarios en los proyectos de almacenamiento criogénico” (pp. 145-162). Este enfoque permite reducir el desperdicio y minimizar los tiempos de espera, lo que contribuye a una mayor eficiencia en el manejo y almacenamiento de productos criogénicos. Los resultados obtenidos respaldan la importancia de la aplicación de enfoques LEAN en la gestión de proyectos de almacenamiento criogénico.

Por otra parte, es preciso destacar que la implementación de LEAN en la industria criogénica es altamente dependiente de varios factores, como la escala de los proyectos, la naturaleza de los productos y procesos, los requisitos regulatorios y estándares particulares de cada país o región (Proudlove, 2018). Estas variables influyen en la forma en que se aplican los principios y herramientas de LEAN en el entorno criogénico, lo que resalta la importancia de adaptar las prácticas LEAN a las características específicas de cada contexto industrial.

La industria criogénica puede enfrentar desafíos significativos debido a la resistencia al cambio y la cultura organizacional existente. La resistencia al cambio puede provenir tanto de los empleados como de la alta dirección, lo cual dificulta la adopción y la implementación efectiva de las prácticas y principios LEAN. Además, la cultura organizacional arraigada puede estar en conflicto con los valores y los enfoques de LEAN, generando barreras adicionales para su implementación exitosa.

A medida que el mundo demanda plantas más grandes y eficientes con cronogramas cada vez más cortos, la tecnología e ingeniería criogénica en el corazón de la separación de aire a gran escala deben seguir evolucionando para enfrentar estos desafíos. Según Smith (2018) “se destaca

que la industria ha logrado avances significativos basados en una larga historia de separación de aire criogénico. Estos avances continuos buscan brindar seguridad, eficiencia y sostenibilidad en la operación de las plantas criogénicas” (pp. 125-136).

En el ámbito de la criogenia, la eficiencia y la contención de costos son elementos vitales para asegurar el éxito en la gestión de proyectos durante la fase productiva. La filosofía LEAN ha mostrado su efectividad en un amplio rango de industrias; sin embargo, su aplicación en contextos específicos, como es el caso de Indura Ecuador, demanda una metodología que se ajuste y se enfoque en las singularidades de este sector.

Boza (2019), en su tesis titulada “Análisis y mejora del proceso de distribución criogénica de la empresa Indura Ecuador S.A.”, establece que "tras llevar a cabo el análisis, se sugiere la adquisición e implementación de una planta VSA con la finalidad de reducir la demanda insatisfecha. Con una inversión requerida de \$119,100.00 para llevar a cabo esta propuesta, la empresa generará un ingreso de \$156,411.842 durante el primer año" (p. 57).

El objetivo del presente estudio es proporcionar un manual práctico que pueda implementarse en la empresa Indura Ecuador y sus filiales, para mediar la gestión como LEAN, frustrante o proyectar su fase productiva. Esto tiene el propósito de crear valor, mejorar la competitividad y garantizar el éxito en la realización de iniciativas en esta área.

Según Vargas (2020, pp. 25-32), “las empresas ecuatorianas de criogenia presentan serios problemas para el desarrollo de proyectos como retrasos en la entrega y altos costos, falta de flexibilidad y métodos desactualizados, lo que requiere estilos de gestión alternativos”.

En tal sentido, el no contar con una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN puede causar problemas con la ineficiencia en los procesos de una industria criogénica, porque lo más probable sea que los procesos de producción no estén optimizados y no se eliminen los desperdicios y actividades que no agreguen valor, los altos costos pueden llevar a cabo una baja calidad del producto, así como el incumplimiento de plazos de entrega, falta de flexibilidad y baja competitividad en un entorno empresarial cada vez más competitivo.

Al implementar la metodología LEAN en la gestión de proyectos en fase productiva en la industria criogénica, se logrará una mejora significativa en la eficiencia operativa, una reducción de costos, una mejora en la calidad de los proyectos y una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación. Estos beneficios son fundamentales para alcanzar el enfoque de sostenibilidad de la cadena de suministro y fortalecer la posición competitiva como parte de la política empresarial de Indura Ecuador.

### **1.3. Formulación del problema (Pregunta de investigación).**

¿Qué elementos debe considerar una metodología de gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía de LEAN, en una empresa de producción criogénica a fin mejorar la eficiencia de los procesos productivos?

### **1.4. Justificación.**

La investigación formulada es fundamental para la industria criogénica porque desempeña un papel crucial en diferentes ámbitos, como la energía, la medicina y la investigación. La correcta gestión de proyectos en este campo no solo implica la fabricación y montaje de equipos complejos, sino también la optimización de los procesos de producción y la eficiente gestión de recursos. En este sentido, la aplicación de la metodología LEAN puede ofrecer un enfoque efectivo para mejorar la eficiencia operativa y reducir los desperdicios en la fase productiva de los proyectos criogénicos.

La fase productiva en la industria criogénica involucra la fabricación y ensamblaje de equipos y sistemas altamente especializados, lo cual presenta desafíos específicos en términos de tiempos de producción, calidad y rentabilidad. La implementación de una metodología adecuada, basada en los principios LEAN, puede contribuir a optimizar los procesos de fabricación, reducir los tiempos de entrega y minimizar los errores, lo que se traduce en una mayor eficiencia y rentabilidad para la empresa Indura Ecuador.

Por otro lado, la filosofía LEAN ha sido ampliamente adoptada en diversas industrias con resultados exitosos en términos de mejora de la eficiencia operativa y reducción de costos. Aplicar esta metodología en la gestión de proyectos en la industria criogénica permitirá eliminar actividades innecesarias, identificar y eliminar desperdicios, y fomentar la mejora continua de los procesos. Estos aspectos son fundamentales para alcanzar una gestión más eficiente y rentable en los proyectos de la industria criogénica.

Entre las justificaciones que se pueden argumentar en una investigación como esta se encuentran: el estudio de un caso específico, como el de Indura Ecuador, proporciona una oportunidad valiosa para analizar de manera más detallada la implementación de la metodología LEAN en la gestión de proyectos de la industria criogénica. Este caso de estudio permitirá examinar los desafíos y las soluciones aplicadas en un contexto real, brindando ejemplos prácticos y resultados concretos que pueden ser extrapolados a otras organizaciones del mismo sector.

En cuanto al aporte o justificación metodológica, se puede argumentar que la investigación propuesta, permitirá un enfoque riguroso y efectivo para la gestión de proyectos en la fase productiva de la industria criogénica. Su aplicación en el caso de Indura Ecuador brindará la oportunidad de obtener beneficios tangibles, como la optimización de los recursos, la reducción de tiempos productivos y la mejora en la calidad. Además, el análisis detallado de este caso de estudio proporcionará valiosos aportes metodológicos y prácticos para la implementación exitosa de LEAN en proyectos criogénicos.

### **1.5. Objeto de estudio.**

El enfoque de esta metodología es implementar la gestión de proyectos durante la fase productiva en el sector criogénico en Indura - Ecuador. Tiene como objetivo generar un enfoque basado en los principios de la filosofía LEAN para aumentar la eficiencia y competitividad. La propuesta metodológica persigue no sólo el análisis de la aplicación de estos conceptos en proyectos actuales, sino también proporcionar un manual práctico que busca mejorar los procesos y prácticas de gestión en esta industria.

La metodología mencionada se centrará en la administración de proyectos, lo que implica un proceso de planificación destinado a optimizar los flujos productivos, disminuir costos, elevar la calidad y aumentar la eficiencia durante la fase de producción. Esta metodología está fundamentada en los principios de la filosofía LEAN, una estrategia gerencial orientada a eliminar el desperdicio dentro de los procesos productivos.

## **1.6. Campo de acción.**

La metodología sugerida se enfoca en la industria criogénica, tomando como caso de estudio a Indura Ecuador, y está orientada hacia la gestión de proyectos en su etapa productiva. Su propósito es implementar los principios de la filosofía LEAN para potenciar tanto la eficiencia como la competitividad del sector.

La industria criogénica particularmente abarca la producción, manipulación y almacenamiento de gases a muy bajas temperaturas, como el oxígeno, nitrógeno, argón, entre otros. Estos gases son utilizados en diversas aplicaciones industriales, médicas y científicas. La gestión de proyectos en esta industria implica la planificación, ejecución y control de proyectos relacionados con la producción, manipulación y almacenamiento de estos gases, así como con los equipos y sistemas asociados a estos procesos.

La metodología que se pretende desarrollar será aplicada en la gestión de proyectos en fase productiva de la industria criogénica, incluyendo la gestión de la cadena de suministro, la optimización de procesos de producción, la gestión de la calidad y la mejora continua, entre otros

## **1.7. Objetivos.**

### ***1.7.1. Objetivo General.***

Proponer una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos productivos en la industria criogénica de la empresa Indura Ecuador.

### **1.7.2. *Objetivos específicos.***

- Determinar los fundamentos teóricos y referenciales sobre la gestión de proyectos en fase productiva y la aplicación de la filosofía LEAN en el contexto industrial, con énfasis en la industria criogénica.
- Identificar los procesos críticos de la cadena de valor de la empresa Indura Ecuador, relacionados con la producción criogénica, que inciden en la eficiencia operativa.
- Diagnosticar la situación actual de la gestión de proyectos en fase productiva de Indura Ecuador, identificando brechas y oportunidades de mejora desde el enfoque LEAN.
- Diseñar una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, adaptada a la realidad de la empresa Indura Ecuador.
- Validar la metodología propuesta mediante la valoración de expertos, para determinar su pertinencia, aplicabilidad y contribución a la mejora de la eficiencia de los procesos productivos.

### **1.8. Hipótesis.**

Si se propone una metodología de gestión de proyectos en fase productiva basada en la filosofía LEAN, se puede mejorar significativamente la eficiencia operativa y reducir los desperdicios en los procesos de la industria criogénica, específicamente en la empresa Indura Ecuador.

### **1.9. Alcance temático.**

La investigación se centra en desarrollar una metodología para gestionar proyectos durante la etapa productiva, basada en los principios LEAN. Este enfoque considera las necesidades y recursos específicos del sector criogénico, con el objetivo de ofrecer una solución integral que facilite la identificación de acciones correctivas destinadas a optimizar la eficiencia productiva y a mejorar la documentación relacionada.

En un artículo publicado en "El Universo" (2021), el autor sostiene que la crisis asociada con la pandemia de COVID-19 ha llevado a una escasez significativa de gases médicos. Informes recientes afirman que la necesidad de oxígeno medicinal ha aumentado de 3 a 4 veces. Indura Ecuador posee dos plantas de "Unidades de Separación de Aire" (ASU) que funcionan bajo el proceso criogénico; pero este proceso depende, en un alto porcentaje, de varios factores de control. Sin estar limitado por ello, se observa que el flujo de producto puede ajustarse para mejorar la producción sin detrimento de la presión y pureza del producto, aunque algunas áreas están afectando claramente el consumo de energía. Un ajuste tan fino del proceso permite tener un control más refinado sobre la eficiencia del rendimiento de los equipos criogénicos con características cualitativas constantes del producto obtenido.

Las necesidades de innovar la industria criogénica, es proporcionar un estudio de innovación y desarrollo (I+D) son esenciales para que la empresa obtenga una ventaja competitiva y mejore el posicionamiento en el mercado. La aplicación de una estrategia que se base en LEAN puede optimizar los procesos y la organización, encaminando a la entidad hacia la renovación y especialización. En este punto las diferentes etapas del proceso productivo mejora considerablemente y facilita la creación de productos de alto valor añadido. Además, la mejora tecnológica toma un papel importante convirtiéndose en el motor para un incremento sostenido y mayor competitividad.

En este sentido la investigación tiene como objetivo principal desarrollar una herramienta que optimice la eficiencia y la toma de decisiones en los diferentes puntos del proceso productivo. Esta solución aborda la identificación de propuestas de mejora, estructura y gestión de forma eficiente el flujo de información de modo que garantice el entorno productivo más organizado y eficaz.

### **1.10. Delimitación Espacial y Temporal.**

Si bien es cierto que la aplicación de la filosofía LEAN es de carácter universal para cualquier industria, estas delimitaciones permiten enfocar el estudio de manera más precisa y brindan un marco de referencia claro para el análisis y la generación de conclusiones.

Por consiguiente, la delimitación temporal del estudio se centra en un periodo concreto que va desde el año 2022 hasta el presente. En este lapso, se evaluarán los proyectos implementados por Indura Ecuador dentro de la industria criogénica y se investigará cómo se ha aplicado la metodología LEAN durante la fase productiva de esos proyectos.

La delimitación espacial del tema a tratar se centra en la industria criogénica, de la empresa Indura Ecuador, exclusivamente en la Planta (ASU-Alóag) por lo que los resultados estarán limitados a esta unidad de separación de aire.

El estudio centraliza el enfoque de la filosofía LEAN debido a las características, no se aplica a otras metodologías aplicadas en la industria criogénica puesto que se centran en la mejora de otros aspectos.

Con los hallazgos alcanzados, se podrán reconocer nuevas metodologías de investigación y posibles líneas futuras para avanzar en la tesis doctoral. Estas conclusiones representarán aportes significativos al área de estudio, ya que constituirán un fundamento robusto para la toma de decisiones y el surgimiento de ideas innovadoras en la fase siguiente del proyecto.

## **CAPÍTULO II. Fundamentos Teóricos Referenciales.**

La gestión de proyectos en la industria criogénica constituye un ámbito de alta complejidad que exige la integración precisa de múltiples factores técnicos y organizativos para garantizar resultados óptimos en condiciones extremas. Esta industria se caracteriza por el manejo de temperaturas extremadamente bajas y procesos altamente especializados, lo que introduce desafíos singulares en términos de precisión, eficiencia y aseguramiento de la calidad (Imbaquingo Yar, 2016). En este contexto, la adopción de metodologías de gestión que potencian la optimización continua de los procesos productivos se vuelve esencial para maximizar el valor y minimizar los recursos desperdiciados.

La filosofía LEAN, basada en la eliminación sistemática de desperdicios y la mejora continua, se presenta como una estrategia eficiente para la gestión de proyectos dentro del sector criogénico. Esta metodología permite estructurar y simplificar los flujos de trabajo, reducir los tiempos de espera y mejorar la utilización de materiales y recursos, favoreciendo así la sostenibilidad operativa y la competitividad (Fraga Martínez, 2023; Paredes, 2023). Desde una perspectiva gerencial, LEAN contribuye a establecer procesos más predecibles, asegurando el cumplimiento de presupuestos y cronogramas, al mismo tiempo que favorece la identificación temprana y resolución de incidencias que puedan afectar la cadena productiva (Wrike, 2025).

Este apartado realiza un examen detallado del marco conceptual que fundamenta la incorporación de un enfoque orientado a la optimización continua y reducción sistemática de ineficiencias en la administración de proyectos en contextos criogénicos. Se abordan los principios teóricos y operativos que sustentan esta estrategia, haciendo énfasis en las herramientas específicas empleadas para el perfeccionamiento de procesos y en los beneficios asociados, tales como la mejora en la calidad y en la eficiencia operativa. La finalidad es construir una base teórico-metodológica sólida que sirva de soporte para la aplicación práctica que se desarrollará en los capítulos posteriores.

## 2.1. Estado del arte.

En este apartado, la investigación se sustenta en la revisión de los diferentes estudios previos, tanto a nivel nacional como internacional, abordando los puntos principales del presente estudio. Estos antecedentes son esenciales para brindar una solución al problema planteado, la gestión de proyectos durante las etapas de producción y la aplicación de la filosofía LEAN dentro de la industria criogénica. De esta forma, se plantea el marco teórico sólido que permite la identificación de las brechas de conocimiento que justifican este estudio

La industria de producción de gases industriales, como el oxígeno, el nitrógeno y el argón, a partir del aire, es una actividad de gran relevancia económica. A lo largo del siglo XX, las plantas criogénicas de separación del aire desempeñaron un papel fundamental en esta industria. En la actualidad, enfrentan competencia en ciertos segmentos de mercado por parte de otras tecnologías, pero también se vislumbran nuevas oportunidades para su desarrollo al formar parte de complejos industriales como las petroquímicas o las centrales eléctricas.

Este mercado está liderado por cinco grandes corporaciones a nivel internacional, que son Air Liquide (francesa), Linde Group (alemana), Praxair (estadounidense), Air Products (estadounidense) y Taiyo Nippon Sanso (japonesa).

Según Alsultanny y Al-Shammari (2014), la destilación criogénica ha surgido como el método más utilizado para la fabricación de gases industriales, debido a su eficiencia en la producción de grandes volúmenes con purezas superiores al 99.5 por ciento, con un costo operativo más bajo. Esta afirmación se confirma mediante comparaciones del consumo de oxígeno en diferentes sistemas y técnicas en la generación de gases industriales. En el caso del oxígeno producido por destilación criogénica, por ejemplo, se observa un consumo específico de aproximadamente 0.28 kW/Nm<sup>3</sup>.

Un desafío significativo que enfrenta la industria criogénica, radica en la sobre instalación de capacidad, lo que conduce a interrupciones no planificadas debido a la limitación de almacenamiento disponible. Smith y Klosek (2001) determina que, en las plantas industriales, el rearranque de los procesos demanda el incremento de consumo energético, ya que necesita varias

horas para que los equipos alcancen las condiciones óptimas de operación y producción, dando lugar a la generación de productos con los estándares de calidad requerido. Este proceso incluye una puesta en marcha de todo el sistema productivo y es sustancialmente ineficiente desde este punto energético, es decir, genera un gasto considerable antes de que la planta pueda retornar a su régimen de producción normal.

A nivel internacional, han surgido proyectos en la industria criogénica, como la investigación de Padilla (2015), que se enfoca en desarrollar una tecnología innovadora para separar gases atmosféricos y capturar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mediante campos electromagnéticos y fotoionización. El objetivo principal es mejorar la eficiencia y reducir las emisiones dañinas durante su operación. La investigación se basó en un análisis exhaustivo de la literatura relacionada con la separación de gases atmosféricos, centrándose en la aplicación para la captura de CO<sub>2</sub>, explorando principios físicos y avances en espectrometría de masas y fotoionización. Los resultados respaldan las hipótesis iniciales y la viabilidad de la tecnología, aunque sugieren la necesidad de adaptación y mejora para su implementación en futuros prototipos y unidades piloto.

Además, Mora (2021) estudió en su trabajo publicado cómo optimizar la eficiencia de una planta destinada exclusivamente a la separación de aire, basándose en un enfoque exergético y teniendo en cuenta las fluctuaciones de la demanda. La metodología aplicada se inspiró en el algoritmo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), lo que permitió la optimización multiobjetivo para maximizar tanto la eficiencia exergética como el flujo de producción de argón. Se desarrolló una simulación de operación en estado estacionario de la planta en ASPEN HYSYS y se analizó la exergía de los principales equipos. Además, este proceso óptimo se implementó utilizando programación en MATLAB. Los resultados indican que no solo la optimización exergética, sino también las tácticas de integración energética son métodos muy poderosos para mejorar tanto la eficiencia como la rentabilidad económica de un proceso de separación de aire. Se encontraron áreas para mejorar y se hicieron recomendaciones específicas para asegurar que el complejo funcione tan bien como sea posible.

En el Ecuador, el aumento en la demanda de gases ha generado la necesidad de explorar nuevas propuestas e ideas en el ámbito de operaciones y proyectos. La experiencia adquirida por el personal que opera las plantas criogénicas ASU (Unidad de Separación de Aire), ha impulsado

la innovación en procesos, métodos y prácticas, con el objetivo de maximizar la eficiencia de producción.

En este contexto ecuatoriano, la planta criogénica operada por Linde Ecuador SA, se enfocó en la automatización de la línea de trasvase utilizada para llenar nitrógeno líquido LIN Backup, trabajo presentado por Monserrate (2021), el objetivo principal era mejorar la eficiencia, dado que anteriormente el control y el llenado se realizaba manualmente en el lugar. La metodología utilizada fue descriptiva y explicativa, respaldada por observaciones estructuradas. Estas observaciones se llevaron a cabo en la planta ASU, específicamente en la línea de trasvase de nitrógeno líquido, con el propósito de recopilar información sobre el proceso y el comportamiento de los operadores. Además, se consultaron fuentes de referencia, como tesis, revistas, artículos científicos y sitios web, para fortalecer la base teórica de la investigación. Los resultados destacaron la reducción del tiempo necesario para completar el llenado del tanque LIN Backup y una mejora en la precisión de la regulación del nivel de llenado. También se implementó un sistema de control automático que permitió la supervisión a distancia del proceso de llenado del tanque. En general, se logró potenciar la eficacia y la seguridad del proceso de llenado de nitrógeno líquido en la planta criogénica.

En el estudio de Optimización de la Producción de Nitrógeno en la Planta ASU Guayaquil de Linde Ecuador a través de un Modelo de Simulación del Proceso de la Línea de Gases, Tipán (2022), propone incrementar la producción de nitrógeno mediante la creación de un modelo de simulación para el proceso de la línea de gases. Este aumento se logra mediante la identificación y resolución de obstáculos en el proceso productivo. La metodología utilizada en la investigación se basa en la utilización de software de simulación para desarrollar un modelo detallado del proceso de producción de la línea de gases, asignando tiempos y características específicas a diferentes etapas. Luego, se llevaron a cabo análisis estadísticos y de control con el objetivo de obtener resultados precisos y compararlos con las proyecciones necesarias. Como resultado de esta investigación, se ha logrado crear un modelo de simulación del proceso de producción de la línea de gases, lo que ha resultado en un incremento en la producción de nitrógeno en la planta ASU Guayaquil de Linde Ecuador. Se han identificado los puntos críticos que limitaban la producción y se han implementado mejoras en la línea de gases, lo que ha resultado en la

obtención de 5 unidades de producción como productos finales y un total de 38 unidades de nitrógeno en el estado actual del proceso.

Con la finalidad de optimizar la productividad, eficiencia y operatividad de las diferentes unidades de separación de aire (ASU), “Air Products”, propietaria del grupo “Indura Ecuador”, ha puesto en marcha la implementación de nuevas tecnologías innovadoras escalables. Andrango (2018), detalla que la empresa logró mejorar el rendimiento de la planta ASU de “Indura Ecuador” mediante un proyecto enfocado en la recuperación de oxígeno residual. Esta técnica demostró responsabilidad y compromiso con la mejora continua y subraya lo fundamental que es la innovación para el crecimiento y la competitividad en la industria de los gases industriales. Se emplean métodos como la observación directa y la revisión de documentos para evaluar el sistema productivo de la planta ASU. Se exploran situaciones prácticas y se evalúan diversas alternativas con el fin de incrementar la productividad y la rentabilidad asociada a la recuperación de oxígeno. Los hallazgos de la investigación conducen a la definición de procedimientos prácticos tanto para la operación como para el control. Además, se lleva a cabo un minucioso análisis de los registros en las bitácoras de operación, los registros de mantenimiento y los registros de producto.

Las mejoras propuestas en la distribución criogénica tienen el potencial de brindar una ventaja competitiva en la prestación de sus servicios. La investigación de Boza (2019), centra “El análisis y mejora del proceso de distribución criogénica en la empresa Indura Ecuador”. El objetivo principal del estudio es examinar y optimizar este sistema de distribución para satisfacer las necesidades de clientes en el sector metalmecánico que requieren oxígeno de pureza estándar, que varía entre el 85% y el 93%. La metodología utilizada combina una descripción detallada de los procesos con elementos cuantitativos y cualitativos. El método de investigación empleado busca tanto describir cómo explicar los procesos analizados. Los resultados y los impactos esperados de este estudio apuntan a mejorar la atención a las necesidades de los clientes metalmecánicos que utilizan oxígeno gaseoso. Esto se logrará mediante la mejora de los plazos de entrega y la prestación de un servicio más personalizado. Estas mejoras permitirán a los clientes llevar a cabo sus tareas de manera más productiva, reduciendo los tiempos de inactividad debido a la falta de suministros y brindando una ventaja competitiva en la provisión de sus servicios.

El estudio del panorama vigente de la industria criogénica, tanto a nivel local, nacional e internacional, resalta dicha importancia económica vinculada a la producción de gases industriales a partir del aire. Se identifican desafíos como la sobrecapacidad de instalaciones y el alto consumo energético asociado. Estas investigaciones reflejan un esfuerzo continuo por parte de la industria para innovar y mejorar sus operaciones, con el objetivo de aumentar la eficiencia, reducir costos y adaptarse a las cambiantes demandas de los clientes. En última instancia, estos esfuerzos contribuyen al crecimiento y la competitividad del sector criogénico.

### ***2.1.1. Antecedentes.***

La gestión de proyectos se ha vuelto esencial en la industria criogénica, un sector de gran importancia en la economía de Ecuador debido a su amplio alcance de aplicaciones. La necesidad de mejorar la ejecución de proyectos en este campo ha impulsado la exploración de enfoques y metodologías que puedan elevar la eficiencia, la calidad y la satisfacción del cliente.

Posteriormente, se expone en la Tabla 1, un resumen de los principales hallazgos relacionados con el enfoque LEAN para la gestión de proyectos productivos en la industria criogénica, caso Indura Ecuador, con diferencias, similitudes y complementos entre los autores consultados.

**Tabla 1***Cuadro de Antecedentes.*

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Tema</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultados</b>	<b>Vinculación con el tema planteado</b>
Sven Januszek	2022. Alemania	Implementación de producción ajustada: Una perspectiva conductual	Mejorar la manera en que los gerentes respaldan la ejecución efectiva de programas LEAN, contribuyendo así al incremento sostenible del rendimiento de sus organizaciones, además de explorar tendencias y áreas de estudio en constante evolución relacionadas con la filosofía LEAN.	El estudio ilumina áreas de investigación en constante evolución y tendencias emergentes en el campo de LEAN. Al abordar el desafío de definir LEAN desde una perspectiva fenomenológica, se aporta una perspectiva valiosa al acervo de conocimiento en esta área. En última instancia, esta investigación representa una contribución notable al entendimiento de cómo las organizaciones pueden implementar con éxito	El vínculo entre los dos temas es importante, ya que muestra cómo la filosofía LEAN puede ser aplicada a diferentes áreas de la gestión empresarial, y cómo los factores conductuales pueden influir en su implementación exitosa.

				programas LEAN y potenciar su desempeño de manera continua.	
Luciana Mariel Tamone	2022. Argentina	Estudio de reacciones de interés atmosférico	Indagar las sustancias generadas y mecanismos de las reacciones con contaminantes y especies atmosféricas, analizando los efectos de la radiación o ausencia.	En su trabajo los resultados muestran la conjunción de datos recabados a través de técnicas que emplean matrices de gases inertes a temperaturas criogénicas y resultados procedentes de investigaciones sobre reacciones fotoquímicas en fase gaseosa se reveló de vital importancia para efectuar análisis y comparaciones entre los resultados logrados en ambas condiciones.	La relación entre ambos temas radica en la aplicación de la metodología LEAN para detectar y eliminar ineficiencias en los procesos de producción. A través del estudio de reacciones atmosféricas de interés, se contribuye al desarrollo de procesos más eficientes para la producción de gases criogénicos.
Jorge Luis García Alcaraz	2022. España	Impacto de la fabricación esbelta, six sigma y la gestión de la cadena de suministros en la sostenibilidad de maquiladoras mexicanas	Cuantificar el impacto que tienen las herramientas de manufactura esbelta en los niveles de	Los hallazgos muestran que las técnicas de fabricación esbelta que brindan soporte en la calidad de procesos y productos industriales, al igual que se enfocan en asegurar el	Los dos temas se vinculan en torno a la manufactura esbelta, una filosofía y metodología que puede contribuir a la sostenibilidad mediante la

---

			sustentabilidad que tienen las empresas maquiladoras en Ciudad Juárez (Chihuahua, México).	flujo de la materia a lo largo de las etapas de producción dentro de la industria maquiladora mexicana, son un precedente de la sustentabilidad, principalmente la económica.	mejora de la eficiencia y eficacia en los procesos y proyectos.
Ariana Sofia Barroso de Araújo	2022. Portugal	Sistema de Control de Producción para Procesos LEAN y Ágiles	Comprender las principales restricciones asociadas con la ejecución de sistemas LEAN, reconocer las causas primordiales que conducen al fracaso de los sistemas pull, establecer los requisitos y tácticas para la incorporación de sistemas de gestión de la producción en contextos LEAN, y determinar los criterios para la ejecución de sistemas de monitoreo en producción permitiendo ajustar óptimamente en la entidad.	El informe incorpora un cuadro que condensa la información de la encuesta realizada a cabo en el estudio. También se subraya que en este proyecto se ha optado por utilizar entrevistas como un método de recolección de datos esenciales para profundizar en la comprensión de los principales obstáculos. en la aplicación de un sistema de producción basado en la estructura de LEAN, así como las limitaciones en la aplicación de sistemas de control de producción con el	La vinculación entre los dos temas es importante, ya que muestra cómo la filosofía LEAN puede ser aplicada a diferentes áreas de la gestión empresarial, y cómo los sistemas de control de producción pueden ayudar a implementar la filosofía LEAN de manera efectiva.

---

---

				enfoque pull (o de atracción) y Push.	
José Rafael Cortés Rodríguez	2023. España	LEAN Management y Hoshin Kanri: Impactos en el desempeño en el desempeño estratégico y operativo	Enriquecer el cuerpo de conocimiento teórico mediante el enfoque de estudio de caso, con el propósito de evidenciar la relación positiva entre Hoshin Kanri, LEAN Management y la teoría de las Capacidades Dinámicas. Además, se busca demostrar los efectos operativos, organizacionales y culturales de esta relación.	La investigación persigue la ampliación del conocimiento teórico utilizando un método basado en estudios de caso. El objetivo es establecer de manera concluyente la evaluación positiva entre el conocimiento tácito (HK), la gestión del conocimiento (LM) y la teoría de comunidades de práctica (CD). Se procura evidenciar cómo esta relación afecta los aspectos operativos, organizativos y culturales en un contexto específico.	El enlace entre ambos temas se centra en la filosofía LEAN. que comprenden la reducción de desperdicios, la mejora de la calidad, la disminución de los costos y el aumento de la satisfacción del cliente. En el caso del estudio LEAN Management y Hoshin Kanri: Impactos en el desempeño estratégico y operativo, se investiga de qué manera la filosofía LEAN incide en el rendimiento tanto estratégico como operativo de las empresas.

---

*Nota: Revisión Propia.*

Estos trabajos de investigación demuestran el interés por desarrollar metodologías de gestión de proyectos que sean eficientes y eficaces en la industria criogénica.

No obstante, a pesar de los beneficios ampliamente reconocidos de la filosofía LEAN en la gestión de proyectos, se plantean desafíos específicos en la industria criogénica que requieren una adaptación precisa de esta metodología. Entre estos desafíos se incluye la complejidad inherente a los proyectos criogénicos, la imperativa necesidad de garantizar la seguridad en entornos extremadamente fríos y la vital importancia de mantener estándares de calidad excepcional en la producción de gases criogénicos.

## **2.2. Marco Teórico.**

### ***2.2.1. Filosofía LEAN.***

También conocida como LEAN Manufacturing o simplemente LEAN, esta metodología de gestión y producción se originó en la industria automotriz de Japón, especialmente en Toyota durante los años 50 (Womack et al., 1990). Esta filosofía pone énfasis en la mejora continua de la eficiencia y en la reducción del desperdicio dentro de los procesos. Su objetivo es optimizar tanto la calidad de productos y servicios como disminuir costos, además de responder más ágilmente a las demandas del cliente.

En el marco del enfoque LEAN, se establece que cualquier elemento que no contribuya al valor del producto o servicio final es considerado desperdicio y debe ser suprimido. Se reconocen ocho categorías de desperdicio: producción excedente, tiempos de mora, traslado redundante, procesos ineficientes, acumulación de stock, operaciones improductivas, productos de baja calidad y la subutilización de capacidades (Ohno, 1988).

Según lo expuesto por Moyano Fuentes y Sacristán Díaz (2011), los principios básicos del enfoque LEAN fueron inicialmente establecidos por los autores que introdujeron el término: Krafcik (1988), Womack et al. (1990) y Womack junto a Jones (1996). En su libro "Pensamiento

LEAN", Womack y Jones (1996) condensan la esencia del LEAN en cinco principios fundamentales, los cuales han sido analizados anteriormente:

1. Establecer el valor.
2. Identificar el flujo: Reconocer la cadena de valor.
3. Optimizar el flujo del valor: Minimizar las interrupciones en la cadena de valor.
4. Permitir que los clientes capturen el valor.
5. Buscar constantemente la perfección: Continuar la búsqueda de la perfección de forma constante.

La filosofía LEAN ha encontrado una amplia aceptación en múltiples industrias y sectores, evidenciando su capacidad para disminuir costos, incrementar la productividad y elevar la calidad de productos y servicios (Shah & Ward, 2003).

### ***2.2.2. Gestión de proyectos.***

La gestión de proyectos es una técnica estructurada y minuciosa que exige la aplicación de conocimientos, herramientas, habilidades y técnicas con el fin de desarrollar las actividades de manera eficiente y eficaz. Esto incluye la definición de metas precisas, además, asigna recursos de forma estratégica, planificación, administración de los riesgos y control constante para garantizar que el proyecto culmine dentro de los límites determinados en el tiempo, costo y calidad (PMI, 2021).

Según afirman Lledó P. et al. (2006), una de las características básicas de los proyectos es que son temporales, a diferencia de lo que se vive en una situación de consumo inmediato. Se necesita una gran cantidad de tiempo para la implementación de un proyecto. Esta visión temporal del proyecto sugiere que debemos considerar los proyectos como procesos: como una secuencia de eventos donde muchos ocurren simultáneamente durante su desarrollo.

Los proyectos en el contexto del desarrollo se enfocan en lograr resultados tangibles que contribuyan al avance socioeconómico de una nación o una zona específica (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016). Estos proyectos se destacan por la participación de múltiples partes interesadas y, al mismo tiempo, incorporan conceptos como la sostenibilidad y beneficios sociales a largo plazo.

### **2.2.3. Industria criogénica.**

La industria criogénica es un sector que se enfoca en la producción, manipulación y aplicación de temperaturas gélidas, muy próximas al cero absoluto ( $-273.15^{\circ}\text{C}$ ), para diversas aplicaciones, como la refrigeración, la medicina y la investigación científica.

Las plantas de separación criogénica del aire es una instalación química que utiliza la licuefacción y destilación para la separación de los elementos de aire. Estas plantas funcionan a temperaturas profundamente bajas conocidas como temperaturas criogénicas, para la conversión del aire en líquido. Mediante el proceso de destilación fraccionada, los diferentes gases, como el oxígeno, argón y nitrógeno, se separan y purifican. Este proceso es esencial para la producción a gran escala de gases médicos e industriales.

La destilación criogénica es un método esencial para la obtención de gases como el argón, oxígeno y nitrógeno superando a ( $>100 \text{ Tm/día}$ ). Este proceso es útil cuando se necesita oxígeno con una pureza alta, con concentraciones elevadas al 95%, o si se requiere argón. La aplicación de esta técnica resulta en la producción de los gases ya sea en estado gaseoso o líquido para las adaptaciones necesarias de las industrias (Vila-Serrano et al, 2001).

Según Martínez (2017), la destilación, entendida como un método para separar sustancias, se fundamenta en el proceso de licuefacción de gases. Este procedimiento implica que los gases experimentan una expansión tras perder calor. Siguiendo este principio, cuando un gas comprimido es enfriado a temperatura ambiente mediante agua refrigerante ( $20^{\circ}\text{C}$ ) y luego se expande a través de una turbina, puede alcanzar temperaturas significativamente bajas.

Los procesos criogénicos están basados en la compresión del aire y su posterior enfriamiento, esta licuefacción es esencial para llevar a cabo la destilación criogénica, que se basa en el principio de que cada componente puro del aire se convierte en líquido a temperaturas distintas. La separación de los productos deseados se realiza en una columna de destilación con varias etapas.

Dado que las temperaturas son muy bajas, es necesario que los equipos, como la columna de destilación y los intercambiadores de calor, estén protegidos contra la transferencia de calor desde el entorno. Juntando la operatividad, regeneración y la subida y bajada de presión el

proceso de purificación mediante adsorción queda establecido en cuatro tiempos, partiendo de un absorbedor, limpio y despresurizado (Cerrada Martínez, 2017). En la práctica, estos componentes se encuentran en recintos aislados con múltiples capas de material aislante térmico.

#### **2.2.4. Investigación y estudios previos.**

Moyano Fuentes y Sacristán Díaz (2011) sostienen que los fundamentos primordiales del LEAN fueron delineados por quienes introdujeron el concepto: Krafcik (1988), Womack et al. (1990) y Womack y Jones (1996). En su obra "Pensamiento LEAN", Womack y Jones (1996) sistematizan la esencia del enfoque LEAN a través de los cinco principios fundamentales previamente examinados.:

1. Definir valor.
2. Identificar el flujo: Identificar la cadena de valor.
3. Optimizar el flujo del valor: evitar las interrupciones en el flujo de valor.
4. Permitir que los clientes extraigan el valor.
5. Buscar permanentemente la perfección: Inicie la búsqueda de la perfección de nuevo.

La filosofía LEAN ha sido un amplio tema de estudio, lo que ha conllevado a crear numerosos documentos de suma importancia que estudian los principios fundamentales con mayor profundidad. Además, los nuevos principios de apoyo se enriquecen en este enfoque, tal como se detalla en la tabla 2.

#### **Tabla 2**

*Principios de la Filosofía LEAN.*

Naturaleza de los principios	Principios	Autores en desarrollo (básico) o proponiendo (nuevo) dichos principios
------------------------------	------------	--

	(1) Definir el valor	Cusumano (1994), Richards (1996), Soriano-Meier and Forrester (2002).
	(2) Identificar el flujo: Identificar la cadena de valor.	Cusumano (1994), Karlsson and Ahlström (1996), Richards (1996), Soriano-Meier and Forrester (2002) and Suzuki (2004).
Bases fundamentales (Womack et al., 1990; Womack & Jones, 1996)	(3) Optimizar el flujo del valor: evitar las interrupciones en el flujo de valor.	Cusumano (1994), Karlsson and Ahlström (1996), Richards (1996), Soriano-Meier and Forrester (2002), Suzuki (2004), Shah and Ward (2007).
	(4) Permitir que los clientes extraigan el valor.	Cusumano (1994), Karlsson and Ahlström (1996), Richards (1996), Soriano-Meier and Forrester (2002) and Suzuki (2004).
	(5) Buscar permanentemente la perfección: Inicie la búsqueda de la perfección de nuevo.	Cusumano (1994), Karlsson and Ahlström (1996), Richards (1996), Soriano-Meier and Forrester (2002) and Suzuki (2004).
	Compromiso	
Aspectos complementarios considerados en el estudio	Administración Respeto por el personal Involucrar a la cadena de suministro (proveedores) en la gestión.	Emiliani (2007a, b) Shah and Ward (2007)

*Nota:* Elaboración Propia.

Los cinco principios de la filosofía LEAN han sido bien investigados y, hasta 2007, la atención se ha concentrado en gestionar las operaciones internas y en lograr los objetivos impartidos con la Producción LEAN.

En este sentido, Cusumano (1994) identifica varias prácticas clave que considera necesarias para realizar los objetivos de calidad, productividad y flexibilidad en un sistema de Producción LEAN. Él categoriza estos elementos como los fundamentos de los Principios LEAN y los organiza de acuerdo con su impacto en el proceso de producción o producto.

Otros, como Richards (1996) y Karlsson y Ahlström (1996), adoptan otra postura al seleccionar un número limitado de características para organizar el principio detrás del concepto LEAN.

Soriano-Meier y Forrester (2002) incluyen un componente en su investigación basado en el compromiso de gestión de Karlsson y Ahlström (1996) en el modelo. Este método está relacionado con el trabajo de Zayko et al. (1997), que, después de estudiar la implantación de este modelo en varios sectores, reconoció que uno de los mayores obstáculos para la implementación de la filosofía LEAN es, específicamente, la falta de compromiso de la alta dirección con respecto a los beneficios que ofrece esta metodología.

El enfoque se concentra en la cadena de valor y la mejora de procesos, integrando dos principios LEAN importantes: Just-in-Time (JIT) y la Organización del Trabajo Japonés (JWO). Estos enfoques están destinados a optimizar, por ejemplo, la productividad, los plazos de entrega, los costos y la gama de productos. Además, tal procedimiento también puede contribuir a la calidad del producto al mejorar las habilidades de los trabajadores (Suzuki 2004).

La investigación tiene un propósito es dilucidar todos los elementos que integran en el sistema LEAN a partir de una medida global del desempeño. Los hallazgos de Shah y Ward (2007), quienes pudieron identificar diez puntos clave que están vinculados con el sistema. La mayoría de estos aspectos se basan en las características internas de la entidad, incluyendo la gestión de relaciones con los diferentes proveedores y participación de los clientes, profundizando en la filosofía LEAN. Para Emiliani (2007a, 2007b), la relevancia del respeto de las personas como un aspecto principal, a menudo subestimando en la implementación del

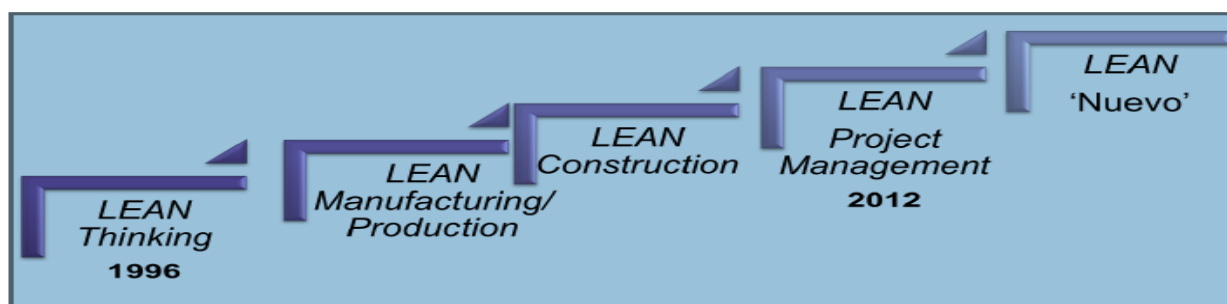
sistema. Este principio no tiene que ser obstaculizado, al contrario, debe ser la inspiración que comprende totalmente mediante la aplicación de la práctica del día.

### 2.2.5. Metodologías LEAN aplicadas a proyectos industriales

La filosofía ha trascendido desde su aplicación tradicional hasta la extensión de su influencia en los diversos campos como se puede verificar en la figura 1. Este cambio hace énfasis en la evolución de los principios filosóficos son aplicados dando lugar a un enfoque estrictamente técnico a un conjunto más amplio de áreas como la gestión de proyectos.

#### Figura 1

*La filosofía LEAN en diferentes sectores económicos*



*Nota:* Adaptado de “La filosofía LEAN aplicada en Gerencia de proyectos” (p. 28), por S. Valencia, 2013, Universidad Nacional de Colombia.

#### 2.2.5.1. LEAN Manufacturing / Production.

Conforme a la investigación de (Womack y Jones, 2006) citada por (Sánchez, Palacios y Prida, 2008), esta filosofía engloba una serie de técnicas de manufactura que buscan optimizar los procesos productivos al minimizar cualquier tipo de desperdicio. Por otro lado, (Garay, Cicedo y Cadavid, 2009) definen el LEAN Manufacturing como una filosofía empresarial contemporánea centrada en la reducción del desperdicio en las operaciones, con el objetivo de hacer que sean lo

más eficientes posible. Esta metodología se presenta como una herramienta sistémica que genera resultados significativos en la productividad general de la empresa.

Manotas Duque y Rivera Cadavid (2007), sustenta que LEAN Manufacturing tuvo su origen en “Toyota”, satisfaciendo las necesidades dentro del mercado limitado y en algunos casos restringido en la economía. Este concepto fue examinado y confirmado para su aplicación en las industrias del sector automotriz y en la producción.

#### **2.2.5.2. LEAN Construction.**

Cuando se adopta la filosofía de producción en el ámbito de la construcción basada en LEAN Production, un elemento esencial de la Construcción LEAN requiere una nueva interpretación del concepto de producción dentro de esta industria. Esto conlleva una revisión del modelo tradicional de conversión. En términos generales, el modelo convencionalmente aceptado representa un proceso productivo donde las materias primas o insumos son transformados en productos finales; este proceso a menudo es visto como opaco o como una "caja negra". La implementación de este enfoque permite organizar y secuenciar las actividades constructivas en diversas etapas a lo largo del ciclo vital de un proyecto, facilitando así el desarrollo hacia prácticas sostenibles desde una perspectiva alineada con los principios LEAN (Azharul & Saviz, 2011).

Conforme a la investigación de (González, Martínez & Da Fonseca, 2009), uno de los aspectos clave de la Construcción LEAN implica una reevaluación de la concepción tradicional de la producción en la industria de la construcción. Esto conlleva una revisión del modelo convencional de conversión, que en esencia representa el proceso de producción en el que las materias primas o insumos se transforman en productos finales, tratando esta transformación como un proceso enigmático o una "caja negra".

Dado que la Construcción LEAN es un proceso orientado a proyectos, se simplifica la aplicación de los principios LEAN, conforme a la definición de Ballard (2000) citada por (Azharul & Saviz, 2011). La Construcción LEAN se enfoca en la minimización de la variabilidad en diversos aspectos, como la calidad del producto y la eficiencia en el tiempo de respuesta, así como en la gestión de las variaciones que surgen en el proyecto. La reducción de la variabilidad

en cada proyecto representa uno de los métodos esenciales de la implementación de LEAN Construction, y esta noción se emplea de manera significativa en la normalización y gestión de proyectos LEAN.

Para llevar a cabo de manera precisa la planificación secuencial óptima de un proyecto de construcción o edificación, es esencial la implementación de herramientas cuantitativas. Esto implica la utilización de algoritmos y software diseñados para abordar las características específicas de la industria de la construcción. A pesar de los notables avances en la programación y planificación eficiente de la producción en las últimas décadas, estas mejoras no han sido completamente incorporadas en los programas comerciales, y mucho menos han tenido en cuenta las particularidades especiales de los procesos constructivos, el enfoque LEAN Construction y el sistema LPS (Sistema de Control de la Producción del Último Planificador). (Benlloch, Tienda, Romano y Doria Gil, 2011)

### **2.2.5.3. LEAN Project Management.**

El concepto de “Gestión de Proyectos LEAN” se basa en la filosofía de producción ajustada, específicamente aplicada al sector construcción, como indican Inman y Milosevic (1999), según lo citado por Azharul y Saviz (2011). Estos autores enfatizan que la normalización consiste en estandarizar las prácticas empleadas durante la ejecución de proyectos integrados. La Gestión de Proyectos LEAN tiene sus raíces en los principios del enfoque LEAN y comparte muchas ideas esenciales con ellos. Sin embargo, su principal meta es maximizar el valor aportado a un proyecto mientras minimiza al máximo cualquier forma de desperdicio.

Según la visión de Lledó P., Rivarola G., Mecaru R. y Cucchi D. (2006), el objetivo del enfoque LEAN es optimizar la eficiencia en la gestión de proyectos, considerando todas las etapas involucradas y adaptando los principios generales de administración a las particularidades inherentes a los proyectos, que se distinguen por tener un comienzo y un cierre claramente establecidos.

## 2.3. Marco Conceptual.

El enfoque LEAN representa una mentalidad en relación a los proyectos, que puede ser considerada de manera positiva como una búsqueda constante de la excelencia en los proyectos o, desde una perspectiva negativa, como una continua sospecha de la existencia de desperdicios en los proyectos. Otra forma de concebirlo es como una "tolerancia cero hacia los desperdicios", en la que se busca su eliminación sin contemplaciones.

Esta mentalidad acerca de la eficiencia en la gestión de proyectos se ha convertido en una auténtica filosofía, que se basa en cinco principios fundamentales:

- El valor, que implica definir el valor desde la perspectiva del cliente.
- Identificar el flujo del valor.
- Optimizar el flujo del valor.
- Tirar el flujo de valor, permitiendo que el cliente extraiga el valor.
- La búsqueda constante de la perfección.

### *2.3.1. Principio 1 – El valor, definir el valor desde la perspectiva cliente.*

El fundamento esencial del pensamiento LEAN se centra en el concepto de "valor", el cual solo puede ser definido por el consumidor final y adquiere significado cuando se relaciona con un producto específico que satisface sus necesidades a un precio determinado y en un momento concreto. La organización crea este valor, y su existencia radica en satisfacer al cliente.

En concordancia con esto, el pensamiento LEAN categoriza las actividades que no agregan valor en dos tipos:

- Desperdicio tipo 1, actividad indispensable que aporta valor parcial e incrementa el costo del proyecto.
- Desperdicio tipo 2, carece de valor total para el cliente y debe ser suprimido.

El objetivo principal del pensamiento LEAN es minimizar la presencia de desperdicios en el proceso de manera efectiva.

De acuerdo con Jones y Womack (2012), la mayoría de las empresas tradicionales establecen sus precios de venta tomando como referencia lo que creen que el mercado está dispuesto a pagar. A partir de ese punto, calculan los costos necesarios para asegurar un margen de beneficio adecuado. Por otro lado, las iniciativas LEAN toman un enfoque diferente al analizar el conjunto de precios y características que las empresas tradicionales ofrecen a los consumidores y se plantean cuántos costos pueden eliminarse a través de una implementación completa de métodos LEAN.

El costo meta para el desarrollo de un producto o servicio se convierte en un costo libre de desperdicio una vez que se han eliminado los pasos innecesarios y se ha logrado que el valor fluya de manera efectiva. Cuando se establece un costo objetivo para un producto en particular, es fundamental examinar minuciosamente cada uno de los pasos en el proceso de desarrollo del producto. Este enfoque es crucial para alcanzar el ambicioso objetivo de costos (Jones & Womack, 2012).

### ***2.3.2. Principio 2 – Identificar el flujo del valor.***

El proceso completo consiste en todas las actividades requeridas para ser ejecutadas por las tres tareas fundamentales que llevan a la entrega del producto o servicio final al cliente. Estas tareas son:

- Solución de problemas, que comienza en la etapa de concepción, continúa en el diseño detallado y la ingeniería, y llega hasta el lanzamiento de la producción.
- Gestión de la información, que se extiende desde la recepción del pedido hasta la entrega, involucrando una programación detallada.
- Transformación física, que abarca la ejecución de las etapas en la prestación del servicio, incluyendo los procesos desde la materia prima hasta la obtención del producto final entregado al cliente. (Jones & Womack, 2012).

La opción LEAN implica una redefinición de las funciones y áreas, así como de los procesos en la organización, de manera que puedan contribuir de manera efectiva a la generación de valor y satisfacer las necesidades genuinas de los empleados en todos los puntos del flujo. Esto implica que sea de interés para los empleados promover el flujo del valor. Lograr esto no solo

requiere implementar una iniciativa LEAN para cada producto, sino también implica la reevaluación de la estructura organizativa, las funciones tradicionales y las posiciones, así como la formulación de una estrategia LEAN (Jones & Womack, 2012).

### ***2.3.3. Principio 3 – Optimizar el flujo de valor.***

Según lo señalado por Jones y Womack (2012), este concepto es aplicable a una amplia gama de actividades, ya que la cantidad de recursos humanos, tiempo, espacio, herramientas y materiales necesarios para desarrollar y entregar un producto o servicio específico generalmente puede disminuir significativamente en poco tiempo. A partir de este punto, es posible mantener un progreso constante para volver a reducir estos recursos a la mitad con el tiempo.

Las estrategias relacionadas con el flujo, según se describe en "Cómo lograr que el flujo fluya", se dividen en tres pasos una vez que se ha establecido el valor y se ha identificado el flujo completo de dicho valor:

- Inicialmente, es fundamental enfocarse en el producto o servicio en cuestión, como, por ejemplo, el diseño específico, el pedido particular y el producto mismo, ya sea un remedio, un viaje, una vivienda o una bicicleta, y no perder de vista este enfoque.
- El segundo paso, que posibilita el primero, consiste en obviar las restricciones y divisiones tradicionales entre puestos de trabajo, trayectorias profesionales y funciones (que generalmente se organizan en departamentos) con el fin de establecer una iniciativa LEAN que suprima todos los obstáculos que afectan al flujo continuo del producto o familia de productos.
- El tercer paso implica reconsiderar prácticas y herramientas específicas que eliminen cualquier retroceso en el flujo, desperdicios e interrupciones de cualquier tipo, con el propósito de permitir que el diseño, los pedidos y la producción del producto específico avancen de manera ininterrumpida.

De acuerdo con la perspectiva de Jones y Womack (2012), estas tres fases deben ser ejecutadas de manera simultánea. La mayoría de los directivos tiende a creer que la eficiencia exige que los procesos, como el diseño, los pedidos y la producción, atraviesen el sistema, y que una gestión eficaz implica prevenir variaciones en el desempeño de un complejo sistema que

abarca una amplia gama de productos. Sin embargo, la verdadera necesidad radica en desvincularse de ese sistema y comenzar desde cero sobre una nueva base.

#### **2.3.4. Principio 4 – Tirar el flujo de valor Pull. Permitir que el cliente extraiga el valor.**

Conforme a la investigación realizada por Lledó P., Rivarola G., Mecaru R., y Cucchi D. (2006), no se limita únicamente a la importancia de una adecuada definición del valor, la identificación de su flujo y su facilitación sin impedimentos, sino que también es esencial que el cliente pueda reconocer dicho valor y apropiárselo.

Bajo el concepto de Pull de Jones y Womack (2012), basado en una demanda específica del cliente inicia la producción, esta estrategia aparentemente simple, presenta un gran desafío práctico necesita un enfoque representativo para su implementación efectiva, es necesario los requerimientos del cliente real y ahí organizar las diferentes etapas de la cadena de valor en sentido inverso, asegurando que no se inicie la producción de ningún bien o servicio.

La aplicación del principio se fundamenta en:

- Establecer la creación de entregables dirigidos al cliente con el propósito de garantizar que estos entregables sean de un valor exacto según las necesidades del cliente. Los equipos de proyectos deben fomentar la participación del cliente en el proceso del proyecto para extraer valor de este.
- La implicación de los clientes en las fases de diseño e implementación del proyecto resulta en la ausencia de derroche, ya que se construye únicamente lo que el cliente requiere. De este modo, el cliente pasa a ser el controlador de los horarios y los cronogramas, determinando las actividades diarias que deben llevarse a cabo. A partir de esta colaboración, es posible estimar la demanda que se debe satisfacer en el mercado. (Lledó P., Rivarola G., Mecaru R., Cucchi D, (2006).

#### **2.3.5. Principio 5 – Buscar la perfección a través de la mejora continua.**

Siguiendo la perspectiva de Jones y Womack (2012), se podría afirmar que este principio final encapsula la filosofía fundamental de su enfoque: la constante búsqueda de la excelencia y la falta de tolerancia hacia los desperdicios.

A medida que las organizaciones avanzan en la definición precisa del valor y logran identificar de manera integral el flujo de valor, así como establecer un flujo constante en las etapas generadoras de valor para productos específicos, se facilita a los clientes la posibilidad de extraer (pull) valor directamente desde la empresa. Esto lleva a que los involucrados comprendan que no hay límites en su capacidad para reducir esfuerzos, tiempo, espacio, costos y errores. Como resultado, se ofrecen productos cada vez más alineados con las necesidades reales del cliente. Aunque alcanzar la perfección es considerado el quinto y último principio del pensamiento LEAN, se reconoce también que eliminar por completo todos los desperdicios resulta ser una tarea imposible (Jones & Womack, 2012).

Para implementar tanto la mejora drástica como la gradual, se requieren dos metodologías LEAN, como se detalla en el estudio realizado por Jones y Womack (2012):

- I. Para entender el concepto de perfección, los responsables del flujo de valor deben implementar los cuatro principios LEAN: la definición del valor, el mapeo del flujo de valor, la creación de un flujo continuo y la adopción de un sistema pull. El objetivo final es lograr una representación clara acerca de lo que implica la perfección, asegurando así que las metas de mejora sean comprensibles y alcanzables para todos los participantes en esta iniciativa. La perfección puede compararse con lo infinito: su concepción y consecución son físicamente inalcanzables; sin embargo, el esfuerzo por acercarse a ella proporciona la inspiración y orientación necesarias durante este proceso (Jones & Womack, 2012).
- II. Además de desarrollar una representación ideal mediante la implementación de tecnología adecuada y un equipo competente, los líderes deben elaborar un plan exhaustivo que detalle las acciones a seguir en el proceso. La esencia radica en formular una visión clara y reconocer dos o tres pasos fundamentales para su consecución, dejando los demás aspectos para ser abordados posteriormente. Esto no implica descartarlos; más bien, se debe aplicar el principio general de enfocarse en realizar una tarea a la vez, dedicando esfuerzo continuo hasta completarla. Este enfoque requiere llevar a cabo actividades de mejora con igual intensidad en todos los procesos involucrados, como son el diseño, la gestión de pedidos y la producción.

Es esencial que las políticas de la organización se implementen siguiendo la metodología LEAN. Para lograrlo, el equipo directivo debe establecer objetivos simples para facilitar la transición hacia una producción LEAN a gran escala. Deben seleccionar unos pocos proyectos clave para alcanzar estos objetivos, asignar las personas y los recursos necesarios para llevar a cabo estos proyectos y, finalmente, definir metas de mejora cuantitativas que se deben lograr en un plazo específico (Jones & Womack, 2012).

La premisa central es que la búsqueda de fuentes de ineficiencia no debe ser abandonada, dado que existen múltiples obstáculos que deben ser superados para establecer un entorno LEAN. Lograr la eliminación definitiva de cualquier forma de desperdicio en el flujo de valor resulta inviable a través de un único proyecto, ya que se trata de un proceso continuo donde siempre hay oportunidades para incrementar la eficiencia mediante los principios LEAN. En conclusión, adherirse a la filosofía del pensamiento LEAN, tal como lo expresan Lledó P., Rivarola G., Mecaru R. y Cucchi D. (2006): "Nunca se debe cesar en la búsqueda de la perfección".

#### **2.4. Marco Histórico.**

El método de LEAN Manufacturing está inspirada en el sistema de producción de la entidad "Toyota", es una estrategia para la optimización de los procesos empresariales con el fin de eliminar el desperdicio o actividades que añaden valor, es decir, es una mejora significativa de forma inmediata de la competitividad, rentabilidad y productividad. Este sistema alcanza resultados favorables sin adquirir inversiones sustanciales en tecnología, personal o equipos (Hassan & Ibarahim, 2018)

"LEAN Manufacturing" es un enfoque que se fundamenta en el sistema de producción desarrollado por Toyota. Esta metodología se centra en la reducción de desperdicios y actividades que no aportan valor, lo cual facilita obtener resultados inmediatos en términos de productividad, competitividad y rentabilidad para las empresas, sin requerir inversiones adicionales en maquinaria, recursos humanos o tecnología.

Según Pérez Rave (2011), "LEAN Manufacturing es una herramienta que se enfoca en la gestión de la producción basado en una serie de principios con la finalidad de mejorar

continuamente. Este sistema logra la optimización a través de disminuir aquello que se considere desperdicio, es decir, cualquier actividad o proceso que no genere valor al producto final” (pp. 396-408).

El pensamiento LEAN, es una filosofía de gestión que partió de la necesidad de recuperar la economía después de la “Segunda Guerra Mundial” en los países como Alemania y Japón, ha mostrado la adaptabilidad en los diferentes entornos industriales. Su formación se atribuye a “Toyota Motor Corporation” que desarrolló un sistema productivo para mejorar la eficiencia, productividad y competitividad, mediante la implementación exitosa de este sistema. Taiichi Ohno (1991), considera como una alternativa principal en la optimización de los procesos a nivel mundial.

LEAN que significa ajustado o ágil, se adapta a sistemas de producción para incrementar la capacidad de una empresa tiende a adaptarse con flexibilidad a las necesidades de los clientes. Este punto fue introducido por John Krafcik, quien uso para describir la “producción ajustada”, tomando en cuenta que se requiere un menor consumo de recursos en comparación con los modelos de producción en masa (Womack & Jones, 2005; Rajadell & Sánchez, 2010).

Tras el colapso del mercado de valores de 1929, Estados Unidos se enfrentó a una crisis de sobreproducción, donde la capacidad productiva de la industria superó de forma significativa la capacidad de consumo. Frente a esta situación, se implementó el fordismo como una solución estratégica. Este sistema fue impulsado por el control de la maquinaria que permitió absorber la producción acumulada y generar un mercado masivo mediante la producción en serie. En este punto el ritmo de trabajo dependía del movimiento de las máquinas y ya no de los trabajadores, lo que determinó las tareas y los tiempos de ejecución en cada operación (López, 2005).

El modelo de producción en masa, que experimentó una notable expansión después de la Segunda Guerra Mundial debido a la política exterior estadounidense orientada a estimular la demanda y estabilizar los mercados, comenzó a mostrar signos de agotamiento a fines de la década de 1960. Durante este período, se observó una disminución de la productividad y un incremento del capital fijo per cápita, lo que resultó en un descenso de la rentabilidad. Este deterioro evidenció que el sistema había alcanzado sus límites y requería una reestructuración

urgente para adaptarse a las nuevas condiciones económicas y productivas (Rajadell y Sánchez, 2010).

La producción es una de las áreas de mayor importancia en cualquier empresa debido a que es de las actividades que genera más costos:

Desde sus inicios, las entidades han buscado optimizar la rentabilidad mediante la producción. Con el transcurso del tiempo, se han desarrollado varias metodologías para alinear con esta necesidad, enfatizando el sistema LEAN Manufacturing, permitiendo mejorar la eficiencia de la empresa y la productividad en el área de producción implementando un proceso de mejora continua mediante diferentes herramientas estratégicas, lo que se ha obtenido como resultado significativo tras su implementación (Rajadell & Sánchez, 2010).

#### ***2.4.1. Eventos, avances o condiciones que han incluido en la investigación.***

Las empresas, ante los desafíos de mercados cada vez más competitivos, deben implementar nuevas estrategias de producción para asegurar su liderazgo. En este contexto, LEAN Manufacturing emerge como una alternativa viable, ofreciendo un conjunto de técnicas y herramientas que, cuando se aplican correctamente, mejoran la efectividad de los procesos (Alvarado et al., 2020).

En Ecuador, si bien el interés del método LEAN Manufacturing aumento considerablemente en la actualidad, su implementación aún consta con restricciones debido a la falta de conocimiento en varias organizaciones las cuales podrían beneficiarse de este sistema. Esto suma a que las empresas aplican esta herramienta de manera informal, sin sustento oficial en las direcciones del área de administración. La adopción de LEAN requiere un cambio total en la cultura desde la planta de producción hasta la línea de trabajo, ya que justifica el compromiso, colaboración y comunicación de la directiva de la entidad (Hassan & Ibrahim, 2018).

En múltiples sectores tanto industriales como de servicios, existen organizaciones que tienen como objetivo establecerse en su respectivo ámbito. En un mercado cada vez más competitivo, el valor agregado no radica únicamente en ser los primeros en lanzar productos o servicios, sino en hacerlo de manera efectiva y cumpliendo con diversos factores que contribuyen a ofrecer la mejor experiencia posible al cliente (Chacon & Rugel, 2018).

La estrategia planificada en las organizaciones han elegido por las diferentes metodologías que destacan a LEAN, que se enfoca en la eliminación de sobrantes, 5's que tiene el concepto de mantener un buen ambiente trabajo mediante la organización y limpieza del mismo, Kaizen, se concentra en mejorar continuamente, TPM, se orienta a incrementar la eficiencia de los equipos de trabajo, Six Sigma, se basa en la reducción de la variabilidad y defectos, mientras que la ISO en la calidad introduce los estándares necesarios para mantener y mejorar la misma. (Hassan & Ibrahim, 2018). Para Borda (2020), "frecuentemente, estas herramientas están interrelacionadas, ya que en el contexto del mejoramiento continuo es habitual encontrar varios de estos términos utilizados conjuntamente como metodologías relacionadas". Por otra parte, se encuentra la metodología LEAN, que se enfoca en la depuración y la eliminación de desperdicios como elementos clave para mejorar la agilidad de los procesos. La integración de LEAN en los sistemas de gestión de calidad permite aumentar la eficiencia y eficacia, logrando la eficacia operativa en las organizaciones que adoptan esta metodología y utilizan de manera correcta los recursos disponibles. En un mercado dinámico, no solo se busca llegar rápido, sino también de manera competitiva y con un mayor valor agregado para el cliente. Por lo tanto, es fundamental gestionar eficientemente las operaciones para optimizar costes y ofrecer un servicio de calidad.

Los ámbitos en los que se aplica actualmente el enfoque LEAN abarcan diversas industrias, incluyendo la gestión de la cadena de suministro (LEAN supply chain management), el sector de la construcción (LEAN Construction), así como LEAN Six Sigma y procesos administrativos bajo el término LEAN Office (Mancera, 2020).

De acuerdo con Arévalo (2015), los principios del enfoque LEAN se centran en la eliminación de desperdicios e identificación del valor desde la perspectiva del cliente. Es importante mapear todas las fases que pertenecen a un proceso para comprender el flujo de trabajo, además, el flujo continuo de información y materiales fomentando la mejora continua como una cultura. Esta implementación permite optimizar sus operaciones de manera metódica y eficiente.

#### ***2.4.2. Contexto histórico que afectó a la investigación e interpretación de posibles resultados.***

El enfoque LEAN, desarrollado desde la década de 1950, se ha orientado hacia la mejora continua y la excelencia en los procesos organizacionales mediante la eliminación de siete tipos

de desperdicios: movimientos innecesarios, sobreproducción, tiempos de espera prolongados, transporte ineficiente, procesos excesivos, exceso de inventario y defectos (Milutinović & Djekić, 2020). Por lo tanto, cualquier organización que diseñe sus procesos y estructura a partir de una perspectiva esbelta logrará resultados más efectivos.

Este modelo ha experimentado a lo largo del tiempo diversas modificaciones para ajustarse o especializarse en ciertos procesos. Un ejemplo de ello es LEAN Manufacturing, que se centra en la manufactura; LEAN Supply Chain Management, orientado hacia la gestión de la cadena de suministro; y LEAN Office, cuyos principios son aplicables a los procesos administrativos en distintas industrias. Estos representan solo algunos ejemplos (Mancera, 2020).

Las metodologías LEAN se fundamentan en la aplicación de diversas herramientas, que a menudo son empleadas conjuntamente para maximizar su impacto dentro de las organizaciones. Ejemplos de estas incluyen el mapa de la cadena de valor (VSM), que facilita la identificación detallada de todas las actividades que contribuyen al aumento del valor; 5S, orientado a fomentar el orden, la limpieza y una cultura organizacional adecuada (Paredes-Rodríguez et al., 2022); y Kaizen, utilizado como instrumento para el mejoramiento continuo mediante decisiones basadas en evidencia (Adeodu et al., 2021). Todas estas herramientas son altamente efectivas y, cuando se combinan conforme a las necesidades específicas de cada organización, pueden ser determinantes para lograr un éxito sostenido en los procesos de mejora.

## **2.5. Marco Contextual.**

Las organizaciones buscan mejorar su eficiencia para obtener ventajas competitivas y satisfacer las necesidades del consumidor. Por tanto, la adopción de una nueva cultura corporativa implica aprovechar los recursos disponibles para alcanzar este objetivo.

Ser competitivo implica no solo la habilidad de captar el interés de accionistas (capital económico), empleados (capital intelectual) y clientes (ventas), sino que también se ha vuelto más complejo debido a las crecientes exigencias de los consumidores en cuanto a calidad, precio y tiempos de respuesta. Asimismo, hay una demanda creciente por parte de la sociedad para que las organizaciones y sus líderes asuman mayores responsabilidades sociales (Cantú, 2011, p. 1).

La gestión de calidad es una práctica fundamental para muchas organizaciones, ya que contribuye a mejorar la eficiencia, reduce costos y aumenta la satisfacción del cliente (Smith, 2019). Al implementar una Metodología para la Gestión de Calidad, las organizaciones pueden identificar posibles deficiencias, errores o problemas en sus procesos y tomar medidas para corregirlos y prevenir su recurrencia (Cooper & White, 2016).

La metodología LEAN ha sido ampliamente implementada en múltiples industrias y sectores, evidenciando su efectividad para disminuir costos, incrementar la productividad y elevar la calidad de productos y servicios (Shah & Ward, 2003).

### ***2.5.1. Impacto en la optimización de recursos.***

La disminución de los residuos, la productividad y eficiencia dentro de los procesos productivos fue el requisito principal para las industrias en el siglo XX, ya que permite la reducción de cualquier merma que incremente el costo de los procesos y se ha convertido en una directriz, a pesar de que la reducción o erradicación no es necesario agregar un valor al cliente, pero si puede mantener y mejorar el proceso que permite agregar valor a la cadena de producción de las entidades y se reflejan en beneficios al cliente.

Rueda (2007) sostiene que la Manufactura Esbelta (LEAN) es un enfoque orientado a erradicar todo tipo de desperdicios relacionados con el tiempo, los materiales, la eficiencia y los procesos. Este método busca eliminar lo innecesario para aumentar tanto la capacidad como la productividad de las empresas, favoreciendo así su competitividad en el mercado objetivo. El propósito fundamental de LEAN Manufacturing consiste en implementar mejoras en diversos procesos mediante el análisis de la cadena de valor y la aplicación adecuada de mecanismos de calidad e indicadores macroeconómicos.

Rajadell y Sánchez (2010), sustentan que la mejora de la rentabilidad en base de la producción es una de las materias que ha permanecido como un legado dentro de las entidades desde su creación. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas herramientas para atender esta importante necesidad. LEAN Manufacturing es un sistema que optimiza la eficiencia empresarial mediante la mejora continua en el área de producción a través de la aplicación de

diferentes herramientas. Su implementación ha sido exitosa y ha generado resultados extraordinarios.

### ***2.5.2. Condiciones políticas relevantes.***

El sector industrial de Ecuador presenta bajos niveles de competitividad y productividad debido a la falta de innovación, conocimiento y valor agregado y al alto nivel de desperdicio de los insumos de producción y contaminación ambiental (MIPRO, 2017). A través, de la aplicación de las técnicas y metodologías dentro de las empresas se puede abordar los problemas y brindar una solución en estos sectores.

En la actualidad, domina un mercado cada vez más globalizado, hay que hacer énfasis en el incremento de la eficiencia en los procesos de producción, acrecentar los niveles de productividad, reducir costos y aumentar la rentabilidad, permitiendo una ventaja competitiva y sustentable, además, es importante mantener una estandarización con mejoras continuas.

El sistema de LEAN Manufacturing está basada en las personas, definiendo la optimización y mejora en los procesos de producción enfocándose en detectar y erradicar todo tipo de desechos, determinando como actividades que utilizan de forma estricta los recursos necesarios. Finalmente, la meta es la generación de una cultura estandarizada en base a la mejora en la labor conjunta y comunicación, siendo indispensable para adecuar este método en cada caso. La filosofía LEAN no da nada por sentado y busca continuamente nuevas formas de hacer las cosas de manera más ágil, flexible y económica (Hernández y Vizán, 2013).

En Iberoamérica, el enfoque de los sistemas productivos vinculados con LEAN ha desarrollado de forma considerable a países como México, España, Brasil y Chile. Mientras que, en Ecuador, este punto ha evolucionado en la última década, fundamentalmente ha dependido de la importación, como un modelo que ha sido viable, además, los precios de las divisas eran favorables. El crecimiento de la competitividad y crecimiento industrial esto se puede verificar en el informe Doing Business del Banco Mundial en el año 2016, que muestran un cambio de la dinámica productiva en el país (Banco Mundial, 2016).

Bajo esta perspectiva marca el contexto global para los diferentes países que se encuentran en desarrollo como Ecuador, es necesario la labor para consolidar el sector industrial en la práctica del sistema LEAN.

En el ámbito ecuatoriano, son escasas las empresas que logran implementar con éxito la metodología LEAN. Es fundamental mejorar la colaboración entre universidades, el gobierno y las organizaciones empresariales, ya que esta interacción influye en el desarrollo de modelos productivos competitivos (Howell, 2015). La academia debe ver más allá del proyecto tradicional como única base de aporte en el sector productivo, analizando y verificando herramientas que se consideren oportunas para las investigaciones universitarias y necesidad empresarial. Es fundamental que las instituciones de tercer nivel en Latinoamérica amplíen el impacto proporcionando las prácticas como un medio de soluciones que aborden los resultados de las bases académicas.

Según Hernández y Vizán (2013), sustentan que la adopción de la filosofía LEAN Manufacturing exige una crítica para que las diversas empresas mantengan la competitividad en el mercado, permitiendo la conversión en una necesidad planificada y estratégica.

La fabricación occidental ha sido principalmente una competitividad que depende de una modificación que oriente a la activación de LEAN. Esto requiere de proyectos estructurados y a largo plazo, que buscan probar el sistema adoptando medidas que fortalezcan la cultura de LEAN para generar las mejoras necesarias en los puntos fundamentales de la productividad, minimizando los costes, flexibilidad y participación del personal (López-Díez et al., 2011).

## **2.6. Marco Legal y Normativo.**

La industria criogénica en Ecuador, enfocada en la producción, almacenamiento y transporte de gases como el oxígeno, nitrógeno y argón, opera bajo un marco regulatorio que fomenta la seguridad, sostenibilidad y eficiencia energética. Compañías como Air Products Group - Indura Ecuador SA implementan normas internacionales (ISO 9001, 14001, 45001 y 50001) así como principios de gestión en materia de medio ambiente, salud y seguridad (EHS).

### ***2.6.1. Normativa Nacional Aplicable.***

#### **2.6.1.1. Seguridad y Salud Ocupacional.**

- Decreto Ejecutivo 255 – Normativa sobre Seguridad y Salud Laboral Modifica las disposiciones para alinearlas con las transformaciones tecnológicas y del ámbito laboral contemporáneo, reforzando el marco normativo en materia de seguridad y salud en el trabajo.
- Acuerdo Ministerial MDT-2023-053 – Actualiza los lineamientos técnicos de seguridad industrial para procesos de alta presión.
- NTE INEN-ISO 45001:2018 – Sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional.

#### **2.6.1.2. Manejo y Almacenamiento de Gases Criogénicos.**

- NTE INEN 2049:2013 – Establece los métodos para la inspección y prueba de cilindros de gases.
- NTE INEN 2343:2013 – Establece los procedimientos para la inspección y evaluación de cilindros de gas.
- Reglamento de Buenas Prácticas de Manufactura (ARCSA) – Supervisa la pureza, la trazabilidad y las condiciones sanitarias de los gases medicinales.

#### **2.6.1.3. Normativa Ambiental y Energética.**

- Ley de Gestión Ambiental (Ley N.º 37) – Marco general para la regulación de emisiones, descargas y desechos industriales.
- Acuerdo MAATE 2023-053 – La normativa regula la administración de residuos peligrosos y las emisiones generadas en los procesos industriales.
- ISO 14001:2015 – Sistemas de gestión ambiental.
- ISO 50001:2018 – Gestión de la energía y eficiencia en plantas criogénicas.

### ***2.6.2. Referencia Internacional y Estándares Corporativos.***

El informe de sostenibilidad de Air Products subraya su adhesión a estándares internacionales tales como ISO 14064, GRI, SASB y TCFD. Asimismo, destaca la adopción del

Sistema de Gestión EHS, que es comparable a las normas ISO 14001 y 45001, el cual se aplica a nivel global para asegurar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad en el ámbito industrial.

**Tabla 3**

*Normas clave aplicables.*

<b>Norma</b>	<b>Contenido principal</b>	<b>Entidad reguladora</b>
<b>NTE INEN 2049:2013</b>	Ensayos y mantenimiento de cilindros para gases criogénicos.	INEN
<b>NTE INEN 2343:2013</b>	Transporte y almacenamiento de gases industriales y medicinales.  Movilización y conservación de gases para uso industrial y médico.	INEN
<b>Decreto Ejecutivo 255</b>	Reglamento general sobre la seguridad industrial y la salud en el trabajo.	Ministerio de Trabajo
<b>Acuerdo MAATE 2023-053</b>	Control de emisiones, gestión de residuos peligrosos y obtención de licencias ambientales.	MAATE
<b>Reglamento BPM Gases Medicinales</b>	Producción y supervisión de gases para uso médico.	ARCSA
<b>ISO 14001, 45001, 50001</b>	Gestión del medio ambiente, seguridad en el trabajo y optimización del consumo energético.	ISO

*Nota:* Elaboración Propia.

### **Conclusión:**

La gestión de proyectos en la industria criogénica representa un desafío de alta complejidad que demanda precisión técnica, trabajo interdisciplinario y una visión estratégica orientada hacia la sostenibilidad. En este escenario, la aplicación de un enfoque de gestión esbelta se configura como una alternativa transformadora capaz de convertir los procesos convencionales en sistemas más eficientes, flexibles y coherentes con las exigencias actuales de productividad, calidad y competitividad. Los resultados de la investigación demuestran que la adopción de estos

principios no solo contribuye a reducir desperdicios y tiempos improductivos, sino que también fortalece la cultura organizacional al fomentar la mejora continua y la participación activa de los equipos de trabajo.

El análisis teórico desarrollado en este capítulo evidencia que la gestión de proyectos bajo este paradigma trasciende el uso de simples herramientas técnicas. Se trata, más bien, de una forma de pensar y actuar que promueve la excelencia operativa y la innovación dentro de los procesos industriales. En un entorno como el criogénico, donde la exactitud, la seguridad y el control térmico son esenciales, la incorporación de estas prácticas permite alcanzar una mayor confiabilidad en los sistemas, optimizar el manejo de variables críticas y reducir de manera significativa los riesgos asociados a la operación. La búsqueda de un flujo continuo, el enfoque en el valor desde la perspectiva del cliente y la eliminación de toda actividad que no aporte beneficios se consolidan como los pilares de una gestión moderna y sostenible.

De igual manera, el estudio resalta la importancia de adaptar este enfoque a las condiciones particulares de cada entorno productivo. En el caso ecuatoriano, las industrias enfrentan desafíos vinculados con la limitación de recursos, la capacitación del talento humano y la madurez de los sistemas de gestión. Por esta razón, se vuelve imprescindible desarrollar metodologías ajustadas al contexto nacional, capaces de integrar las normativas locales, las políticas ambientales y los estándares de seguridad industrial dentro de un marco metodológico coherente y aplicable.

### **CAPÍTULO III. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación.**

Se pudo identificar la gestión de proyectos en la industria criogénica como un reto complejo en sus procesos. Para hacer frente a la problemática, se propone la adaptación del sistema LEAN, ya que esta metodología demostró ser funcional para minimizar los desperdicios e incrementar la productividad en cada fase del proyecto (Ramírez, 2023).

El método mixto resalta como una estrategia más adecuada para indagar este tema, permitiendo un conjunto equilibrado de las técnicas cualitativas y cuantitativas. Esta vinculación coopera con el fin de concientizar y enriquecer al objeto de estudio, que en este caso se basa en “Indura Ecuador”, valorando el sistema LEAN y el efecto en su adaptación al rendimiento de los proyectos.

Para esta investigación se selecciona una metodología que se orienta a brindar soluciones concretas y prácticas que sean apropiadas a la industria criogénica. Asimismo, desarrolla una investigación exploratoria con el fin de distinguir las áreas de prácticas en gestión de proyectos y aquellas que son susceptibles de mejora. Este conjunto de enfoques permite detallar el estado actual del área de gestión de proyectos, revelando nuevas alternativas y perspectivas para optimizar dichos procesos.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque descriptivo y explicativo, orientado a examinar con profundidad los procesos que conforman la gestión operativa y administrativa de Indura Ecuador. Este análisis permite identificar de manera sistemática las fortalezas, oportunidades de mejora y limitaciones que inciden en el desempeño productivo. Para alcanzar dicho propósito, se emplean diversas herramientas metodológicas y técnicas de recolección de datos que facilitan una comprensión integral del entorno organizacional. La combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos posibilita establecer un diagnóstico preciso y proponer estrategias fundamentadas que contribuyan a optimizar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de la industria criogénica.

### 3.1. Cuadro Operacionalización de variables.

**Tabla 4**

*Operacionalización de variables matriz de consistencia científica metodológica.*

<b>Operacionalización de Variables</b>						
<b>Tema:</b> Metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos productivos en la industria criogénica, de la empresa Indura Ecuador en el año 2025.						
<b>Pregunta de investigación</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables estudiadas</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
¿Qué elementos debe considerar una metodología de gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía de LEAN, en una empresa de	Proponer una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos	1. Determinar los fundamentos teóricos y referenciales sobre la gestión de proyectos en fase productiva y la aplicación de la filosofía LEAN en	Si se propone una metodología de gestión de proyectos en fase productiva basada en la filosofía LEAN, se puede mejorar significativamente la eficiencia operativa	<b>Variable independiente:</b> La implementación de la metodología LEAN en la gestión de proyectos en fase	<b>Identificación y creación de valor:</b> Definir claramente el valor desde la perspectiva del cliente y de las partes interesadas, asegurando que todas las actividades del proyecto aporten valor tangible y medible.	Índice de valor ganado: mide porcentaje de trabajo completado respecto al plan, reflejando valor tangible y real aportado.

producción criogénica a fin mejorar la eficiencia de los procesos productivos?	productivos en la industria criogénica de la empresa Indura Ecuador.	<p>el contexto industrial, con énfasis en la industria criogénica.</p> <p><b>2. Identificar los procesos críticos de la cadena de valor de la empresa Indura Ecuador, relacionados con la producción criogénica, que inciden en la eficiencia operativa.</b></p> <p><b>3. Diagnosticar la situación actual de la gestión de proyectos en fase productiva de Indura Ecuador, identificando brechas y oportunidades de mejora desde el enfoque LEAN.</b></p>	y reducir los desperdicios en los procesos de la industria criogénica, específicamente en la empresa Indura Ecuador.	productiva. La implementación de la metodología LEAN en la gestión de proyectos en fase productiva.	<p><b>Mapeo y optimización del flujo de valor:</b> Diagramar el flujo de trabajo actual y el ideal para identificar y eliminar desperdicios, facilitando un flujo continuo y eficiente de las actividades del proyecto.</p> <hr/> <p><b>Gestión del flujo y reducción de variabilidad:</b> Implementar sistemas que promuevan un flujo estable y continuo de las tareas, minimizando retrasos y variaciones que afectan la producción.</p> <hr/> <p><b>Mejora continua:</b> Incorporar ciclos iterativos de evaluación y ajuste para la optimización constante de procesos, promoviendo la adaptabilidad y agilidad en la gestión productiva del proyecto.</p> <hr/> <p><b>Integración estratégica y operativa:</b> Alinear la gestión LEAN con la</p>	<p>Reducción del tiempo de ciclo: mide el porcentaje de disminución en la duración total del flujo de valor, eliminando desperdicios y retrasos evidentes.</p> <hr/> <p>Tasa de cumplimiento del flujo continuo: porcentaje de tareas ejecutadas sin interrupciones, optimizando procesos y minimizando variabilidades</p> <hr/> <p>Porcentaje de acciones de mejora implementadas: mide la evaluación y ajustes aplicados para optimizar procesos continuamente.</p> <hr/> <p>Porcentaje de mejoras implementadas: mide acciones iterativas</p>
--	--	--	--	---	--	--

4. Diseñar una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, adaptada a la realidad organizacional y a los procesos productivos de la empresa Indura Ecuador.

5. Validar la metodología propuesta mediante la valoración de expertos, para determinar su pertinencia, aplicabilidad y contribución a la mejora de la eficiencia de los procesos productivos.

estrategia organizacional, completadas para facilitando la sincronización optimizar procesos, de recursos, la toma adaptándose ágilmente descentralizada de a necesidades decisiones y la entrega cambiantes. incremental de resultados.

<b>Variable(s) dependiente(s):</b>	<b>Desempeño financiero:</b>	Rentabilidad sobre inversión: Porcentaje de ganancias netas generadas respecto al costo total invertido en proyectos criogénicos, indicando eficiencia financiera.
Los resultados y beneficios obtenidos en la gestión de proyectos en la industria criogénica, específicamente en el caso de Indura Ecuador.	<b>Cumplimiento de plazos:</b>	Tasa de cumplimiento de plazos: Porcentaje de tareas entregadas en tiempo respecto al total, evidencia cumplimiento cronograma eficaz.
	<b>Calidad operativa y técnica:</b>	Porcentaje de conformidad técnica: Mide la adhesión a especificaciones, reducción de defectos y mejora en los estándares de cumplimiento de

seguridad y normativas aplicadas.	normas de seguridad establecidas.
<b>Eficiencia en recursos:</b> optimización en el uso de materiales, energía, insumos criogénicos, y capacidad de almacenamiento y transporte.	Índice de eficiencia en uso de recursos: medio porcentaje de materiales, energía y almacenamiento optimizados durante el proceso criogénico.
<b>Sostenibilidad y medio ambiente:</b> reducción de pérdidas por evaporación, control de emisiones y aplicación de tecnologías que minimicen el impacto ambiental.	Porcentaje de reducción de pérdidas por evaporación: mide la disminución efectiva de emisiones y pérdidas, protegiendo el entorno ambiental sostenible.
<b>Satisfacción de clientes y partes interesadas:</b> niveles de aceptación, fidelización y respuesta a requerimientos específicos del mercado criogénico.	Índice de satisfacción del cliente (CSAT): mide porcentaje de clientes satisfechos con productos y servicios específicos en el mercado criogénico.

*Nota:* Esta tabla detalla las variables de estudio, desglosadas en dimensiones e indicadores específicos, y muestra cómo cada elemento se relaciona teóricamente y operativamente con los componentes de un estudio.

### **3.2. Diseño metodológico.**

El diseño metodológico de esta investigación se configura como una estructura sistemática que integra métodos, técnicas e instrumentos seleccionados para garantizar el rigor científico y la validez del estudio (Hernández-Sampieri, Fernández & Baptista, 2018). Se implementa un enfoque mixto con procedimientos cuantitativos y cualitativos, permitiendo así una comprensión holística del fenómeno investigado. Esta integración posibilita contrastar el análisis estadístico de indicadores productivos con la interpretación de percepciones y prácticas organizacionales en la industria criogénica, lo que fortalece la robustez y confiabilidad de los hallazgos (Creswell & Plano Clark, 2017).

El diseño adopta un carácter aplicado y exploratorio. Su naturaleza aplicada responde a la intención de desarrollar una propuesta metodológica fundamentada en la filosofía LEAN, orientada a optimizar la gestión de proyectos con aplicación directa. El componente exploratorio facilita la identificación de oportunidades de mejora e innovación en los procesos productivos (Frías-Navarro & Pascual-Soler, 2020). A nivel metodológico, se contempla una investigación descriptiva para caracterizar detalladamente la gestión actual en Indura Ecuador, complementada con un análisis correlacional que examina las relaciones entre la implementación de LEAN y variables relevantes como tiempos, calidad y eficiencia (Guillén, Sánchez & Begazo, 2020).

Este diseño metodológico asegura un proceso investigativo coherente, riguroso y aplicable al contexto real de la industria criogénica, orientando así la generación de conocimiento pertinente y transferible.

#### ***3.2.1. Definición del enfoque, diseño y tipo de investigación de la tesis.***

En el ámbito exigente y dinámico de la industria criogénica, la dirección de proyectos exige un método estratégico y eficiente que garantice hallazgos positivos en cada fase. Por lo tanto, la filosofía LEAN ocupa un modelo eficaz para la optimización de los procesos, incrementar la productividad y reducir los desechos.

La implementación de un enfoque mixto se presenta como una estrategia efectiva para Indura Ecuador, cuyo objetivo es el estudio de la filosofía LEAN para la gestión de proyectos en fase productiva, combinando técnicas de investigación cualitativas y cuantitativas para obtener una comprensión completa de los obstáculos y oportunidades mediante datos tangibles sobre el rendimiento y los resultados de los proyectos, así como las percepciones y experiencias subjetivas del personal involucrado.

En este punto la investigación se forma bajo un diseño aplicable en las fases exploratorias. La práctica de este trabajo requiere un enfoque aplicado, procura generar un método tangible con el fin de consolidar un control en los proyectos de la industria criogénica. Asimismo, se incorpora diferentes componentes exploratorios, detectando las oportunidades de mejora e impulsar la innovación en este campo (Hernández – Sampieri & Mendoza, 2018).

Según Sánchez y Murillo (2021), la finalidad de los métodos de investigación es resolver problemas en el marco de las normas de validez y aceptación del método científico. Aunque cada enfoque se basa en supuestos diferentes y tiene reglas y formas de trabajo básicas desarrolladas y compartidas por una comunidad de académicos, no son enfoques excluyentes, sino que se complementan entre sí.

Los métodos cuantitativos se fundamentan en la recolección y análisis de datos numéricos con el propósito de comprender y optimizar los procesos. Esto implica el uso de indicadores cuantitativos para medir el rendimiento, identificar áreas de mejora y evaluar el impacto de las intervenciones. Por ejemplo, en un proyecto de instalación de equipos criogénicos, las métricas cuantitativas podrían abarcar el tiempo de instalación, las tasas de defectos y los costos de materiales.

Para Tkhorikov et al. (2018), “la gestión de proyectos puede considerarse como un sistema en el que los diferentes enfoques de la gestión de colecciones están lógicamente relacionados” (p. 31). Estos métodos permiten la implementación de grandes tareas con recursos heterogéneos limitados (materiales, tiempo, información, etc.) necesarios para lograr los objetivos y metas deseadas.

### **3.2.1.1. Diseño de la Investigación.**

#### ***3.2.1.1.1. Enfoque mixto y diseño explicativo secuencial.***

Un diseño de investigación actúa como un marco general que orienta al investigador en la recopilación, análisis e interpretación de datos con el objetivo de abordar un problema científico. Según Frías y Pascual (2020), este diseño se define como un conjunto organizado de actividades dirigido a resolver un problema particular y a generar conocimiento confiable y pertinente. En línea con esta visión, el presente estudio emplea un diseño explicativo secuencial, estructurado en dos etapas complementarias: una fase cuantitativa inicial seguida de una fase cualitativa que profundiza en la interpretación de los datos obtenidos.

En la etapa inicial del análisis (cuantitativa), el objetivo es identificar y examinar las variables cruciales que influyen en la eficiencia térmica y la gestión productiva de la planta criogénica de Indura en Ecuador. Para alcanzar este propósito, se utilizarán técnicas estadísticas avanzadas, incluyendo análisis multivariante, correlaciones de desempeño y modelos de regresión. Estas herramientas facilitarán la identificación de relaciones claras entre los factores técnicos y los indicadores vinculados a la productividad, calidad y consumo energético. Esta fase es esencial para establecer el fundamento teórico del estudio, mediante la recopilación y el análisis de datos numéricos robustos y verificables.

Posteriormente, en la segunda fase (cualitativa), se llevará a cabo un análisis más profundo de los resultados obtenidos durante la etapa cuantitativa. Esto conlleva investigar las causas, comportamientos y dinámicas presentes en la organización que clarifican los datos estadísticos. Para este fin, se emplearán técnicas como la observación directa en el campo y el análisis de documentos. Estas metodologías permitirán captar las percepciones de los individuos implicados, comprender los procesos de toma de decisiones y evaluar las prácticas de mejora continua fundamentadas en la filosofía LEAN. Esta fase representa un complemento fundamental al análisis numérico, ya que integra tanto la perspectiva de expertos como el conocimiento tácito de los operarios, proporcionando así una visión más integral y contextualizada de la realidad industrial.

Según Hernández Sampieri y Fernández (2019), es esencial que la elección del diseño de investigación esté en consonancia con los objetivos establecidos, las hipótesis planteadas y el entorno en el que se llevará a cabo el estudio. Para esta investigación, un diseño explicativo secuencial permite la triangulación de métodos, lo cual asegura que los resultados obtenidos sean tanto confiables como válidos, además de ser aplicables en otros contextos. La integración de enfoques cuantitativos y cualitativos facilita una transición desde una mera descripción estadística hacia una interpretación más profunda, lo que contribuye a un entendimiento integral sobre la implementación efectiva de la filosofía LEAN en la gestión de proyectos dentro de la industria criogénica.

El enfoque de diseño propuesto permite examinar el problema de investigación desde una perspectiva mixta que fusiona técnicas cuantitativas y cualitativas. En este sentido, el análisis cuantitativo ofrece una base empírica robusta para comprender de manera objetiva el fenómeno en cuestión, mientras que el análisis cualitativo enriquece esta comprensión al desvelar significados, contextos y orientaciones para la transformación metodológica. El objetivo primordial es maximizar la eficiencia, sostenibilidad y competitividad del sector criogénico en Ecuador, generando un conocimiento integral y aplicable.

#### ***3.2.1.1.2. Fase Cuantitativa: Diseño No Experimental – Transversal Correlacional.***

La fase inicial de la investigación es de carácter cuantitativo, diseñada bajo un enfoque no experimental, transversal y correlacional. En esta etapa, las variables no son manipuladas intencionalmente; en cambio, se estudian dentro de su contexto natural para detectar posibles interrelaciones y patrones entre ellas (Sánchez y Murillo, 2021). El objetivo principal de esta fase es evaluar la eficacia de los procesos productivos y el rendimiento térmico de la planta criogénica mediante el uso de variables e indicadores operativos que reflejan el funcionamiento real de la gestión de proyectos durante la fase productiva. Este enfoque se fundamenta en datos objetivos y verificables que permiten analizar cómo la metodología LEAN contribuye a la optimización de recursos, disminución de costos y mejora del desempeño industrial.

Siguiendo el esquema establecido por Sánchez y Murillo (2021), la investigación cuantitativa se lleva a cabo en diversas fases. Estas comienzan con la formulación de teorías y el desarrollo de hipótesis vinculadas a la gestión LEAN y la eficiencia térmica. Luego, se procede a

la recopilación de datos mediante registros operativos, manuales técnicos y controles de mantenimiento. Finalmente, se realiza un análisis utilizando técnicas estadísticas tales como regresión lineal, optimización múltiple y programación lineal. Esta última técnica es fundamental para maximizar el uso de recursos y evaluar distintas situaciones que faciliten la toma de decisiones estratégicas (Flores y Flores, 2021).

Los datos examinados abarcan los tiempos de ciclo de producción, la variabilidad en la calidad del producto, la eficiencia energética y el rendimiento en los procesos de suministro y distribución. Así, la fase cuantitativa proporciona una base empírica robusta que respalda el desempeño y funcionamiento de la planta, permitiendo posteriormente avanzar hacia la etapa cualitativa, en la cual se contextualizan y amplían las interpretaciones de estos hallazgos.

#### ***3.2.1.1.3. Fase Cualitativa: Diseño de Estudio de Caso con Enfoque Explicativo.***

La segunda fase consiste en un diseño cualitativo de tipo estudio de caso, adoptando un enfoque explicativo que tiene como objetivo profundizar en los resultados estadísticos obtenidos en la primera fase. Se considera la realidad operativa y organizacional de Indura Ecuador. El propósito central es analizar cómo las decisiones, prácticas y percepciones del personal técnico y directivo afectan la implementación de la filosofía LEAN y la eficiencia de los procesos criogénicos.

Para la recopilación de esta información, se recurre a la observación directa y al análisis documental. Estas herramientas son fundamentales para identificar factores, significados y causas que no son fácilmente medibles, pero que influyen de manera considerable en la gestión de proyectos. Este enfoque cualitativo y explicativo promueve la triangulación metodológica, combinando datos cuantitativos con las percepciones, actitudes y experiencias de los trabajadores, lo que enriquece los resultados numéricos con una comprensión interpretativa más profunda.

Además, esta fase tiene como objetivo validar la implementación práctica de la metodología sugerida, analizando su aceptación, flexibilidad y su impacto en la cultura organizacional. Esto posibilita convertir los hallazgos estadísticos en recomendaciones específicas para el

mejoramiento, reforzando así el vínculo entre la teoría y la práctica en el sector criogénico de Ecuador.

### **3.2.1.2. Tipo de Investigación.**

El presente estudio se centra en la aplicación de la gestión de proyectos durante la fase productiva dentro de la industria criogénica, específicamente en el caso de Indura Ecuador. Su orientación es fundamentalmente práctica y se basa en la descripción de la metodología empleada en este contexto.

#### ***3.2.1.2.1. Investigación Descriptiva.***

El objetivo de esta investigación es describir una metodología de gestión de proyectos basada en la filosofía LEAN para la fase productiva en la industria criogénica. Este enfoque se alinea con la investigación descriptiva, la cual busca caracterizar fenómenos o situaciones existentes (Hernández Sampieri & Mendoza, 2018).

La investigación descriptiva busca describir un fenómeno o situación en detalle. A la vez, que su uso se debe a crear una representación de personas, eventos o lugares (Arias & Covinos, 2021). Por ejemplo, los estudios descriptivos pueden analizar las características demográficas de la población. Las principales características de dichos estudios fueron mencionadas en la investigación de (Valle et al. 2022) son:

- Descripción detallada: describir y presentar detalladamente las características, naturaleza y detalles del fenómeno en estudio. Intenta responder a las preguntas de quién, qué, cuándo, dónde y cómo.
- No busca causas: proporciona una imagen clara y precisa del tema de estudio.
- Diseño observacional: El diseño observacional se utiliza para recopilar datos directamente de los fenómenos. Esto puede incluir observación directa, encuestas, cuestionarios, entrevistas y análisis de documentos.
- Muestra representativa: para asegurar la representatividad de los resultados se suele utilizar una muestra que represente plenamente a la etnia o grupo objeto de estudio.

- Datos cualitativos y cuantitativos: Dependiendo del tipo y propósito del estudio, se pueden utilizar datos tanto cualitativos como cuantitativos.
- Análisis de datos: analizar los datos después de su recopilación para organizar, resumir y presentar la información de manera coherente. Esto puede incluir estadísticas descriptivas, tabulación de datos, análisis de contenido o técnicas de codificación cualitativa.
- Contextualización: intenta comprender el fenómeno en un contexto más amplio. Esto incluye la consideración de factores externos que pueden afectar a los sujetos del estudio.
- Utilidad para futuras investigaciones: ayuda a generar preguntas o hipótesis de investigación más específicas que luego pueden probarse en experimentos o estudios relacionados.

#### ***3.2.1.2.2. Investigación Correlacional.***

La investigación correlacional se define como un estudio científico que busca identificar la relación entre dos o más variables. A diferencia de otros enfoques, en este tipo de investigaciones no se alteran las variables directamente; en su lugar, se lleva a cabo una observación y análisis para evaluar sus variaciones generales. El propósito fundamental es establecer si existe alguna conexión estadística entre las variables y, en caso afirmativo, determinar la naturaleza de dicha relación (ya sea positiva, negativa o neutral).

Los estudios correlacionales se dedican a medir y describir cada variable que podría estar relacionada, para posteriormente evaluar la conexión entre ellas. Según Guillen et al. (2020), el objetivo fundamental de esta forma de investigación es entender el comportamiento de un concepto o variable analizando cómo interactúan otras variables asociadas.

La correlación puede ser de dos tipos: positiva o negativa. Una correlación positiva indica que, cuando una variable presenta valores elevados, la otra también tiende a mostrar altos valores. Por otro lado, una correlación negativa sugiere que los altos valores en una variable se asocian con bajos valores en la otra (Hernández & Mendoza, 2018, p. 110).

Analizar las relaciones entre variables o sus efectos es un aspecto importante de la investigación correlacional, pero nunca afirma que una variable cause otra. En otras palabras, la

correlación analiza las correlaciones más que la causalidad, donde los cambios en un factor afectan directamente a otro.

El estudio de correlación cuantitativo mide el grado de la relación existente entre dos o más variables mismas que son parte del estudio para que luego se mida y se defina los resultados, a la vez, la finalidad del estudio es ver de qué manera se comporta la variable conociendo el comportamiento de las demás variables relacionadas (Cabezas, Andrade, & Torres, 2018, p. 69).

El diseño de la investigación se centra principalmente en un enfoque aplicado que incorpora componentes exploratorios. La de un diseño aplicado responde a la característica práctica y dirigida a la acción del estudio, con el fin de crear una metodología concreta y funcional que contribuya a optimizar la gestión de proyectos dentro de la industria criogénica. Asimismo, se integran aspectos exploratorios para facilitar un análisis más detallado de las prácticas vigentes, detectar áreas susceptibles de mejora y fomentar la innovación en el ámbito investigado.

Las investigaciones correlacionales, como señalan Hernández-Sampieri et al. (2018), desempeñan un papel fundamental en el ámbito científico. Estas no solo ayudan en la elaboración de hipótesis y en la creación de nuevas interrogantes para estudios posteriores, sino que también permiten a los investigadores examinar las complejas interacciones entre diferentes variables en variados contextos. En consecuencia, esta metodología se erige como una herramienta esencial para el entendimiento de las relaciones presentes en los fenómenos analizados.

El enfoque cualitativo de esta investigación tiene como objetivo profundizar en los significados, percepciones y experiencias de los participantes en los procesos de la industria criogénica. Desde esta perspectiva, el análisis cualitativo facilitará la identificación de elementos humanos, culturales y organizacionales que influyen en la gestión de proyectos, complementando así los datos cuantitativos recolectados. De acuerdo con Creswell y Poth (2018), este tipo de enfoque se fundamenta en la interpretación, donde el investigador busca entender cómo las personas interpretan sus acciones y el contexto que les rodea. Para lograr esto, se utilizarán métodos como la observación directa y la revisión de documentos internos, con el propósito de identificar patrones, opiniones y prácticas significativas.

De este modo, el enfoque cualitativo no pretende cuantificar ni medir relaciones numéricas. En cambio, se enfoca en profundizar la comprensión de los procesos y dinámicas que subyacen a los resultados cuantitativos, proporcionando así una visión más integral del fenómeno analizado. Al integrar ambos enfoques—un análisis correlacional cuantitativo y una interpretación cualitativa—se podrá validar los hallazgos desde una perspectiva mixta, lo que reforzará tanto la fiabilidad como la aplicabilidad de los resultados en el contexto real de la industria criogénica (Flick, 2019).

### ***3.2.2. Definición de métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos.***

La selección apropiada de métodos y herramientas para la recolección de datos es esencial en cualquier investigación, ya que impacta directamente en la validez y precisión de los hallazgos. Se parte del principio de que el conocimiento científico se edifica a través de enfoques que integran procedimientos lógicos y empíricos, con el fin de alcanzar una comprensión objetiva. Por esta razón, las metodologías se clasifican en dos categorías: teóricas y empíricas, las cuales se complementan entre sí para asegurar la coherencia del estudio.

En el ámbito teórico, se utilizan enfoques que examinan y describen el fenómeno desde una perspectiva conceptual. Entre estos métodos se encuentra el analítico-sintético, que descompone el tema en componentes para facilitar su comprensión; el inductivo-deductivo, que ayuda a formular y corroborar hipótesis; y el sistémico-estructural, que se centra en las interrelaciones dentro del sistema objeto de estudio (Bernal, 2020).

En el ámbito empírico, se obtienen datos concretos a través de la observación, encuestas y entrevistas que representan las vivencias y perspectivas de los involucrados (Hernández & Mendoza, 2018). La combinación de estos dos niveles refuerza la investigación, permitiendo que las conclusiones sean validadas con precisión y relevancia en situaciones reales (Tamayo & Tamayo, 2021).

Según Bryman y Bell (2019), es esencial que la selección de los métodos se alinee con las preguntas y objetivos establecidos. Por esta razón, en el presente estudio se emplearán métodos empíricos, incluyendo la observación estructurada para documentar procesos dentro de su contexto, así como entrevistas semiestructuradas que aportan información adicional desde

enfoques cualitativos. La integración de estas técnicas no solo refuerza la validez del estudio, sino que también incrementa la credibilidad de los hallazgos (Creswell & Creswell, 2018).

Desde una perspectiva epistemológica, esta investigación emplea dos niveles complementarios para la adquisición de conocimiento: el teórico y el empírico. La combinación de ambos permite una construcción y validación integral del saber.

En el ámbito teórico, se aplican diversos enfoques metodológicos. En primer lugar, el método analítico-sintético permite descomponer el objeto de estudio —la gestión de proyectos en la industria criogénica— en sus elementos esenciales, lo que facilita su posterior integración y comprensión del funcionamiento conjunto (Bernal, 2020). Asimismo, se emplean los métodos inductivo y deductivo para desarrollar teorías basadas en los datos recopilados y, simultáneamente, evaluar hipótesis fundamentadas en principios generales, fortaleciendo así la coherencia lógica del análisis (Hernández & Mendoza, 2018). Por último, el método sistémico-estructural-funcional es útil para examinar el sistema de gestión como un ente interrelacionado, identificando las funciones y relaciones que afectan su rendimiento diario (Tamayo & Tamayo, 2021). Estos enfoques metodológicos sustentan la dimensión conceptual del trabajo y aseguran su rigor científico.

Por otro lado, el ámbito empírico integra metodologías que buscan obtener datos directos sobre la realidad organizacional. La observación científica facilitará un registro sistemático de las prácticas y condiciones relacionadas con la gestión productiva en el sector industrial. Se llevarán a cabo entrevistas semiestructuradas con individuos clave que posean experiencia en la gestión de proyectos, con el fin de captar sus percepciones y detectar limitaciones o áreas para mejorar. Adicionalmente, se realizará un análisis documental para confrontar los datos recolectados con registros institucionales, normativas y reportes operativos.

Como indica Flick (2019), los métodos empíricos son esenciales en la investigación científica, ya que proporcionan datos observables que fundamentan y corroboran las conclusiones teóricas (p. 75). Por lo tanto, al combinar estos dos niveles, la investigación no solo se limita a describir la realidad, sino que también la analiza de forma crítica, produciendo propuestas prácticas que pueden ser implementadas y verificadas en el ámbito real de la industria criogénica.

### **3.2.2.1. Técnicas.**

Las técnicas de investigación se refieren a un conjunto sistemático de etapas y procedimientos que permiten la recolección, análisis e interpretación de la información necesaria para responder a los objetivos y preguntas planteadas en el estudio. La selección de estas técnicas está directamente relacionada con la naturaleza del problema que se investiga, los fines de la investigación y el tipo de datos requeridos, buscando siempre garantizar la precisión, coherencia y fiabilidad de los resultados obtenidos:

#### ***3.2.2.1.1. Revisión Bibliográfica.***

Una revisión de la literatura constituye una actividad investigativa que abarca la búsqueda, recolección, análisis y síntesis de información relevante. Esta práctica es esencial en cualquier investigación científica, ya que ayuda a establecer un sólido fundamento del conocimiento y a comprender los estudios previos realizados en el mismo ámbito.

Esta revisión es esencial por diferentes razones:

- Determina el nivel actual de conocimientos en un campo específico. Ayuda a los investigadores a comprender las lagunas en el conocimiento y a encontrar respuestas a preguntas de investigación importantes.
- La revisión de la literatura ayuda al investigador a elegir los métodos de investigación y técnicas estadísticas más adecuados para su trabajo. Esto garantiza la precisión y confiabilidad de los resultados de la encuesta.
- Por último, la revisión de la literatura ayuda a los investigadores a evitar la duplicación del trabajo y utilizar el trabajo existente. Esto puede ayudar a mejorar el conocimiento de forma más rápida y eficiente, ahorrando tiempo y recursos.

“La revisión bibliográfica es esencial para identificar tendencias y nuevas áreas de investigación y son la base para sintetizar y consolidar corpus disciplinarios” (Tramullas, 2020, p. 2). Promueve el progreso teórico y conceptual, pero no debemos olvidar su contribución a la difusión del conocimiento científico y la mejora de la práctica profesional.

Cada investigación científica necesita llevar a cabo una revisión bibliográfica detallada. Este proceso es esencial para construir un fundamento de conocimientos robustos, reconocer preguntas de investigación significativas y prevenir la repetición innecesaria de trabajos previos. Una revisión literaria eficaz requiere una planificación meticulosa, una selección cuidadosa de las fuentes pertinentes, un análisis crítico riguroso y una estructuración clara del contenido informativo.

De forma general, una revisión de la literatura en fuentes primarias implica el análisis de diarios operativos, herramientas para la gestión de proyectos, el manual operativo (Planta ASU), el Mapeo del Flujo de Valor y los datos accesibles provenientes de estudios previamente publicados.

#### ***3.2.2.1.2. Observación Directa.***

El investigador está presente, donde y cuando el fenómeno o situación investigada ocurre en observación directa. Este es un tipo de observación no invasiva que recopila datos sobre el comportamiento natural del sujeto. Esto puede ser particularmente importante en situaciones donde la presencia del investigador puede afectar al sujeto.

También permite la recopilación de datos sistemática y rigurosa, lo cual es particularmente importante para la investigación cuantitativa. En algunos casos, puede resultar difícil para los investigadores observar y registrar toda la información relevante sobre el comportamiento de un sujeto. Además, la validez y confiabilidad de las mediciones pueden verse afectadas por el sesgo del observador o la falta de estandarización de las condiciones de observación.

Urréa et al. (2022) afirman que la investigación directa “se define como aquella relación que se establece entre el investigador y el objeto de estudio” (p. 164). Este tipo de investigación implica un contacto directo entre el investigador y el problema en cuestión, con la única mediación de instrumentos de observación que enriquecen o complementan dicho proceso observacional.

### ***3.2.2.1.3. Análisis de datos.***

El estudio reúne y examina datos cuantitativos relacionados con la administración de proyectos en el sector criogénico. Esto puede abarcar detalles sobre métricas como tiempos de producción, costos, calidad y eficiencia, entre otros. Asimismo, respalda las conclusiones y sugerencias de la metodología presentada al detectar patrones, tendencias y correlaciones; es fundamental tener en cuenta diversos aspectos clave:

1. Datos sobre la eficiencia operativa: Recolección de información relativa a los tiempos de ciclo en el proceso productivo, duración de las configuraciones del equipo, períodos de espera, tiempos inactivos y cualquier otro parámetro que influya en la eficacia operativa durante la etapa de producción.
2. Datos de calidad del producto: Evaluación de información relacionada con las tasas de defectos, errores en el proceso productivo, cantidad de trabajos requeridos y otras métricas que puedan evidenciar la calidad del producto final.
3. Datos de eficiencia operativa: Recolección de datos sobre los tiempos necesarios para cada ciclo productivo, duración del montaje y ajuste de equipos, períodos de espera e inactividad, así como cualquier otro indicador relevante que pueda influir en la eficacia operacional durante la producción.
4. Datos de costos: Recolección de información referente a los gastos asociados con la producción, incluyendo materiales, energía, mano de obra y otros desembolsos vinculados a la etapa productiva del proyecto.

Se pueden utilizar varias técnicas de análisis después de recopilar estos datos, como:

1. Análisis de Pareto: para abordar de manera efectiva los problemas más comunes que afectan la eficiencia, la calidad, los costos o la seguridad en la fase productiva, para abordarlos de manera efectiva.
2. Análisis de regresión: para comprender mejor cómo ciertos factores afectan los resultados finales, identificando las relaciones causales entre varias variables (por ejemplo, tiempo de producción y costos o tiempo de espera y calidad del producto).

3. Control Estadístico de Procesos (SPC): realice un seguimiento de los cambios en el proceso de fabricación y detectar variaciones significativas que puedan indicar problemas de eficiencia o calidad.
4. Diagramas de flujo: la utilización de diagramas de flujo para visualizar y comprender mejor el flujo de trabajo y los procesos involucrados en la fase productiva. Esto permite identificar posibles cuellos de botella o áreas de mejora que puedan resolverse.

Durante el desarrollo de este análisis, se presentan variaciones; es un proceso tanto dinámico como fluido. Esta naturaleza dinámica se basa en las diversas corrientes filosóficas que respaldan cada interpretación y en la riqueza que aporta la continua comparación de los datos (Estrada & Arzuaga, 2021).

### **3.2.2.2. Instrumentos.**

El instrumento de investigación es una herramienta empleada para la recolección de datos a lo largo del proceso investigativo. Su propósito radica en medir variables, obtener información, documentar observaciones y facilitar el análisis de los datos, tales como:

#### **3.2.2.2.1. Bitácoras de operación.**

Los registros de actividad son registros detallados de actividades y procesos realizados en un contexto específico (por ejemplo, servicio, sistema de información, dispositivo, etc.). Estos registros le permiten monitorear operaciones, registrar eventos y detectar anomalías en tiempo real. En la industria criogénica, los registros de operación y mantenimiento de los equipos son esenciales para la trazabilidad, el control de calidad y la detección temprana de posibles problemas.

Según Oporto y Gardey (2021), un cuaderno o publicación sirve como medio para llevar un registro escrito de distintas actividades. Su organización sigue un orden cronológico, lo que facilita la revisión del contenido. Cabe destacar que las anotaciones precisas y detalladas pueden ofrecer información valiosa para apoyar la toma de decisiones, fomentar la mejora continua en los procesos y asegurar el cumplimiento con los estándares de calidad y seguridad en el ámbito criogénico.

#### **3.2.2.2.2. Herramientas de gestión de proyectos.**

En el ámbito de la industria criogénica, la gestión de proyectos se centra en establecer un sistema pull, donde las actividades que aportan mayor valor son guiadas por las necesidades del cliente, lo que previene la producción de bienes sin una demanda real.

Además, se fomenta una cultura de mejora continua que se sustenta en la comunicación efectiva y el trabajo colaborativo, con el propósito de optimizar tanto la eficiencia como la calidad operativa. Esta metodología es compatible con diversas prácticas ágiles y resulta especialmente idónea para proyectos que requieren plazos cortos de entrega, tales como los vinculados a la industria criogénica.

#### **3.2.2.2.3. Manual de Operaciones (Planta ASU).**

Este manual ha sido elaborado de acuerdo con los requisitos del sistema integrado de gestión SHEQ y adaptado a la normativa vigente según la cual INDURA Ecuador aprueba sus procesos productivos (Andrango, 2015).

La información registrada incluye los procedimientos operativos y de control del equipo de separación de aire y la experiencia del operador. Esta experiencia fue útil para determinar nuevos parámetros como temperatura, presión, presión diferencial, recuperación de gas de extracción, pureza de la producción y cómo mantener la producción diaria dentro del valor máximo de producción (25 Tn/d por diseño de planta) con un factor de eficiencia ( $< 1,6 \text{ Kw/m}^3$ ).

El manual MP-MEC-OPECON-01 es un código de identificación de archivos en el sistema SHEQ y su significado es:

- MP = Manual de programa
- MEC = Manual de Empresa Filial Ecuatoriana
- OPECON = Control y operaciones de la planta ASU
- 01 = corresponde al número de versión actual

#### ***3.2.2.2.4. Value Stream Mapping (VSM).***

Esta sofisticada herramienta LEAN se utiliza para visualizar el flujo de materiales e información a lo largo del proceso de fabricación. VSM permite la identificación de áreas de residuos y oportunidades de mejora del flujo de valor en la industria criogénica en Indura, Ecuador.

Según Morales y Castañeda (2023), el mapeo del flujo de valor se presenta como una estrategia para administrar la totalidad de la cadena de valor empresarial. Este método facilita la identificación de actividades que no aportan valor, permitiendo así su eliminación o reducción. En consecuencia, es posible optimizar la eficiencia operativa y mejorar, a su vez, la satisfacción de la cliente asociada.

#### ***3.2.3. Desarrollo de los instrumentos de obtención de datos.***

La elaboración de instrumentos constituye una etapa esencial en la planificación y desarrollo de proyectos de investigación, ya que abarca la creación y validación de herramientas destinadas a la recolección de datos con eficacia y confiabilidad. Entre los aspectos claves destacan la definición precisa de eventos y variables, la implementación de la operacionalización, la elaboración de tablas y el establecimiento de parámetros.

##### **3.2.3.1. Diseño del panel de expertos.**

La conformación de un panel de expertos para la industria criogénica requiere la selección meticulosa de profesionales con amplia experiencia y conocimiento en el área. Este enfoque es crucial para obtener asesoramiento especializado y una comprensión profunda de temas científicos y tecnológicos, lo que permite abordar desafíos complejos de manera más efectiva.

La conformación de un panel de expertos en el punto de la criogenia es fundamental para garantizar la efectividad y calidad de los procesos. Este panel debe ser vinculado por profesionales que tengan experiencia relevante en estas áreas como sistemas criogénicos, ingeniería, aplicaciones y diseño de equipos con el fin de aprovechar el conocimiento especializado para enfrentar desafíos y aprovechamiento de oportunidades dentro de la industria.

### 3.2.3.2. Objetivo del Panel.

El objetivo principal del grupo de expertos es desarrollar métodos específicos para la gestión de proyectos en la fase de producción de la industria criogénica. El objetivo es optimizar el proceso de producción de derivados del aire, reducir los residuos y aumentar la eficiencia operativa.

Se espera que, a través de la cooperación y el intercambio entre los miembros del grupo de expertos, sea posible desarrollar y adaptar un método eficaz a las necesidades específicas de la industria criogénica, lo que contribuirá en gran medida a la optimización del proceso de producción y aumentará la Competitividad de la industria criogénica.

### 3.2.3.3. Compromiso del Panel.

El panel estará compuesto por expertos con experiencia en la operación de plantas criogénicas:

**Expertos en administración de proyectos:** Profesionales que poseen un profundo conocimiento de las metodologías de gestión de proyectos, especialmente en lo que respecta a la implementación de estrategias dentro del ámbito industrial.

**Operadores de plantas criogénicas:** Expertos en la gestión de plantas ASU y sistemas criogénicos, con un sólido conocimiento de los protocolos operativos.

**Representantes de Indura Ecuador:** Expertos en la gestión de plantas ASU y sistemas criogénicos, con un sólido conocimiento de los protocolos operativos.

### 3.2.3.4. Funcionamiento del Panel.

El panel se reunirá de forma presencial para realizar las siguientes actividades:

**Análisis de la situación actual:** La evaluación de los procedimientos de gestión durante la etapa productiva es crucial para identificar áreas susceptibles de optimización y descubrir nuevas oportunidades

**Desarrollo de la Metodología LEAN:** El enfoque de la filosofía LEAN, aplicado a la gestión de proyectos en la industria criogénica, permite el desarrollo de una metodología específica. Esta se adapta de manera precisa a las características únicas de este sector, optimizando la fase productiva del proyecto y mejorando la eficiencia general.

**Validación y Ajustes:** La validación del método propuesto se llevó a cabo a través de una revisión técnica exhaustiva, simulaciones y pruebas piloto, lo que permitió identificar áreas de mejora y realizar ajustes necesarios en función de los resultados obtenidos.

**Documentación y Diseminación:** La metodología desarrollada, que incluye guías, manuales y herramientas prácticas, se documentará de manera exhaustiva para su posterior difusión. Se planea compartir los resultados y las lecciones aprendidas tanto dentro de la empresa Indura Ecuador como con la comunidad académica e industrial, con el fin de contribuir al conocimiento colectivo y a las buenas prácticas en el sector.

### **3.2.3.5. Resultados esperados.**

Basándose en los principios del concepto LEAN, los procesos operativos se optimizan utilizando métodos eficaces de gestión de proyectos en la fase de producción. El objetivo no es sólo aumentar la eficiencia en todas las etapas del ciclo productivo, sino también reducir costes y aumentar la competitividad de la empresa en un mercado cada vez más exigente y dinámico.

Fomentar una cultura de mejora continua dentro de una empresa es esencial para su capacidad de adaptación y eficiencia a largo plazo. Al incorporar una mentalidad que prioriza la reducción de desperdicios y la optimización constante de los procesos, las organizaciones no solo elevan su eficiencia operativa en el corto plazo, sino que también cultivan la agilidad requerida para reaccionar adecuadamente ante las dinámicas del mercado.

Un método comprobado de gestión de proyectos que tiene un efecto notable en la competitividad empresarial, al optimizar la eficiencia operativa, disminuir costos y promover una cultura de mejora constante. La adopción de esta práctica garantizará el éxito en un contexto empresarial cada vez más globalizado y competitivo.

### **3.2.3.6. Evaluación y Renovación.**

La evaluación continua del desempeño de un panel es crucial para asegurar que el grupo no solo cumpla con sus metas establecidas, sino que también mantenga la calidad y la validez de sus resultados. Para garantizar su eficacia y relevancia a lo largo del tiempo, es posible que los miembros del panel necesitan ser renovados o ajustados de manera periódica.

Es fundamental destacar que estas evaluaciones se enfocan tanto en el proceso de trabajo del panel como en los resultados alcanzados. Se analiza la efectividad de las reuniones, la calidad de las aportaciones individuales de cada miembro, su participación activa, la cohesión grupal y la habilidad para colaborar. Así, se asegura un funcionamiento óptimo del panel y se maximiza el aprovechamiento de la diversidad en conocimientos y experiencias entre sus integrantes.

La evaluación del desempeño de un panel de expertos no debe ser un evento esporádico, sino un proceso continuo y proactivo. A través de un monitoreo constante y la provisión de retroalimentación, es posible identificar oportunidades de mejora y áreas de desarrollo, lo que beneficia tanto el rendimiento individual de cada miembro como la eficacia general del grupo.

Esto mejora no solo el rendimiento del panel en el corto plazo, sino también su capacidad para adaptarse y resolver problemas en el futuro.

### **3.2.4. Determinación de la muestra y su criterio de selección.**

#### **3.2.4.1. Acciones para los ajustes previos al trabajo de campo.**

Antes de iniciar el trabajo es fundamental realizar una serie de ajustes y preparativos para asegurar el éxito y la eficacia. de la investigación como son:

1. **Una revisión completa de la bibliografía:** Realizar un análisis acerca de las técnicas LEAN, innovación criogénica, transición energética y cómo se pueden aplicar a la gestión de proyectos. Esto ayuda a identificar brechas o áreas de enfoque para la investigación y proporciona una comprensión sólida del estado del arte en el tema.

2. **Definición de objetivos específicos:** Definir los objetivos investigativos, incluidos los temas importantes que se discuten durante el trabajo de campo. Estos objetivos deben ser evidentes, factibles y relacionados con el propósito general de la investigación.
3. **Diseño metodológico detallado:** crear un diseño metodológico detallado que describa las técnicas investigativas, la recolección de datos mediante las bitácoras de operación que se utilizan durante el trabajo de campo. Esto incluye elegir herramientas de procesamiento de datos como PSPP y modelos matemáticos de programación lineal para medir variables pertinentes y recopilar datos de manera efectiva.
4. **Establecimiento de protocolos y procedimientos:** Para el procesamiento de muestras y recolección de datos, utilizar el protocolo del Sistema Integrado de Gestión SHEQ (Manual de Operaciones de Planta ASU) adaptado a la normativa vigente de INDURA ecuatoriana. Esto reduce el riesgo de error o sesgo y garantiza la calidad y coherencia de la recopilación de información.
5. **Planificación logística:** planear los aspectos logísticos del trabajo de campo, como la organización de horarios, la organización de reuniones con participantes clave.

### **3.3. Trabajo de campo.**

#### **3.3.1. Prueba Piloto.**

El procedimiento desarrollado para llevar a cabo una prueba piloto dentro del marco del proyecto " Metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos productivos en la industria criogénica, de la empresa Indura Ecuador en el año 2025", tiene como objetivo validar la efectividad, validez y pertinencia de los instrumentos de recolección de datos antes de su implementación definitiva en el contexto de estudio.

### **3.3.1.1. Descripción del proceso Planta ASU.**

Los gases se trasladan únicamente a distancias que resulten económicamente viables, ya que tales distancias dependen de los costos asociados al transporte y las características físicas de los mismos. Además, las instalaciones productivas están situadas en proximidad a los mercados que abastecen.

Generalmente, las zonas de separación del aire se encuentran en lugares próximos a los clientes que requieren grandes volúmenes, tales como: instalaciones siderúrgicas, plantas químicas, complejos petroquímicos, refinerías de petróleo y fábricas de fundición.

La calidad de los gases elaborados por estas plantas se conoce como de "Alta Pureza", aunque en ciertas situaciones los requisitos particulares para usos industriales son más rigurosos que los para usos médicos y alimenticios, ver Anexo 1.

### **3.3.1.2. Aire proceso.**

El proceso de purificación del aire en la planta inicia con un sistema de filtrado de múltiples etapas, diseñado para asegurar la calidad del flujo que se dirige al compresor. En la primera etapa, el aire de entrada pasa por filtros de papel que retienen partículas grandes, como polvo, de más de 90 micras. Posteriormente, atraviesa filtros químicos que capturan compuestos contaminantes como sulfatos e hidrocarburos. Finalmente, el aire es sometido a una microfiltración que elimina partículas de hasta 6 micras, asegurando así un aire limpio y seguro para su uso en el compresor.

El aire prefiltrado es canalizado mediante una válvula de admisión hacia un compresor centrífugo de tres etapas (C2101), dotado con intercambiadores de calor posteriores, que se refrigeran con agua. Cada etapa del compresor aumenta de manera gradual la presión del aire utilizado, mientras que los intercambiadores de calor vinculados disipan el calor producido por la compresión. Al concluir la última etapa, el compresor descarga el aire hacia el sistema a una presión de cercana a 5 bar (73 psi) y una temperatura regulada de 30 °C, garantizando las condiciones ideales para las etapas subsiguientes del proceso.

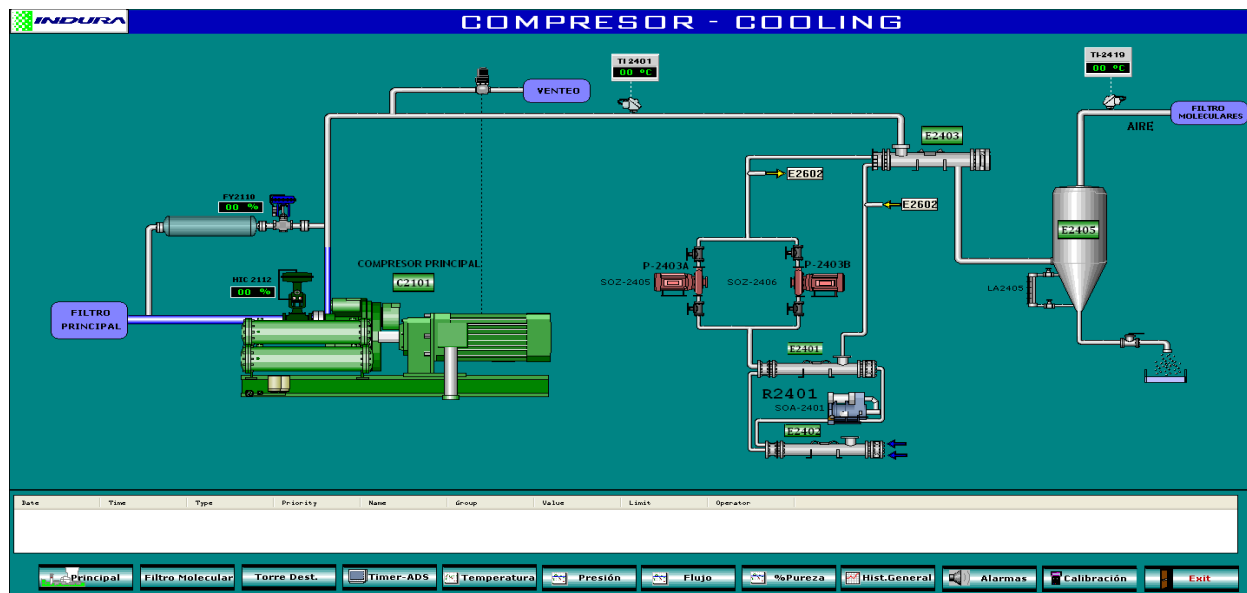
La válvula de admisión del compresor regula de manera automática el flujo de aire entrante, con el fin de evitar sobrecargas en el motor principal. Además, una válvula de recirculación administra la presión en la línea de descarga de manera independiente, redirigiendo el flujo de aire, mediante un silenciador, hacia el ingreso del compresor para asegurar la estabilidad en las operaciones. Un PLC integrado administra todo el sistema de control, coordinando las tareas de regulación y supervisión del equipo.

Posteriormente, el aire comprimido es sometido a un proceso de enfriamiento gradual hasta alcanzar aproximadamente 9 °C, mediante el evaporador del sistema de refrigeración mecánica identificado como R2401. Durante esta etapa, la reducción de temperatura provoca la condensación de la mayor parte de la humedad contenida en el flujo de aire, lo que contribuye a la estabilización de las condiciones del proceso. Dicho condensado es removido de forma continua a través de un separador ciclónico de agua, diseñado para aprovechar la fuerza centrífuga y garantizar una extracción eficiente. Este equipo incorpora un sistema automático de drenaje que evita acumulaciones indeseadas, asegurando así un suministro constante de aire seco y limpio, condición indispensable para mantener la confiabilidad y el óptimo desempeño de los procesos criogénicos subsiguientes.

El lecho de adsorción activa cumple un papel esencial dentro del sistema de purificación del aire, al encargarse de retener las impurezas presentes en el flujo gaseoso, tales como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), humedad remanente e hidrocarburos que podrían afectar la eficiencia del proceso. Una vez concluida esta etapa de depuración, el aire tratado atraviesa un filtro de partículas que garantiza su limpieza total antes de ingresar al sistema principal. Posteriormente, el flujo es conducido hacia la caja fría (cold box), donde se encuentra el intercambiador de calor principal. En esta unidad, el aire es sometido a un proceso de enfriamiento progresivo hasta alcanzar temperaturas extremadamente bajas, necesarias para su licuefacción y posterior separación criogénica. Finalmente, el aire líquido se introduce en la columna de presión media, donde tiene lugar la primera fase de fraccionamiento, permitiendo la diferenciación inicial entre oxígeno y nitrógeno, elementos fundamentales para la producción de gases industriales de alta pureza.

Figura 2

Compresor – Cooling.



*Nota:* La figura 2 corresponde al sistema de compresión y enfriamiento de aire, utilizado en la producción de gases criogénicos. Fuente: Sistema de control SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) Planta ASU.

### 3.3.1.3. Refrigeración de aire.

El sistema de enfriamiento de aire suministra la refrigeración requerida para los procesos de separación y licuefacción del aire, que transfiere la capacidad de enfriamiento al intercambiador de calor principal situado en la caja fría (E2901). Los elementos esenciales de este sistema comprenden un compresor para recirculación de aire, que presenta propiedades similares al compresor de aire principal, y un compresor de refuerzo (booster), equipado con una turbina de expansión (TBX) para maximizar la eficiencia en términos de termodinámica y generación de frío.

El compresor de reciclo de aire (C2102) opera procesando el gas a una presión inicial de 5 bar (73 psi) y una temperatura de 25 °C, incrementando la presión hasta cerca de 19 bar (275 psi)

con una temperatura de salida cercana a 30 °C. El principal contraste entre el compresor de reciclaje y el compresor de aire se encuentra en su configuración, dado que el primero cuenta con dos etapas de compresión en vez de tres, así mejorando su rendimiento para usos particulares del sistema, ver Figura 3.

#### **3.3.1.4. Compresor de refuerzos o booster.**

El aire gaseoso comprimido en el compresor de recirculación es conducido al compresor de refuerzo (booster – C2501), donde su presión se eleva de 19 bar a cerca de 25 bar (363 psi). Posteriormente, el flujo atraviesa un intercambiador de calor refrigerado por agua, en el que su temperatura disminuye cerca de 41 °C. Finalmente, el gas comprimido es dirigido al intercambiador principal situado en la caja fría, donde se regula su temperatura para las etapas posteriores del proceso criogénico, ver Figura 3.

#### **3.3.1.5. Turbina de expansión.**

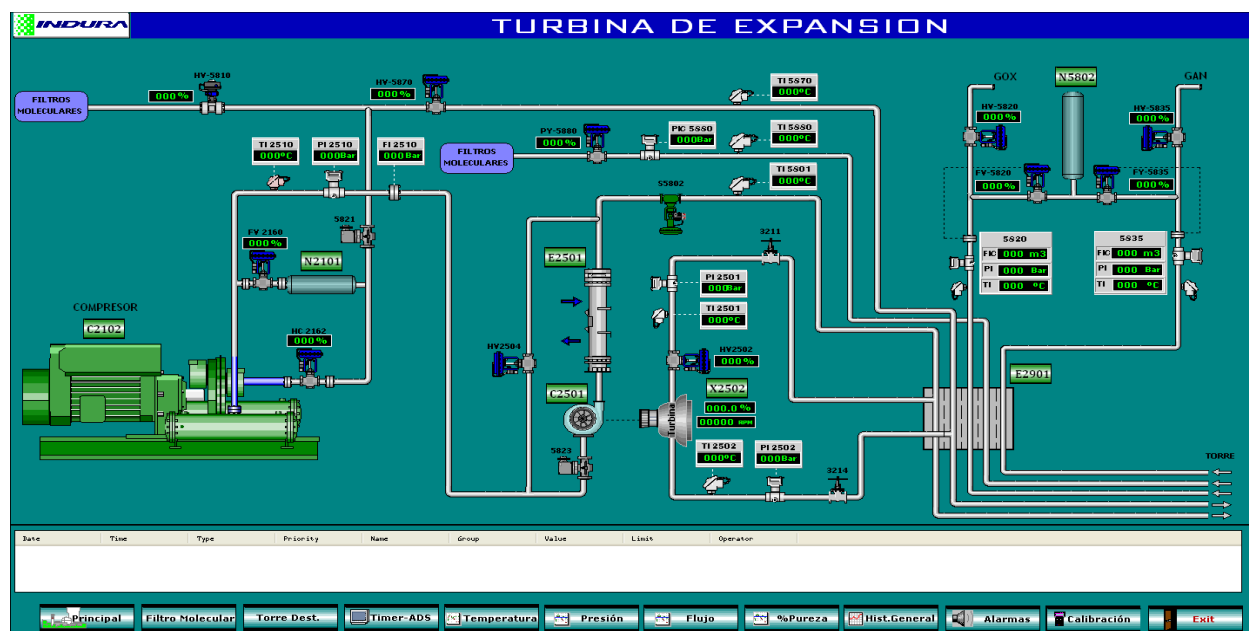
Un segmento del flujo comprimido a 25 bar procedente del booster es redirigido hacia la turbina de expansión (X2502) después de pasar por el intercambiador principal, donde su temperatura disminuye a cerca de -110 °C. Durante su travesía por la turbina, el trabajo termodinámico se elimina, lo que conduce a un flujo de aire a baja presión y temperatura, alrededor de 5 bar y -160 °C. Este flujo de descarga desempeña una función crucial al enfriar el flujo de alimentación hacia la turbina, así como otros flujos de aire y nitrógeno dentro del sistema, optimizando la eficiencia térmica del proceso, ver Figura 3.

#### **3.3.1.6. Descripción mecánica de un turbo expansor.**

El turbo expansor se compone de una turbina de una sola etapa con entrada axial y expansión radial, unida a un compresor centrífugo de una sola etapa con salida radial. El impulsor del compresor y el rotor de la turbina se encuentran montados en extremos contrarios de un eje compartido, sostenidos por rodamientos lubricados con aceite y sellados a través de gas de proceso para prevenir fugas. La turbina recibe el aire de proceso mediante toberas de inyección, que aceleran el flujo, lo que permite que el rotor llegue a velocidades operativas de 19,000 a 27,000 RPM. La energía mecánica producida en la turbina se transmite al compresor directamente a través del eje compartido, acelerando así su funcionamiento.

Figura 3

*Turbina de expansión*



*Nota:* El gráfico corresponde al sistema de la turbina de expansión, una etapa clave en los procesos criogénicos para la producción y separación de gases. Fuente: Sistema de control SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) Planta ASU.

### 3.3.1.7. Separación de Oxígeno / Nitrógeno.

La separación del aire y el nitrógeno se lleva a cabo mediante dos columnas de destilación criogénica (E3201). En primer lugar, en la columna de media presión, se purifica el nitrógeno, lo que da como resultado la producción de aire puro con aproximadamente un 40% de oxígeno. A continuación, en la columna de baja presión, se realiza la destilación del oxígeno y el excedente de nitrógeno obtenido se utiliza para alimentar las camas de absorción. Como se especifica en la sección anterior, el sistema de refrigeración de aire suministra toda la refrigeración requerida para los procesos de separación y licuefacción, aplicándose específicamente en el intercambiador principal de calor para preservar las condiciones ideales de operación, ver Figura 4.

### 3.3.1.8. Columna de media presión.

El aire de proceso parcialmente licuado se inserta en la columna de media presión desde el intercambiador principal de temperatura, ubicado por debajo de las bandejas de destilación. En su trayecto, el líquido desciende mientras que el vapor asciende a través de las bandejas. Conforme el vapor se eleva, entra en contacto con los líquidos de reflujo que se descienden, lo que facilita el enriquecimiento del vapor en oxígeno. Se conoce como "aire crudo" al líquido enriquecido en oxígeno que alcanza el fondo de la columna. Cuando este líquido llega a un nivel preestablecido, el sistema de control de procesos regula el nivel, enviando cualquier sobrante a la columna de baja presión para su destilación subsiguiente.

El vapor de nitrógeno que llega a la cima de la columna de media presión obtiene su pureza definitiva y se dirige al condensador de rehervido, donde se encuentra totalmente condensado. Este condensador está principalmente incorporado en un colector habitual de oxígeno líquido ubicado en la base de la columna de baja presión. La refrigeración requerida para la condensación del nitrógeno se proporciona a través del uso de oxígeno líquido, que hierve a una presión reducida y, en consecuencia, a una temperatura menor a la del nitrógeno de alta presión.

El condensador de rehervido funciona como un vínculo térmico entre las columnas de presión media y baja. Este dispositivo, que funciona como un intercambiador de calor de placas con aletas, facilita la condensación del nitrógeno en los pasajes de alta presión. Mientras tanto, el oxígeno líquido, que suministra la refrigeración, se vaporiza en los pasajes que se exponen al fondo común de oxígeno líquido en su parte inferior y al vapor de oxígeno puro en su parte superior, que se envía a las bandejas de destilación de la columna de baja presión.

Una parte del nitrógeno condensado regresa a la banda superior de la columna de media presión en forma de reflujo, preservando el proceso de destilación mientras el líquido baja por las bandas. El líquido sobrante es transportado al intercambiador de temperatura principal, donde se refrigera antes de ser redirigido a la parte superior de la columna de baja presión. El ajuste de la válvula HC 3211, que funciona manualmente, regula el volumen de reflujo que recibe la columna de media presión.

El nitrógeno que alcanza la cima de la columna de baja presión puede utilizarse como producto final o ser empleado para aportar refrigeración adicional durante el proceso de destilación de oxígeno en dicha columna. La cantidad asignada a cada uso estará sujeta al modo operativo escogido para el sistema, ver Figura 4.

### **3.3.1.9. Columna de baja presión.**

El líquido que alimenta principalmente a la columna de baja presión proviene de la columna de media presión. Este líquido, que proviene del depósito de la columna de media presión, es refrigerado en el intercambiador principal de temperatura antes de llegar a la columna de baja presión, a diversas bandejas situadas por debajo de la bandeja principal. Una vez en el interior, el líquido baja a través de las bandejas, entrando en contacto directo con el vapor ascendente. En este procedimiento, el líquido libera nitrógeno, que es más volátil, transformando el residuo líquido en oxígeno, que es menos volátil. Cuando el líquido llega al sumidero de la columna de baja presión, posee al menos un 99,6% de pureza en oxígeno.

La columna de baja presión permite el ingreso de reflujo de nitrógeno puro en su parte superior. Este reflujo, que se encuentra a una temperatura suficientemente baja, proporciona la refrigeración necesaria para condensar cualquier vapor ascendente de oxígeno. La cantidad de reflujo de nitrógeno varía según el modo operativo seleccionado para la planta. El fluido presente en la zona superior de la columna es completamente puro, con una concentración inferior a 6 ppm de oxígeno, y se dirige hacia un tanque almacenador. Al mismo tiempo, el gas nitrógeno recuperado desde la superficie da inicio al proceso de regeneración en las camas adsorbentes.

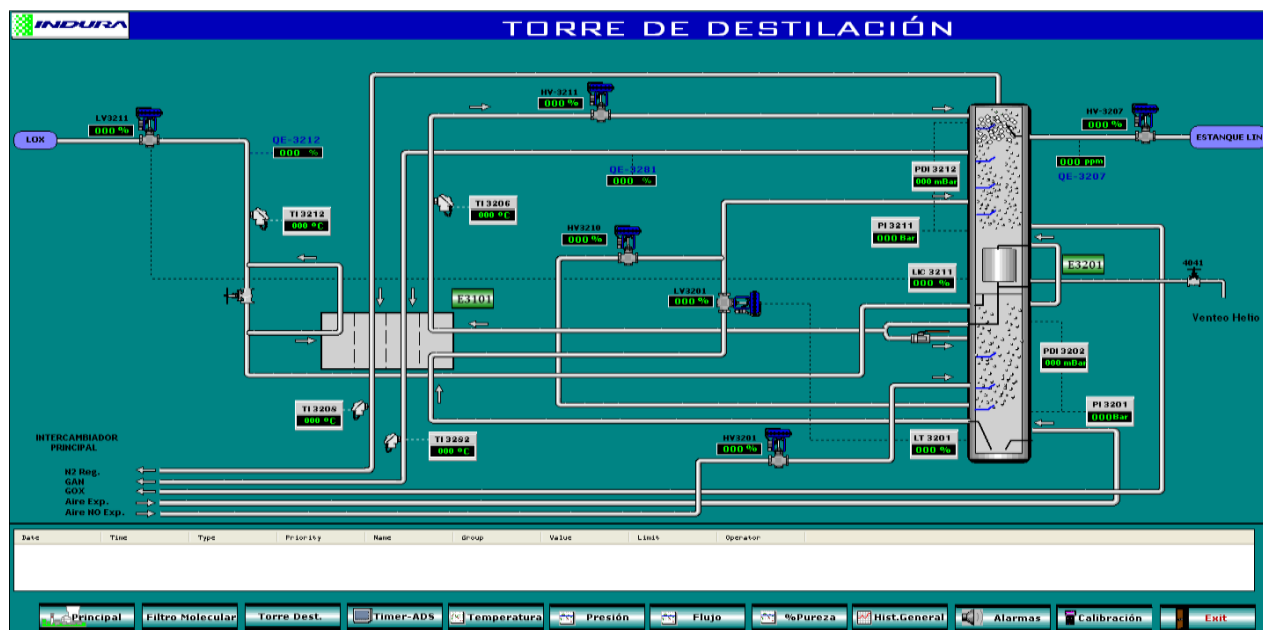
Alrededor de la cima de la columna, se encuentra un venteo de vapor de nitrógeno, utilizado en algunos modos operativos para eliminar el exceso de nitrógeno, garantizando que el flujo de reflujo se mantenga mayoritariamente como nitrógeno puro. Previo a la emisión de este gas a la atmósfera, su refrigeración se restablece en el intercambiador de temperatura principal.

En la parte inferior de la columna de baja presión se encuentra otro venteo, diseñado para remover el gas de oxígeno casi puro antes de que se ascienda por las bandejas. De forma similar, el intercambiador principal de temperatura recupera la refrigeración de este flujo antes de su liberación a la atmósfera.

En el sumidero ubicado en la parte inferior de la columna de baja presión, se realiza el proceso de ebullición del líquido a través del condensador de rehervido que está sumergido. El nivel del líquido en este sumidero se mantiene automáticamente en un umbral establecido. Cualquier exceso de líquido es redirigido al tanque acumulador para almacenar oxígeno.

**Figura 4**

*Torre de destilación*



*Nota:* El gráfico corresponde a la torre de destilación, utilizada para la separación de gases criogénicos. Fuente: Sistema de control SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) Planta ASU.

### 3.3.2. Aplicación de los instrumentos.

La organización del trabajo de campo se lo efectuó mediante la utilización de bitácoras de operación para el registro de parámetros de funcionamiento, manual de operaciones de la Planta ASU y panel de expertos.

El procesamiento de muestras y recolección de datos, se lo maneja mediante el protocolo el Manual de Operación y Control Planta, para reducir el riesgo de error o sesgo y coherencia de la recopilación de información, ver Anexo 2.

### **3.3.2.1. Bitácoras de Operación.**

Las Bitácoras de Operación son un registro estructurado para documentar y monitorear los parámetros críticos y las condiciones de operación en una Unidad de Separación de Aire (ASU). A continuación, se proporciona un resumen técnico de la información contenida:

#### ***3.3.2.1.1. Bitácora de Operación – Sala de Control.***

La bitácora inicia con un bloque de información para documentar el equipo, fase, tipo de riesgo, etapa y las acciones de control vinculadas al proceso. Esto sugiere una metodología de gestión de riesgos en la que se reconoce cada elemento esencial de la operación para implementar acciones de mitigación ver Anexo 3.

- **Sección de Registros de Parámetros:** La bitácora contiene campos para registrar varios parámetros de control, tales como temperaturas, presiones y flujos en distintos lugares de la planta. Es fundamental para supervisar la estabilidad del proceso e identificar desviaciones.
- **Sección de Revisión de Impurezas:** Se distingue una sección específica para el control de impurezas a través de filtros moleculares, lo que señala una medida de garantía de la pureza del producto final, que podría ser oxígeno, nitrógeno o argón.
- **Indicadores y especificaciones:** La bitácora incluye columnas o espacios para registrar los valores obtenidos y cotejarlos con los límites permisibles o especificaciones esenciales, lo que contribuye a asegurar que el proceso se conserve dentro de los límites de seguridad y calidad.
- **Bloques de Registro Temporal:** Se incorporan secciones específicas para registrar las condiciones a diferentes horas o turnos, lo que permite el seguimiento de la operación y el control constante durante todo el día.

En general, este formato de bitácora de operación está diseñado para garantizar la seguridad en las operaciones y la calidad del producto, siguiendo principios de control de calidad y gestión de riesgos.

***3.3.2.1.2. Bitácora de Operación – Unidad de Refrigeración (R-2401) / Separador de Agua (Ciclón) / Totalizador Másico / Filtro Principal.***

- **Parámetros de Consumo Energético:** Esta sección incluye el monitoreo del consumo energético de la planta, que está segmentado por áreas o equipos clave (como compresores, sistema de refrigeración). La energía es uno de los elementos críticos en plantas ASU, dado que su consumo impacta directamente en los costos operativos, ver Anexo 4.
- **Valores de Consumo:** Se registran valores específicos de energía consumida durante diferentes momentos del día. Esto permite un análisis detallado del consumo y la detección de picos o descensos que señalan irregularidades o potenciales incrementos en la eficiencia energética.
- **Análisis de Tendencias:** A través del registro continuo, es posible analizar las tendencias de consumo energético y planificar medidas de optimización.

**Niveles de Estanques:**

- **Estanques de Almacenamiento:** La bitácora documenta el grado de llenado de los estanques de gases (tales como oxígeno, nitrógeno), permitiendo un control riguroso de las reservas.
- **Monitoreo de Existencias:** Este seguimiento es esencial para asegurar el abastecimiento constante y evitar interrupciones en la distribución de gases. Además, contribuye a prevenir requisitos de producción adicionales.
- **Capacidad y Uso:** Se registran información como la capacidad total y el uso actual, lo que facilita la administración de los períodos de reabastecimiento o desocupación de los estanques.

### **Indicadores críticos:**

- **Alarmas de Bajo Nivel:** La bitácora contiene niveles críticos o puntos de alerta, que provocan acciones cuando los niveles de un depósito disminuyen por debajo de determinados límites, garantizando la disponibilidad constante del producto.
- **Comparación con Objetivos:** El registro permite comparar los niveles actuales con los objetivos de inventario, ayudando en la toma de decisiones estratégicas sobre producción y distribución.

Este registro es esencial para el control operativo de una planta ASU, dado que el consumo de energía y la gestión de los niveles de estanques influyen directamente en la eficiencia y la capacidad para cubrir la demanda.

#### ***3.3.2.1.3. Bitácora de Operación – Compresor Principal (C-2101).***

- **Parámetros de presión y temperatura:** La bitácora incluye un monitoreo detallado de la presión y temperatura en diferentes etapas del compresor. Estos valores son esenciales para asegurar que el compresor funcione dentro de los umbrales de seguridad y eficacia, ver Anexo 5.
- **Rendimiento del compresor:** Se registran valores que permiten evaluar el rendimiento del compresor, detectando fluctuaciones que indican el desgaste o fallos emergentes en el equipo.

### **Variables de control:**

- **Vibración y ruido:** Indicadores de la condición mecánica del compresor. Los incrementos en la vibración o ruido suelen indicar posibles problemas de alineación, desgaste en elementos internos o la necesidad de mantenimiento.
- **Consumo de Energía:** El monitoreo del consumo eléctrico es esencial para optimizar la utilización de energía y reducir costos operativos. Cualquier incremento no habitual en el consumo indica ineficiencias en el compresor.

### **Mantenimiento Preventivo y Correctivo:**

- **Historial de Mantenimiento:** La bitácora incluye apartados para documentar las fechas de mantenimientos preventivos o correctivos realizados, lo que facilita la detección de patrones de fallos y planificar mantenimientos futuros.
- **Alertas de Operación:** Indicadores de situaciones que superan los límites habituales que necesitan la participación del equipo de mantenimiento.

Esta bitácora es esencial para asegurar el funcionamiento eficiente y seguro del compresor C2101. Al llevar un registro detallado de sus condiciones de operación y mantenimiento, se facilita la identificación de posibles problemas, se optimizan los costos de energía y se asegura la continuidad operacional del equipo.

#### ***3.3.2.1.4. Bitácora de Planta – Compresor de Reciclo (C-2102).***

##### **Temperaturas del compresor y motor (ver Anexo 6).**

- **Temperaturas del compresor:** Se registra la temperatura de entrada y salida de cada etapa de compresión:

**Primera Etapa (T1 y T2):** Las temperaturas de entrada varían entre 30-45°C, mientras que las de salida son más elevadas, alcanzando hasta 150°C.

**Segunda Etapa (T3 y T4):** La temperatura de entrada varía entre 50-80°C, mientras que la de salida está entre 80-120°C.

**Temperatura de Descarga (T5):** Rango de 30-60°C.

- **Temperaturas del Motor:** Se registran las temperaturas en los estatores A, B y C, que varían entre 70-100°C, y la temperatura del descanso externo está en un rango de 60-80°C.
- **Corriente (Amperios):** Los valores de corriente en el motor oscilan entre 160-185 A, lo que indica el nivel de carga en operación.

**Control del Surge (Pérdida de Carga):**

- **SurgeWatch:** Se emplea para monitorear y evitar circunstancias de sobretensión en el compresor, un fenómeno donde el flujo de gas se invierte, lo que puede dañar el equipo.
- **Alarmas:** Se activa una alarma al alcanzar un nivel de sobretensión del 12%.

**Vibraciones:**

- **Vibraciones de la 1ra y 2da Etapa:** Se miden en milésimas de pulgada (mils), con un rango normal de 1 a 1.2 mils. El monitoreo de las vibraciones es crítico para detectar desalineaciones o problemas mecánicos.

**Control automático:**

- **Válvula de Admisión (FY101) y Válvula Blow Off (PY102):** Estas válvulas regulan la admisión de gas al compresor y el reciclaje (blow off), contribuyendo a mantener las condiciones de funcionamiento óptimas y evitar el sobrevoltaje.

**Sistema de Aceite:**

- **Presión de Aceite (PT105):** La presión del aceite oscila en un rango de 12-35 PSIG, siendo esencial para la lubricación del compresor y la prevención de averías por fricción.
- **Temperaturas de Entrada y Salida del Intercambiador:** Oscilan entre 21-60°C, garantizando que el sistema de aceite se encuentre en condiciones óptimas para su operación.
- **Diferencia de filtro (PDI 2013):** Se registra una variación de presión de 900-1000 mbar, lo que indica la necesidad de sustituir el filtro.

**Agua de enfriamiento:**

- **Enfriador de la 1ra y 2da Etapa:** Las temperaturas del agua de enfriamiento están en un rango de 30-40°C. Este sistema es vital para prevenir el sobrecalentamiento del compresor y preservar la eficiencia del ciclo de compresión.

### **Presión del sistema (PT-101):**

- **Presión General del Sistema:** La presión se conserva entre 260-280 PSIG, lo que indica un control adecuado de la presión en el sistema de gas comprimido.

La bitácora de funcionamiento del compresor de reciclaje C2102 facilita un seguimiento minucioso de los parámetros vitales que influyen en el desempeño y la seguridad del dispositivo. Es crucial un correcto manejo de temperaturas, presiones, vibraciones y el sistema de lubricación para garantizar un funcionamiento constante y eficaz del compresor, previniendo daños causados por sobrecargas, inconvenientes mecánicos o errores en la lubricación.

### **3.3.2.1.5. Bitácora de Operación Turbina de Expansión (TBX-2501) – PPU's (2601-2602).**

#### **Temperatura de la turbina (Ver Anexo 7)**

- Entrada y salida:

**Temperatura de Entrada (TI1214):** 25 – 40°C.

**Temperatura de Salida (TI1215):** -100°C a – 120°C.

Estas temperaturas resultan esenciales para el ciclo de enfriamiento y la eficacia en la expansión del gas, que requiere una refrigeración considerable al atravesar la turbina.

- **Rotación de la turbina:**

**Velocidad de giro (RI1202):** 26.500 – 28.000 RPM.

Las turbinas de expansión poseen una velocidad de rotación elevada, que operan a grandes velocidades para llevar a cabo la expansión isentrópica del gas.

- **Presiones en la turbina:**

**Presión de entrada (PI1214):** 50 – 60 bar.

**Presión de salida (PI1215):** -1 a 0 bar (presión negativa indica vacío parcial).

La diferencia de presión entre la entrada y la salida es fundamental para el proceso de expansión, y asegura que el gas se enfríe rápidamente al salir de la turbina.

- **Vibraciones de la turbina:**

**Vibración en el Eje (VT1201):** 0,5 – 1 mils.

Es crucial supervisar las vibraciones para identificar problemas mecánicos, tales como desequilibrio o fricción desmedida.

- **Lubricación:**

**Flujo de Aceite (FT1203):** El flujo de aceite se evalúa para la lubricación del sistema, garantizando el funcionamiento adecuado de los elementos móviles de la turbina.

**Presión de aceite (PI1206):** 10 – 20 bares. Es crucial mantener un nivel de presión apropiado para prevenir el deterioro anticipado de las partes internas.

La bitácora de operación de la turbina de expansión se emplea para garantizar que el equipo funcione en condiciones ideales. Los registros de temperaturas, presiones y velocidades de rotación garantizan la eficiencia del ciclo de expansión y la producción de temperaturas extremadamente bajas en los procesos criogénicos. La supervisión de vibraciones y la presión del aceite permiten la identificación precoz de posibles errores, evitando inconvenientes mecánicos que podrían perjudicar la continuidad del proceso.

### ***3.3.3. Procesamiento de la información.***

En la investigación científica y en la toma de decisiones en entornos industriales, el análisis cuantitativo desempeña un papel clave al facilitar datos puntuales que permiten modelar fenómenos y optimizar procesos. En este contexto, la aplicación de modelos matemáticos, como la regresión polinómica, permite la identificación de patrones y relaciones entre variables, lo que resulta fundamental para la optimización y mejora de procedimientos productivos

### 3.3.3.1. Análisis Cuantitativo.

En el procedimiento de calificación de operación se realizaron las pruebas a los equipos y accesorios componentes del sistema de fabricación de Líquidos Criogénicos y Gases, con el fin de verificar su funcionamiento de acuerdo a las especificaciones de operación.

Se consideraron tres factores del proceso relacionados con las temperaturas del sistema de agua de refrigeración:

- **Agua de enfriamiento sistema:** TE 4331
- **Salida enfriador 1ª etapa:** TI 2132 (compresor C2101)
- **Salida enfriador 1ª etapa:** TI 2182 (compresor C2102)

El monitoreo de las variables tiene como objetivo determinar un Approach Temp (temperatura óptima – TE 4331) que garantice la eficiencia del sistema de enfriamiento y, a su vez, permita consolidar el nivel de producción diaria. Para ello, se emplea un análisis de regresión polinómica, enfocándose en la modelización de datos asociados a dos variables clave, TI 2132 y TI 2182, mediante el uso de ecuaciones polinómicas de distintos grados.

#### 3.3.3.1.1. Análisis de regresión polinómica.

La regresión polinómica es una técnica estadística utilizada para representar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes, posibilitando la identificación de patrones no lineales en la información. Dentro del marco del estudio se analizaron las temperaturas TI 4331, TI 2132 y TI 2182, este método se transforma en un recurso útil para anticipar comportamientos y tendencias basadas en registros históricos (Ver Anexo 8).

El estudio presenta un análisis detallado de la información recolectada entre el 13 y el 18 de junio de 2024, utilizando modelos de regresión polinómica para valorar el desempeño de las temperaturas del sistema de enfriamiento. Mediante diagramas y ecuaciones, se exponen las relaciones detectadas, además de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que señalan la calidad de la adaptación de los modelos. Este estudio no solo ofrece una perspectiva nítida de las

fluctuaciones en los datos, sino que también facilita la realización de proyecciones que pueden ser beneficiosas para la toma de decisiones en la operación de la Planta ASU.

**Tabla 5**

*Análisis de regresión polinómica.*

	<b>TI 2132</b>	<b>TI 2182</b>	<b>TE 4331</b>	75295 36	5378 24	3841 6	2744	196	14	1		Determinación
13/6/2 024	6,30E +06	- 3,26E+ 07	<b>14</b>	6,6	- 590,2 9	2202 8	- 4380 63	5,00E+ 06	- 3,00E+ 07	7,00E+ 07	TI 2132	76,5%
				1,463	- 134,3 9	5134, 9	- 1044 64	1,00E+ 06	- 7,00E+ 06	2,00E+ 07	TI 2182	80,7%
14/6/2 024	3,46E +06	- 3,06E+ 05		-1,175	104,1	- 3838, 6	7541 0	- 832377	5,00E+ 06	- 1,00E+ 07	TI 2132	47,4%
				0,7672	- 67,10 9	2443	- 4737 1	516052	- 3,00E+ 06	7,00E+ 06	TI 2182	88,1%
15/6/2 024	- 4,35E +06	- 3,76E+ 06		0,9799	- 84,98 6	3068, 4	- 5902 9	638172	- 4,00E+ 06	9,00E+ 06	TI 2132	76,0%
				- 3,0395	269,8 7	- 9975, 9	1965 09	- 2,00E+ 06	1,00E+ 07	- 3,00E+ 07	TI 2182	76,1%

16/6/2 024	9,79E +07	- 1,61E+ 08	8,1357	- 720,5 4	2656 8	- 5220 44	6,00E+ 06	- 3,00E+ 07	8,00E+ 07	TI 2132	37,0%
			- 3,6906	324,6 4	- 1188 9	2320 31	- 3,00E+ 06	1,00E+ 07	- 4,00E+ 07	TI 2182	87,7%
17/6/2 024	- 1,69E +02	3,76E+ 01	- 0,0004	0,039 4	- 1,700 2	38,64 1	-487,95	3246,5	-8876,6	TI 2132	65,6%
			- 5,00E- 05	0,003 8	- 0,106	1,201	-0,9637	-80,374	461,06	TI 2182	61,7%
18/6/2 024	1,32E +02	- 3,49E+ 06	0	1,322 8	- 92,32 8	2577	-35951	250689	- 698967	TI 2132	100,0%
			0	- 13,63 9	965,4	- 2731 8	386302	- 3,00E+ 06	8,00E+ 06	TI 2182	50,1%
										<b>R2</b> <b>TI</b> <b>2132</b>	<b>67,1%</b>
										<b>R2</b> <b>TI</b> <b>2182</b>	<b>74,1%</b>

*Nota:* Esta tabla muestra el monitoreo de las temperaturas del sistema de refrigeración y la simulación de la temperatura óptima – TE 4331 (14°C) para una operación eficiente.

## **Análisis de las variables (TI 2132 y TI 2182).**

- **Descripción general:**

Es importante considerar que las observaciones efectuadas entre el 13 y el 18 de junio de 2024 son adecuadas, dado que ofrecen una muestra representativa del comportamiento del proceso productivo. Además, la elección de estas fechas refleja la factibilidad real de acceder a la información en planta, asegurando así la recolección directa de datos pertinentes y confiables. Esta disponibilidad de información facilitó la realización de un análisis exacto y fundamentado en pruebas, garantizando la validez de las conclusiones obtenidas, para dos variables fundamentales: TI 2132 y TI 2182.

Los valores se encuentran dispuestos en diversas columnas con distintas unidades de medición y métricas, como "TE 4331", así como valores negativos y positivos, variaciones y porcentajes que parecen tener relación con la eficiencia o el desempeño (como "76,5%" en TI 2132).

- **Variación de TI 2132 y TI 2182:**

Los valores vinculados a TI 2132 y TI 2182 presentan variaciones a través de las fechas, presentando picos y caídas significativas, particularmente en las fechas iniciales (13/6/2024, 14/6/2024) y al término (18/6/2024).

Los coeficientes de R<sup>2</sup> (coeficiente de determinación) se encuentran al final de la tabla y están vinculados con la calidad de la predicción o la modificación de un modelo. TI 2132 registra un 67,1% y TI 2182 un 74,1%, lo que indica que la adaptación de TI 2182 es superior en relación a TI 2132.

- **Tendencias y Desempeño:**

La fecha 13/6/2024 presenta un desempeño bastante bajo, en particular en los valores negativos como el de TI 2182 (-3,26E+07).

En fechas como el 15/6/2024, la variabilidad se incrementa con valores negativos como el de TI 2132 (-4,35E+06) y positivos, lo que indica variaciones en el desempeño.

El 18/6/2024 presenta un incremento en los valores, con TI 2132 logrando el 100% en el valor de su porcentaje correspondiente. Esto indica un avance considerable o una mejora en los procesos.

- **Estabilidad de las Variables:**

Las variaciones diarias podrían señalar una variación en el proceso, lo que podría ser normal o producto de una variación en las condiciones de operación.

Las notables disminuciones en valores negativos en determinadas fechas, como el valor de TI2182 (-1,61E+08 el 16/6/2024) pueden ser alarmantes, señalando un desempeño considerablemente inferior a las expectativas.

- **Porcentaje de eficiencia:**

El índice de eficiencia para TI 2132 y TI 2182 oscila entre el 37% y el 100% en distintas fechas, mostrando una tendencia a mejorar hacia el final (en particular el 18/6/2024, fecha en la que se logra el 100% para TI 2132).

En TI 2182, también se observa un incremento general, llegando al 88,1% el 14/6/2024, lo que indica un rendimiento constante.

- **Evaluación del modelo:**

El coeficiente de determinación  $R^2$  es una herramienta estadística utilizada en modelos de regresión que permite medir cuán eficaz es el modelo para explicar la variabilidad observada en la variable dependiente. Este valor indica qué proporción de la variación total presente en dicha variable puede ser atribuida a las variables independientes incluidas en el modelo.

El valor  $R^2$  es un indicador de la eficacia de adaptación del modelo empleado. Los resultados de  $R^2$  para TI 2132 y TI 2182 señalan que el modelo es bastante aceptable, aunque existe un margen para mejoras. El porcentaje de  $R^2$  del 74,1% para TI 2182 señala un ajuste superior al 67,1% de TI 2132.

El  $R^2$  resulta esencial para medir la calidad del ajuste realizado en el modelo. No obstante, un valor elevado no garantiza que el modelo sea apropiado, dado que señalar podría ser un sobreajuste, en el que el modelo se adecúa de manera excesiva a los datos.

Es recomendable emplear el  $R^2$  ajustado, particularmente en modelos de varias variables, dado que penaliza la inclusión de las que no proporcionan un valor relevante al modelo.

### **Resumen de resultados.**

- Las métricas presentan variaciones considerables a lo largo del tiempo, lo que indica que el proceso o el sistema sufre variabilidad.
- Resultados superiores al concluir el período estudiado, en particular el 18/6/2024, con una eficiencia del 100% en TI 2132.
- El modelo empleado presenta un ajuste moderado con los valores de  $R^2$ , aunque TI 2182 presenta un ajuste un poco más elevado.
- Las variaciones negativas en determinados días indican potenciales áreas de mejora o elementos que afectan de manera adversa el desempeño.

### **Conclusiones.**

- **Necesidad de Optimización:** Las variaciones señalan que todavía hay elementos que inciden en la estabilidad del proceso. Podría resultar beneficioso explorar las razones de los picos negativos y las fluctuaciones.
- **Ajuste del modelo:** Los hallazgos de  $R^2$  indican que el modelo podría ser optimizado para aumentar la exactitud de las proyecciones.

Este análisis proporciona una visión integral del funcionamiento de los sistemas TI 2132 y TI 2182, destacando tanto los progresos como los sectores que podrían necesitar ajustes extra para potenciar el rendimiento global. A través de la ilustración se puede apreciar el análisis de regresión polinómica.

### ***3.3.3.1.2. Análisis de datos múltiple.***

El análisis de datos constituye una herramienta fundamental para comprender el comportamiento de los procesos y optimizar la toma de decisiones estratégicas. En este contexto, la presente investigación profundiza en la evaluación de modelos predictivos basados en técnicas de regresión, orientadas a determinar la relación funcional entre la variable independiente TE 4331 y las variables dependientes TI 2132 y TI 2182. Este enfoque permite identificar patrones de correlación, cuantificar su impacto y generar modelos con alto grado de confiabilidad y aplicabilidad operativa.

A través de una metodología rigurosa y estructurada, se desarrolló la implementación de diversos modelos estadísticos —lineales, logarítmicos, cúbicos y exponenciales— con el propósito de examinar de manera detallada la relación existente entre las variables analizadas. Cada uno de estos modelos fue sometido a un proceso de evaluación exhaustivo para determinar su capacidad explicativa y su ajuste a los datos experimentales. Para ello, se emplearon métricas de validación ampliamente reconocidas, como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error de suma de cuadrados y el análisis de varianza (ANOVA), herramientas que permiten establecer comparaciones objetivas entre las diferentes configuraciones. Este enfoque integral garantiza la selección del modelo más representativo y confiable, fortaleciendo la precisión del estudio y la interpretación de los resultados.

El propósito de este análisis trasciende en la identificación de vínculos entre variables, orientándose hacia una comprensión profunda de su comportamiento conjunto y de las implicaciones que dichos vínculos tienen en la toma de decisiones. La interpretación de los resultados obtenidos permitirá sustentar conclusiones basadas en evidencias empíricas sólidas, brindando a los investigadores y profesionales del sector una base confiable para la formulación de estrategias y la optimización de procesos. A medida que se profundiza en el estudio, se espera que los hallazgos generen aportes significativos tanto para la validación teórica del modelo como para su aplicación práctica, propiciando nuevas líneas de investigación y promoviendo la mejora.

## Figura 5

### Información de red.

Capa de entrada	Factores	1	TE 4331
	Número de unidades <sup>a</sup>		26
Capas ocultas	Número de capas ocultas		1
	Número de unidades en la capa oculta 1 <sup>a</sup>		3
	Función de activación		Tangente hiperbólica
Capa de salida	Variables dependientes	1	TI 2132
		2	TI 2182
	Número de unidades		2
	Método de cambio de escala para las dependientes de escala		Estandarizados
	Función de activación		Identidad
	Función de error		Suma de cuadrados

a. Se excluye la unidad de sesgo

*Nota:* La figura 5 desarrollada en PSPP, aplica normalización de salidas y una función de error cuadrática para optimizar la red. Fuente: Análisis múltiple de resultados Planta ASU.

### Análisis:

- Capa de Entrada:** La red neuronal acoge 26 factores de entrada, siendo la unidad de sesgo la única excluida. Estos elementos se identifican como TE 4331 y son las propiedades que sustentan el modelo. Su volumen indica un grupo de datos multidimensional, en el que cada elemento es esencial para la proyección. Esta capa organiza los datos para su posterior procesamiento.
- Capas Ocultas:** Se establece una única capa oculta de tres unidades, lo que señala un modelo simple y eficaz para el tipo de problema que trata. Las unidades de esta capa emplean la función de activación Tangente hiperbólica (tanh), la cual modifica los valores en un intervalo de -1 a 1, lo que facilita la captura de relaciones no lineales. Este tipo de activación es perfecto para regular las salidas de los nodos y atenuar dificultades como la sobrecarga de valores extremos.

- **Capa de Salida:** La capa de salida tiene 2 unidades, correspondientes a las variables dependientes TI 2132 y TI 2182, configuradas para un esquema de regresión multivariable. Las salidas se normalizan con el fin de estabilizar el entrenamiento y preservar la linealidad, empleando la función de activación identidad. La evaluación del rendimiento utiliza la métrica de error cuadrático, optimizando la precisión predictiva del sistema.

### Conclusión:

La red neuronal tiene una estructura básica pero efectiva, diseñada para modelar relaciones complejas entre las variables de entrada y salida. Su simplicidad la hace adecuada para tareas donde el conjunto de datos no es excesivamente complejo, priorizando eficiencia y facilidad de implementación.

### Figura 6

*Descripción del modelo MOD\_1.*

Nombre de modelo		MOD_1
Variable dependiente	1	TI 2132
	2	TI 2182
Ecuación	1	Lineal
	2	Logarítmico
	3	Inverso
	4	Cuadrático
	5	Cúbico
	6	Compuesto <sup>a</sup>
	7	Potencia <sup>a</sup>
	8	S <sup>a</sup>
	9	Crecimiento <sup>a</sup>
	10	Exponencial <sup>a</sup>
Variable independiente		TE 4331
Constante		Incluido
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos		Sin especificar
Tolerancia para entrar términos en ecuaciones		.0001

a. El modelo requiere que todos los valores no perdidos sean positivos.

*Nota:* La figura 6 desarrollado en PSPP, presenta modelos matemáticos aplicados a datos experimentales, destacando la relación entre una variable dependiente y una variable independiente. Fuente: Análisis múltiple de resultados Planta ASU.

**Análisis:**

- **Modelos Propuestos:** Se presentan diferentes tipos de ecuaciones para modelar los datos. Las alternativas oscilan entre un modelo lineal (1) hasta modelos más complejos como logarítmico (2), inverso (3), cuadrático (4), cúbico (5), compuesto (6), y otros fundamentados en potencia, crecimiento y exponencial. (modelos 7 a 10).

**Variables:**

- Los códigos TI 2132 y TI 2182 representan la variable dependiente, vinculadas con mediciones o indicadores particulares.
- El código TE 4331 identifica la variable independiente, lo que señala que se están empleando diversas variables de entrada para modelar la conexión con la variable dependiente.

**Constantes:** Se indica que el valor constante está "incluido", lo que significa que, en la creación de cada modelo, se considera un término constante que puede modificarse para optimizar la adaptación del modelo a los datos.

**Tolerancia para Entrar Términos en Ecuaciones:** La tolerancia para incluir términos en las ecuaciones es de 0.0001, lo que señala un elevado grado de exactitud en la elección de términos que influyen en el modelo.

**3.3.3.1.3. Procesamiento de variables.**

Se evaluaron diversos modelos de regresión, entre ellos los de tipo lineal, logarítmico, cúbico y cuadrático, utilizando la variable independiente TE 4331 como factor principal de análisis. Cada modelo permitió observar cómo esta variable influye en el comportamiento térmico del sistema, identificando patrones de respuesta y niveles de ajuste diferenciados. Los resultados obtenidos ofrecen una visión comparativa del desempeño estadístico de cada modelo, destacando aquellos con mayor capacidad explicativa y coherencia con los datos experimentales, lo que respalda su aplicabilidad en procesos criogénicos industriales.

**Tabla 6***Análisis de modelos de regresión.*

Descripción del modelo	Resultados obtenidos	Resumen del modelo
Modelo Lineal	<p><b>Resumen del modelo:</b>  R: 0.209  R cuadrado: 0.043  R cuadrado ajustado: 0.030  Error estándar de la estimación: 1.003</p> <p><b>ANOVA:</b>  <math>F(1, 70) = 3.183, p = 0.079</math></p> <p><b>Coefficientes:</b>  TE 4331: <math>B = 0.003, t = 1.775, p = 0.080</math></p>	<p>El modelo lineal presenta una corrección mínima, con un R cuadrado de 0.043, lo que señala que únicamente el 4.3% de la variabilidad en la variable dependiente se atribuye a TE 4331. El coeficiente tiene relevancia marginal (<math>p = 0,080</math>).</p>
Modelo Logarítmico	<p><b>Resumen del modelo:</b>  R: 0.260  R cuadrado: 0.067  R cuadrado ajustado: 0.054  Error estándar de la estimación: 0.560</p> <p><b>ANOVA:</b>  <math>F(1, 70) = 5.062, p = 0.028</math></p> <p><b>Coefficientes:</b>  <math>\ln(\text{TE 4331}): B = 1.131, t = 2.250, p = 0.028</math></p>	<p>El modelo logarítmico muestra un ajuste superior al del modelo lineal, con una R cuadrado de 0.067. La valoración es estadísticamente relevante (<math>p &lt; 0.05</math>), lo que indica que el logaritmo de TE 4331 ejerce una influencia positiva en la variable dependiente.</p>
Modelo Inverso	<p><b>Resumen del modelo:</b>  R: 0.305  R cuadrado: 0.093</p>	<p>El modelo inverso presenta un R cuadrado de 0.093, indicando que el 9.3% de la variabilidad es explicada.</p>

	<p>R cuadrado ajustado: 0.080 Error estándar de la estimación: 0.032</p> <p><b>ANOVA:</b> F (1, 70) = 7.160, p = 0.009</p> <p><b>Coefficientes:</b> 1/TE 4331: B = -1.244, t = -2.676, p = 0.009</p>	<p>La valoración es relevante, indicando que conforme TE 4331 se incrementa, la variable dependiente se reduce.</p>
Modelo Cuadrático	<p><b>Resumen del modelo:</b> R: 0.798 R cuadrado: 0.637 R cuadrado ajustado: 0.627 Error estándar de la estimación: 0.622</p> <p><b>ANOVA:</b> F (2, 69) = 60.601, p &lt; 0.001</p> <p><b>Coefficientes:</b> TE 4331: B = 3.440, t = 10.866, p &lt; 0.001 TE 4331<sup>2</sup>: B = -0.094, t = -10.627, p &lt; 0.001</p>	<p>El modelo cuadrático presenta un ajuste excepcional, con un R cuadrado de 0,637. La relación es relevante, señalando que existe un efecto positivo inicial que se modifica conforme TE 4331 se incrementa.</p>
Modelo Cúbico	<p><b>Resumen del modelo:</b> R: 0.803 R cuadrado: 0.645 R cuadrado ajustado: 0.635 Error estándar de la estimación: 0.616</p> <p><b>ANOVA:</b> F (2, 69) = 62.669, p &lt; 0.001</p> <p><b>Coefficientes:</b> TE 4331: B = 1.880, t = 11.168, p &lt; 0.001 TE 4331<sup>2</sup>: B = -0.002, t = -4.047, p &lt; 0.001 TE 4331<sup>3</sup>: B = 6.057, t = 3.150, p = 0.002</p>	<p>El modelo cúbico exhibe un ajuste excepcional, presentando un R cuadrado de 0.645. La valoración es relevante, lo que indica una complejidad en la conexión entre TE 4331 y la variable dependiente.</p>

---

Modelo Compuesto	<b>Resumen del modelo:</b> R: 0.208 R cuadrado: 0.043 R cuadrado ajustado: 0.029 Error estándar de la estimación: 0.036  <b>ANOVA:</b> F (1, 70) = 3.151, p = 0.080	El modelo compuesto presenta una adaptación parecida al modelo logarítmico, con un R cuadrado de 0,043. Es marginal la significancia (p = 0,080).
------------------	--	---

---

Modelo de Potencia	<b>Resumen del modelo:</b> R: 0.215 R cuadrado: 0.046 R cuadrado ajustado: 0.033 Error estándar de la estimación: 0.032  <b>ANOVA:</b> F (1, 70) = 3.395, p = 0.070	El modelo de potencia exhibe un ajuste moderado, con un R cuadrado de 0.046. La relación tiene una significancia marginal (p = 0,070).
--------------------	--	--

---

Modelo de Crecimiento	<b>Resumen del modelo:</b> R: 0.208 R cuadrado: 0.043 R cuadrado ajustado: 0.029 Error estándar de la estimación: 0.036  <b>ANOVA:</b> F (1, 70) = 3.151, p = 0.080	El modelo de crecimiento presenta una adaptación parecida al modelo compuesto, con un R cuadrado de 0.043 y una significancia marginal de 0.042.
-----------------------	--	--

---

Modelo Exponencial	<b>Resumen del modelo:</b> R: 0.260 R cuadrado: 0.067 R cuadrado ajustado: 0.054 Error estándar de la estimación: 0.560	El modelo exponencial evidencia una mejor adaptación que los modelos lineales y compuestos, presentando un R cuadrado de 0.067 y una significancia estadística.
--------------------	---	---

---

---

**ANOVA:**
 $F(1, 70) = 5.062, p = 0.028$ 


---

Comparación de Modelos	<p><b>Mejor Ajuste:</b> El modelo cúbico muestra el ajuste más adecuado con un R cuadrado de 0.645, siendo el modelo cuadrático el que le sigue con 0.637.</p> <p><b>Significancia:</b> Los modelos cúbicos y cuadráticos son los de mayor relevancia, en cambio, los modelos lineales, compuestos y de potencia poseen relevancia marginal.</p> <p><b>Complejidad:</b> Conforme se progresa hacia modelos de mayor complejidad, se nota un incremento en el ajuste y la significancia, lo que indica que la conexión entre TE 4331 y las variables dependientes no es lineal y podría necesitar modelos más avanzados para reflejar de manera apropiada la dinámica.</p>	<p><b>Conclusión:</b> El estudio cuantitativo de los distintos modelos de regresión revela que los modelos más complejos, como el cúbico y el cuadrático, proporcionan un ajuste y significancia superiores en comparación con los modelos más sencillos. Esto indica que la conexión entre TE 4331 y las variables dependientes es compleja y no lineal, lo que respalda la utilización de modelos avanzados para una mejor interpretación y prevención de los datos.</p>
------------------------	---	--

---

*Nota:* Esta tabla proporciona la relevancia de emplear modelos apropiados para interpretar la complejidad de las relaciones entre variables.

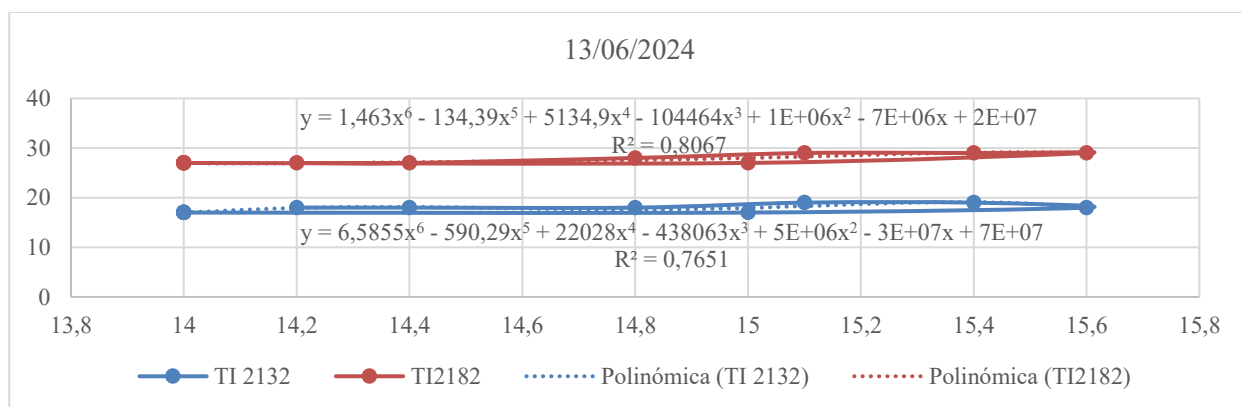
### 3.4. Análisis de los resultados en los datos obtenidos.

#### 3.4.1. Graficación.

Los gráficos presentados en este análisis son representaciones visuales, que demuestran la relación entre las variables de interés, en particular las temperaturas TI 2132 y TI 2182, durante varios días en junio de 2024. Cada gráfico ilustra la progresión de los datos a lo largo del tiempo, facilitando la identificación de tendencias y patrones en el desempeño de la temperatura del sistema de enfriamiento.

### Gráfico 1

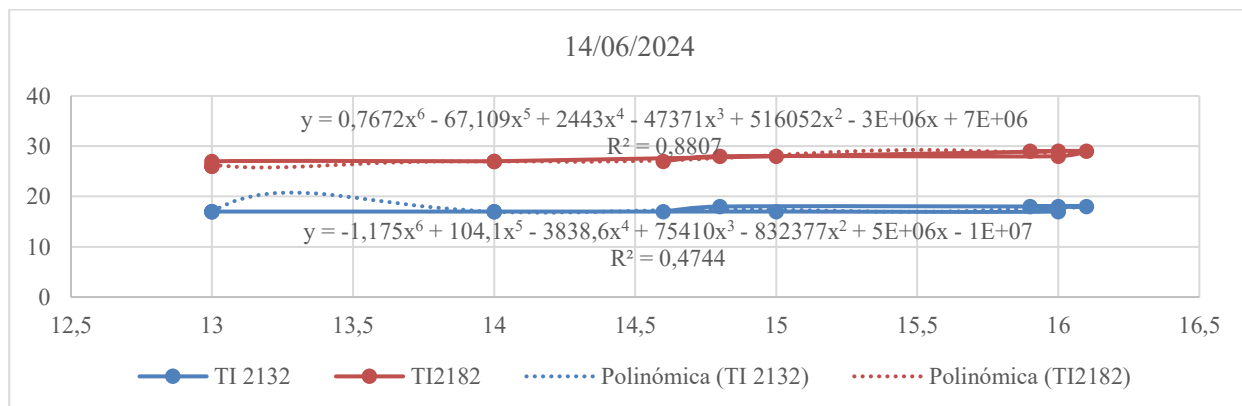
*Análisis de regresión polinómica.*



*Nota:* Gráfico desarrollado en Excel, incluyen las curvas de regresión polinómica, que son ecuaciones matemáticas ajustadas a los datos observados del 13/06/2024.

### Gráfico 2

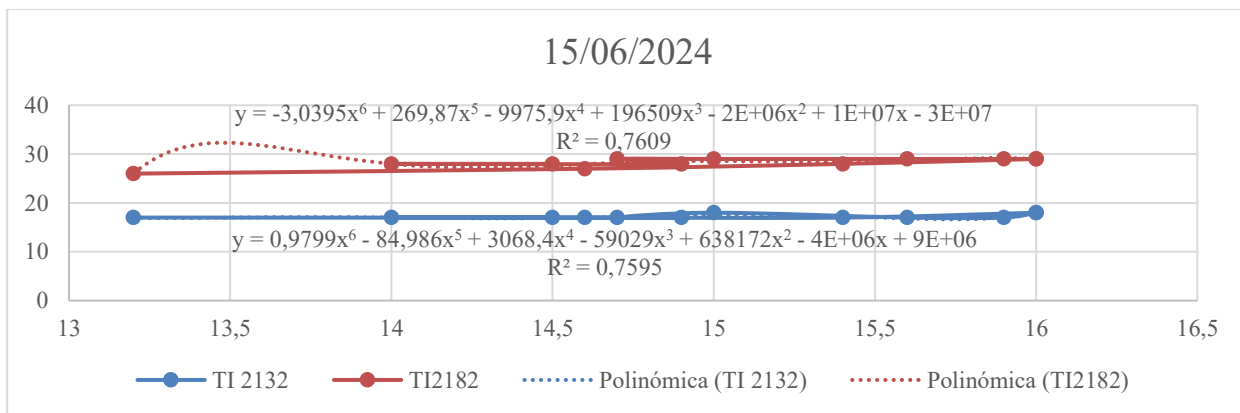
*Análisis de regresión polinómica.*



*Nota:* Gráfico desarrollado en Excel, incluyen las curvas de regresión polinómica, que son ecuaciones matemáticas ajustadas a los datos observados del 14/06/2024.

### Gráfico 3

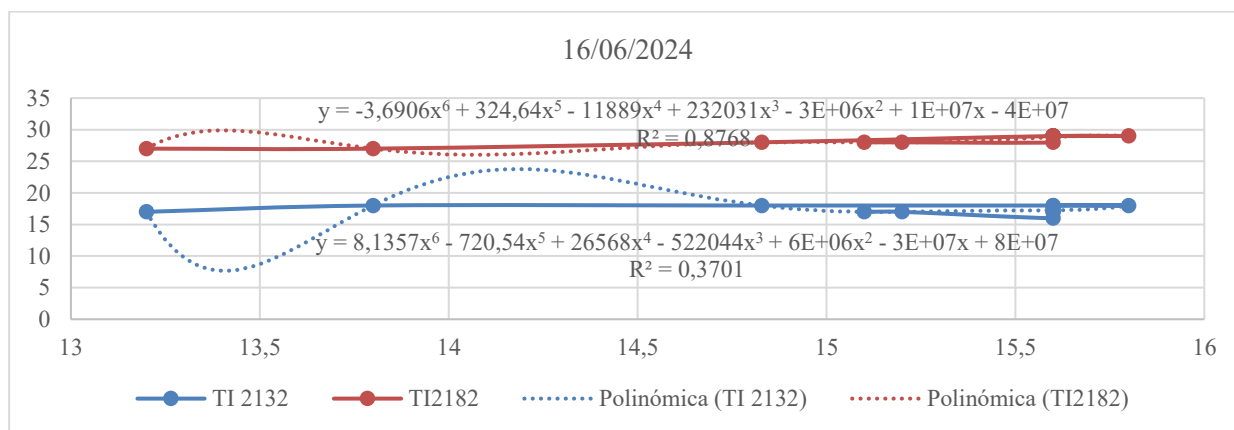
*Análisis de regresión polinómica.*



*Nota:* Gráfico desarrollado en Excel, incluyen las curvas de regresión polinómica, que son ecuaciones matemáticas ajustadas a los datos observados del 15/06/2024.

### Gráfico 4

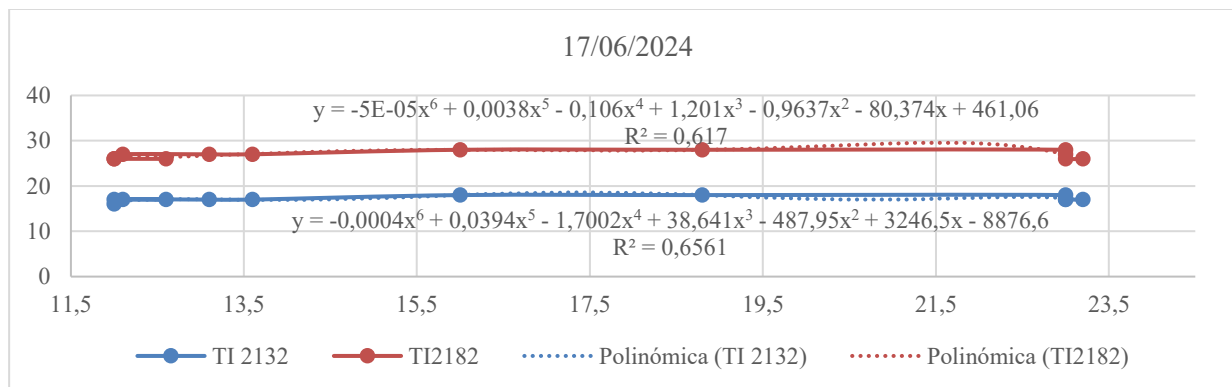
*Análisis de regresión polinómica.*



*Nota:* Gráfico desarrollado en Excel, incluyen las curvas de regresión polinómica, que son ecuaciones matemáticas ajustadas a los datos observados del 16/06/2024.

### Gráfico 5

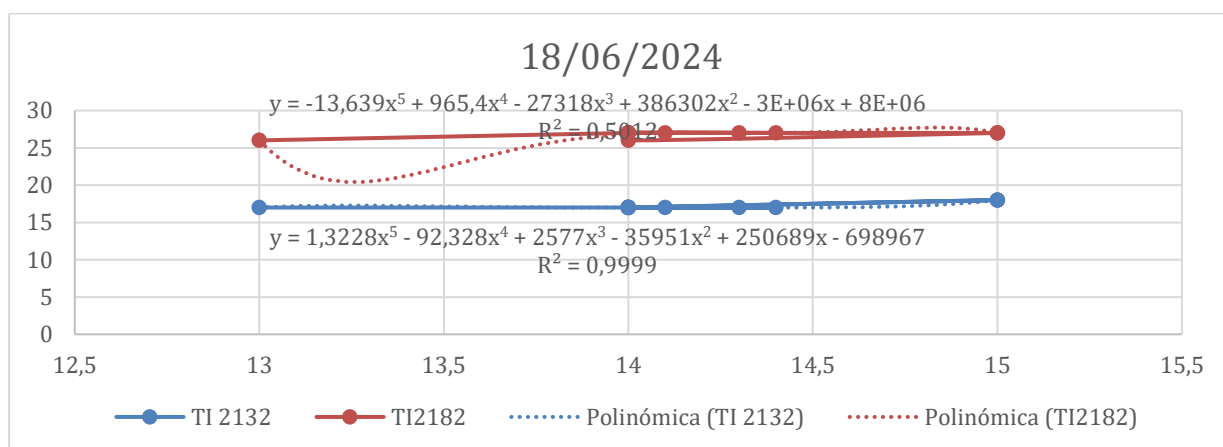
*Análisis de regresión polinómica.*



*Nota:* Gráfico desarrollado en Excel, incluyen las curvas de regresión polinómica, que son ecuaciones matemáticas ajustadas a los datos observados del 17/06/2024.

### Gráfico 6

*Análisis de regresión polinómica.*



*Nota:* Gráfico desarrollado en Excel, incluyen las curvas de regresión polinómica, que son ecuaciones matemáticas ajustadas a los datos observados del 18/06/2024.

**Análisis:**

El análisis efectuado a partir de los gráficos generados mediante la técnica de regresión polinómica permite identificar múltiples aspectos clave respecto al comportamiento térmico de las temperaturas TI 2132 y TI 2182 durante el período evaluado. Los resultados visualizados facilitan la detección de patrones no lineales y variaciones temporales significativas, aportando información detallada sobre la dinámica operativa. Así, el estudio gráfico y estadístico se posiciona como un elemento indispensable dentro del proceso de monitoreo y optimización de los sistemas térmicos analizados.

- **Tendencias Generales:** Los gráficos muestran que ambas temperaturas presentan tendencias distintas en su rendimiento. Por ejemplo, la temperatura TI 2132 parece tener un comportamiento más estable en comparación con TI 2182, que muestra más variabilidad. Esto puede indicar diferencias en la programación, o factores operativos que afectan la producción.
- **Ajuste de los Modelos:** Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) proporcionan información sobre la calidad del ajuste de los modelos polinómicos a los datos. Un  $R^2$  más alto, como el de TI 2182 en ciertos días, sugiere que el modelo polinómico captura mejor la relación entre las variables, lo que implica que las predicciones basadas en este modelo son más confiables. Por otro lado, un  $R^2$  más bajo en algunos modelos indica que hay factores no considerados que podrían estar influyendo en los resultados.
- **Fluctuaciones Diarias:** Al analizar las curvas de regresión, es posible reconocer picos y descensos en la eficiencia operacional. Estos puntos críticos pueden tener relación con sucesos particulares, tales como condiciones meteorológicas desfavorables, variaciones en la demanda productiva. Examinar estos picos puede ofrecer datos útiles para la futura planificación y administración de recursos.
- **Comparación entre curvas:** La comparación de las curvas TI 2132 y TI 2182 posibilita la detección de patrones de comportamiento que pueden ser beneficiosos para la toma de

decisiones estratégicas. Un rendimiento superior de manera constante, podría afectar las decisiones relacionadas con la distribución de recursos.

- **Proyecciones Futuras:** Los modelos polinómicos no solo ayudan a entender el comportamiento pasado, sino que también posibilitan la realización de proyecciones acerca del desempeño futuro. Esto es crucial para la planificación y la optimización de la programación operativa, dado que ofrece un fundamento cuantitativo para prever la demanda y adaptar las operaciones de acuerdo a ello.

### **Conclusión:**

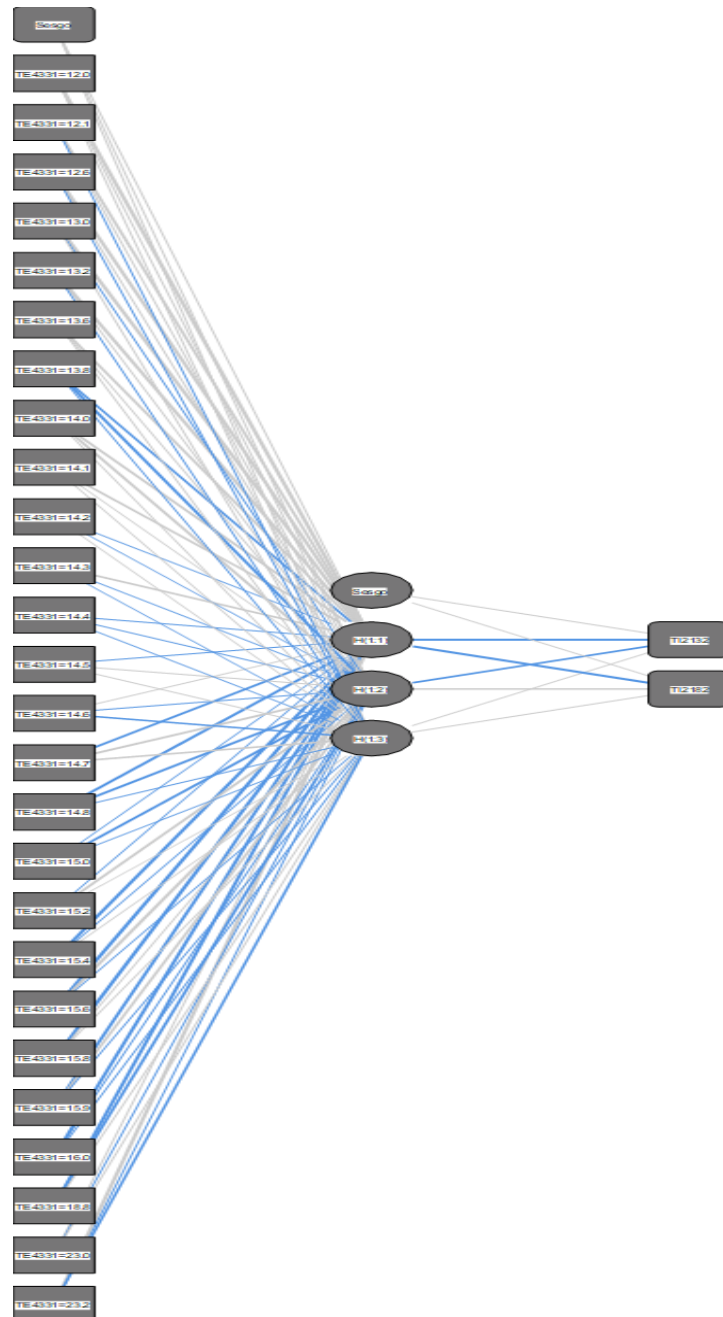
El empleo de representaciones gráficas, junto con un análisis estadístico exhaustivo, posibilita una comprensión integral del comportamiento térmico en los sistemas de enfriamiento denominados TI 2132 y TI 2182. Estas visualizaciones no solo ilustran la variación de las temperaturas en diversos escenarios operativos, sino que también ayudan a identificar patrones, tendencias y desviaciones potenciales en los procesos criogénicos. Mediante la implementación de modelos de regresión polinómica, se logra describir con precisión las relaciones no lineales entre las variables monitorizadas, revelando interacciones que serían difíciles de detectar mediante enfoques tradicionales.

La regresión polinómica se presenta como una herramienta estadística altamente confiable que facilita la comprensión de la compleja dinámica del sistema, proporcionando una perspectiva predictiva sobre su rendimiento bajo diversas condiciones operativas. Este método no solo se enfoca en examinar el comportamiento histórico de las variables, sino que también establece las bases para prever cambios futuros, lo que a su vez mejora la capacidad de planificación y control.

El enfoque metodológico sugerido proporciona una comprensión más detallada del comportamiento térmico y suministra información crucial para la toma de decisiones técnicas y estratégicas. Al incorporarse en un proceso de mejora continua, promueve la optimización del control térmico, aumenta la eficiencia energética y fortalece la estabilidad del sistema, lo que a su vez refuerza la confiabilidad operativa general de la planta criogénica.

**Figura 7**

*Red Neuronal - TE 4331, temperatura, agua de enfriamiento del sistema.*



*Nota:* La figura muestra el ingreso de aire a las unidades de compresión y unidad de enfriamiento de la Planta ASU. Elaboración propia.

## **Análisis:**

### **Capas de la Red Neuronal:**

- **Entrada:** La sección izquierda presenta un conjunto nodos etiquetados (como, "#4831-12"). Estos nodos representan las características o variables de entrada del modelo.
- **Capas Ocultas:** Se pueden apreciar dos capas en el centro con conexiones azules y grises, correspondiendo a diferentes pesos asignados a las neuronas. La función de activación en las capas ocultas es Tangente Hiperbólica.
- **Salida:** Los nodos de salida, situados a la derecha representan clases, valores continuos y categorías dependiendo del problema modelado. Una leyenda indica funciones de activación en la salida, Softmax (para clasificación) o lineal (para regresión).

### **Conexiones y Pesos:**

- Las líneas de color azul y gris entre los nodos representan las relaciones entre las capas. El color puede señalar distintas cifras de pesos o la importancia de cada conexión.

### **Interpretación del Modelo:**

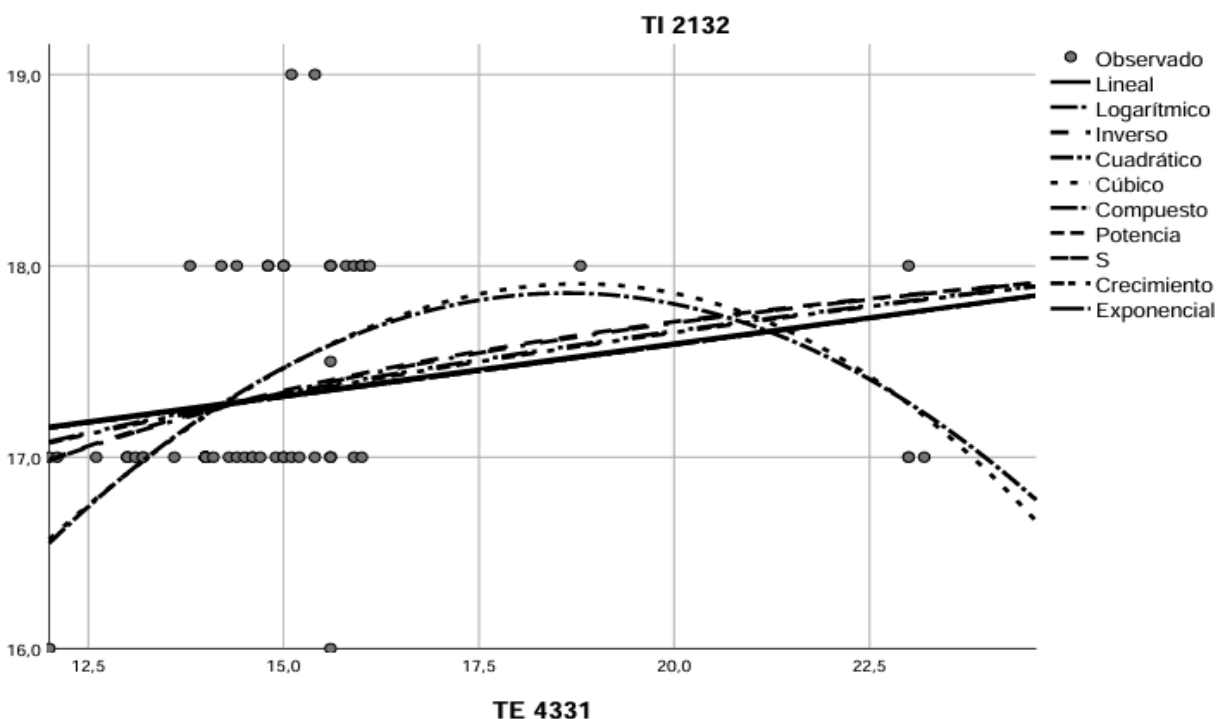
- Se trata de un problema de clasificación, los nodos de salida corresponden a las categorías.
- La estructura indica que la red posee la habilidad de modelar relaciones complejas no lineales debido a la función de activación de la tangente hiperbólica, que facilita la recolección de más información que las funciones lineales.

### **Análisis Crítico:**

- La complejidad de la red necesita ser balanceada con la cantidad de datos a disposición para prevenir el sobreajuste.
- Es importante examinar la distribución de los pesos para asegurar una convergencia adecuada durante el entrenamiento.

## Gráfico 7

Resumen de procesamiento de la variable TI 2132.



*Nota:* El gráfico presenta un análisis de ajuste de datos observados (representados como puntos) con diferentes modelos de regresión (curvas y líneas).

### Análisis:

**Datos Observados (Puntos grises):** Los puntos representan las observaciones reales, que evidencian la variabilidad entre las dos variables.

**Modelos Ajustados:** Las curvas ajustadas están relacionadas con diferentes modelos de ajuste de datos:

- Lineal (línea continua): Muestra una conexión lineal entre ambas variables.

- Logarítmico (línea discontinua con puntos): El modelo logarítmico modifica los datos de tal forma que la compensación entre las variables se intensifica inicialmente y posteriormente se alarga conforme "TE 4331" se incrementa.
- Inverso (línea con guiones cortos): Indica una aceleración inversamente proporcional, en la que el incremento de "TE 4331" provoca una reducción en "TI 2132".
- Cuadrático (línea con guiones largos): Este modelo ilustra una relación de segundo grado, donde el vínculo entre las variables podría presentar una curvatura con un punto de cambio.
- Cúbico (línea con guiones y puntos): Presenta una relación de tercer grado que podría experimentar más oscilaciones y variaciones en la tendencia.
- Compuesto (línea gruesa y continua): Por lo general, un modelo compuesto fusiona diversas clases de relaciones, y su adaptabilidad puede adaptarse de manera más efectiva a los datos complejos.
- Potencia (línea fina y continua): Este modelo también se alinea con una relación de potencia, que frecuentemente supone que uno de los términos se incrementa a un ritmo proporcional al otro.
- S (línea de guiones grandes): Presenta una forma sigmoidea, que puede señalar un incremento o disminución restringida por un límite.
- Crecimiento (línea de puntos cortos): Significa un modelo que ilustra un desarrollo acelerado, parecido al comportamiento exponencial, pero más suavizado.
- Exponencial (línea gruesa y discontinua): Este modelo es apropiado para ilustrar un crecimiento o declive exponencial, en el que una variación en "TE 4331" repercute significativamente en "TI 2132".

### **Interpretación:**

- **Comportamiento de los datos observados:** Los puntos presentan una tendencia que al principio parece estable, con una leve tendencia hacia el crecimiento a medida que "TE 4331" se expande, pero no se percibe una magnitud lineal evidente debido a la curvatura observada.
- **Modelos adecuados:** A primera impresión, los modelos logarítmico y cuadrático parecen adaptarse de manera más efectiva a la información recogida, dado que representan la

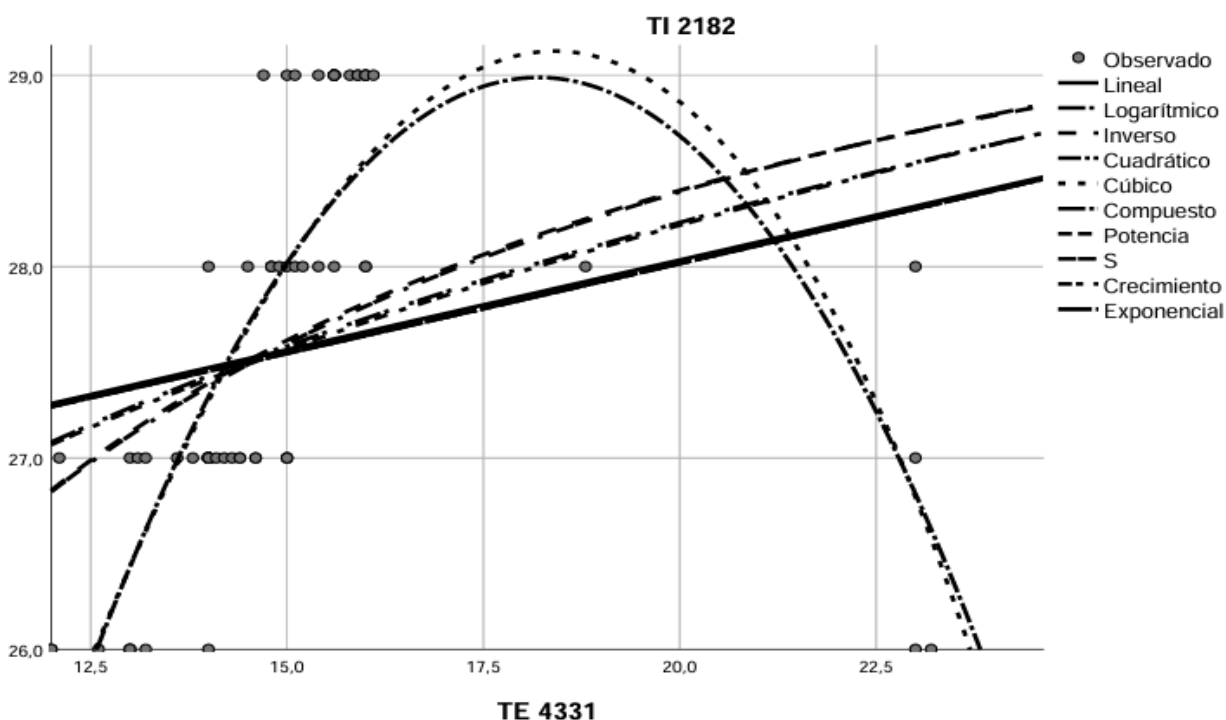
curvatura perceptible en los puntos. El modelo exponencial podría ser apropiado también si la relación evidenciara un incremento rápido hacia el final.

- Modelos con peor ajuste: Los modelos lineales e inversos parecen ser menos apropiados para estos datos, dado que no consiguen reflejar adecuadamente la curvatura y las variaciones graduales en los datos que se observan.

Este tipo de análisis resulta beneficioso para seleccionar el modelo correcto que pueda explicar con mayor exactitud la correlación entre las dos variables y, en consecuencia, realizar proyecciones más fiables. El modelo más apropiado se basará en el tipo preciso de la conexión entre las variables.

### Gráfico 8

*Resumen de procesamiento de la variable de T1 2182.*



*Nota:* El gráfico presenta un análisis de ajuste de datos observados (representados como puntos) con diferentes modelos de regresión (curvas y líneas).

### **Análisis:**

**Datos Observados (Puntos grises):** Los puntos grises representan las observaciones reales realizadas, evidenciando la distribución de ambas variables.

**Modelos Ajustados:** Las curvas se refieren a las diversas funciones que buscan representar la conexión entre las dos variables:

- **Lineal (línea continua):** Modificación fundamental que persigue una relación lineal entre las variables.
- **Logarítmico (línea discontinua con puntos):** Representa una variación logarítmica en la que los aumentos en "TE 4331" se asocian con un cambio reducido en "TI 2182" conforme la variable "TE 4331" se incrementa.
- **Inverso (línea con guiones cortos):** Este modelo ilustra una relación inversamente proporcional, conforme "TE 4331" se incrementa, "TI 2182" se reduce.
- **Cuadrático (línea con guiones largos):** En este caso, el ajuste presenta una relación de segundo grado polinómico, con una curva que podría presentar un mínimo o máximo.
- **Cúbico (línea con guiones y puntos):** Este modelo presenta una conducta más sofisticada, permitiendo oscilaciones en la curva, lo que puede indicar posibles alteraciones más significativas en la relación.
- **Compuesto (línea gruesa y continua):** Normalmente se fusionan diversos términos para un ajuste más adaptable que puede acoger variaciones en los datos que no se adaptan a un único tipo de modelo.
- **Potencia (línea fina y continua):** Al igual que el modelo logarítmico, pero utilizando una relación de potencia en vez de logaritmos.
- **S (línea de guiones grandes):** Indica una curva de tipo sigmoide, que podría señalar un comportamiento de saturación o crecimiento restringido.
- **Crecimiento (línea de puntos cortos):** Probablemente presenta un modelo que ilustra un crecimiento exponencial o algo parecido, con un incremento acelerado de "TI 2182".
- **Exponencial (línea gruesa y discontinua):** Un modelo tradicional de expansión o disminución exponencial.

### **Interpretación:**

El gráfico indica que diversos modelos buscan entender la conexión entre las dos variables. Según la adaptación de los modelos a los datos obtenidos, algunos podrían ser más apropiados que otros para caracterizar el comportamiento de las variables.

- **Modelos más adecuados:** Si se observa una tendencia de crecimiento en la relación entre "TI 2182" y "TE 4331", el modelo exponencial o de crecimiento podría ser más adecuado.
- **Modelos con mejor ajuste visual:** Se podría notar que el modelo cuadrático o cúbico se adapta adecuadamente a los puntos detectados, particularmente si se detectan fluctuaciones en la relación entre las variables.

Este tipo de análisis se emplea frecuentemente en investigaciones de regresión, con el objetivo de encontrar el modelo que mejor represente los datos y pueda anticipar el comportamiento futuro de las variables implicadas.

### **3.5. Redacción de resultados y discusión.**

Este análisis se centra en determinar el flujo necesario para mantener la temperatura dentro del rango de funcionamiento previsto, utilizando la relación básica de transferencia de calor.

La determinación del flujo másico se fundamenta en la transformación del caudal volumétrico en términos de masa, teniendo en cuenta la densidad del agua. Estos valores facilitan la valoración exacta de las demandas de refrigeración y la optimización del diseño del sistema. Para asegurar una eficacia en el funcionamiento, resulta crucial elegir correctamente los chillers, intercambiadores de calor y sistemas de aislamiento que sean capaces de manejar la carga de calor presente.

#### ***3.5.1. Estimación del caudal de Chiller.***

Para determinar el caudal de Chiller necesario para mantener la temperatura en el rango de operación, se puede usar la siguiente relación:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde:

- Q es la carga térmica (kW)
- m es el caudal másico (kg/s)
- Cp es la capacidad calorífica del agua (aproximadamente 4.184 kJ/kg\*°C)
- ΔT es la diferencia de temperatura requerida (°C)

### 3.5.2. Metodología para el cálculo del caudal másico.

#### 1. Convertir el caudal volumétrico a caudal másico:

Densidad aproximada del agua: 1000 kg/m<sup>3</sup>

Caudal volumétrico: 163 m<sup>3</sup>/h = (163/3600h/s) m<sup>3</sup>/h = 0.045278 m<sup>3</sup>/s

Caudal másico = (densidad\*caudal): (0.045278 m<sup>3</sup>/s) \* (1000 kg/m<sup>3</sup>) = 45.278 kg/s

#### 2. Determinar la carga térmica:

Suponiendo que se requiere mantener una temperatura constante alrededor de los 14 °C.

Si se considera que el agua entra al sistema a una temperatura superior (por ejemplo, 20 °C), entonces:

$$\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{requerida}} = 20 - 14 = 6 \text{ °C}$$

Carga térmica:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = (45.278) \cdot (4.184) \cdot (6)$$

$$Q = 1136.65 \text{ kW}$$

Ahora bien, si se quiere analizar el mínimo cambio de temperatura ( $\Delta T = 1$ ), es decir la carga térmica por cada grado de diferencia de temperatura, la carga térmica sería:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = (45.278) \cdot (4.184) \cdot (1)$$

$$Q = 189.44 \text{ kW}$$

Por lo tanto, para mantener la temperatura del agua en el rango requerido, se necesita un caudal másico de 45.278 kg/s y la carga térmica requerida es de 189.44 kW por cada grado de diferencia de temperatura por encima de la considerada eficiente para el sistema. Esto tiene varias implicaciones importantes, para considerar:

**Dimensionamiento de los equipos:** La planta necesita equipos de enfriamiento capaces de manejar esta carga térmica. Esto incluye chillers, intercambiadores de calor y sistemas de aislamiento adecuados para mantener las bajas temperaturas necesarias.

**Consumo energético:** Mantener una carga térmica de esta magnitud implica un consumo significativo de energía, y se requiere mantener la eficiencia energética para reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental.

### ***3.5.3. Vinculación del Análisis con los Objetivos de Estudio.***

#### **1. Identificación de procesos críticos en la cadena de valor de Indura Ecuador.**

El análisis del flujo térmico y la determinación del caudal másico en el sistema de enfriamiento de Indura Ecuador facilitan la identificación de un proceso crítico en la cadena de valor de la producción criogénica. La mejora de la eficiencia de los chillers e intercambiadores de calor emerge como un punto clave para optimizar la funcionalidad y disminuir los gastos en energía. Una correcta administración de este sistema garantiza la calidad del producto final criogénico y reduce el desperdicio de recursos.

#### **2. Diagnóstico de la situación actual de la gestión de proyectos y oportunidades de mejora con filosofía LEAN.**

El uso de la filosofía LEAN en la gestión de proyectos de Indura Ecuador se puede potenciar al evaluar la eficiencia del sistema de refrigeración. Los resultados obtenidos permiten detectar desperdicios en el consumo energético y en la selección de equipos. Implementar mejoras en la gestión de la carga térmica contribuirá a una producción más eficaz y sustentable.

### **3. Caracterización de la naturaleza y alcance de los proyectos en fase productiva.**

Es esencial el cálculo del flujo másico y la carga térmica para describir las necesidades operativas de los proyectos en etapa de producción de la industria criogénica. La capacidad de los equipos de refrigeración influye en la estabilidad del proceso de producción, garantizando que se alcancen las condiciones de temperatura requeridas. Este estudio facilita la definición de directrices técnicas para la elección de tecnologías apropiadas para el funcionamiento.

### **4. Diseño de una metodología para la gestión de proyectos en fase productiva con filosofía LEAN.**

Los datos obtenidos al calcular la carga térmica y el flujo másico pueden ser incorporada en una metodología de gestión de proyectos bajo la filosofía LEAN. La eliminación de ineficiencias en el sistema de enfriamiento ayudará a disminuir desperdicios energéticos y mejorar la productividad. La metodología debe contemplar parámetros para la mejora del diseño de equipos, control de la temperatura y eficacia en las operaciones.

### **Conclusión.**

El estudio del flujo térmico y la evaluación del caudal son fundamentales para vincular los aspectos técnicos del proceso con los objetivos generales de la investigación. Estos elementos permiten analizar el rendimiento energético del sistema e identificar posibles ineficiencias que podrían comprometer la estabilidad operativa. La integración de metodologías LEAN en la gestión de proyectos industriales fomenta una perspectiva holística centrada en la eliminación de desperdicios, la mejora continua y el uso eficiente de los recursos disponibles. Esta combinación de enfoques facilita decisiones informadas basadas en datos concretos y evidencia técnica, lo que refuerza el control sobre los procesos productivos. Los hallazgos de este análisis no solo ayudan a aumentar la eficiencia energética, sino que también promueven la sostenibilidad y competitividad de la planta criogénica de Indura Ecuador, estableciendo un modelo de gestión más moderno, responsable y conforme a los estándares de excelencia industrial.

## **CAPÍTULO IV: Propuesta de Transformación.**

Este capítulo representa un avance significativo en la consolidación del proyecto denominado "Metodología para la gestión de proyectos en fase productiva bajo la filosofía LEAN, que mejore la eficiencia de los procesos productivos en la industria criogénica, de la empresa Indura Ecuador en el año 2025". En esta sección se introduce la implementación de un protocolo preliminar cuyo objetivo principal consiste en validar la precisión y relevancia de los instrumentos diseñados para la obtención de datos, asegurando así su adecuada aplicación en la etapa final del estudio.

La ejecución de una prueba piloto es indispensable para identificar limitaciones, detectar posibles fallas y proponer mejoras en el proceso operativo de la Planta ASU, así como en las herramientas metodológicas empleadas. Esta fase permite garantizar que la información recopilada sea representativa, confiable y relevante para los objetivos investigativos planteados. Se detalla la planificación, ejecución y evaluación de dicha prueba, resaltando las repercusiones prácticas de los ajustes derivados de los resultados obtenidos. Este procedimiento fortalece tanto la validez de los instrumentos de investigación como la base metodológica, lo que contribuye a incrementar la precisión, robustez y confiabilidad del análisis que se llevará a cabo en los capítulos posteriores.

La relevancia de este proceso radica en su capacidad para asegurar la calidad del estudio a través de la optimización de las técnicas de recolección y análisis de datos, elementos críticos para el éxito del proyecto en un contexto industrial altamente especializado y exigente. Así, se establece un fundamento metodológico sólido que permitirá una interpretación adecuada y fidedigna de los hallazgos, integrando criterios científicos rigurosos y mejores prácticas en gestión de proyectos productivos.

### **4.1. Fundamentación de la propuesta de transformación.**

La administración de proyectos durante la fase productiva representa un pilar fundamental en la dirección estratégica de operaciones industriales, ya que implica la coordinación precisa de

actividades orientadas a cumplir con los objetivos definidos en alcance, calidad, costo y plazo (Project Management Institute PMI, 2021). En sectores especializados como el criogénico, donde los procesos están sujetos a rigurosos estándares de seguridad, eficiencia energética y exactitud técnica, es esencial emplear metodologías ágiles y flexibles que garanticen resultados sostenibles en el tiempo.

En este sentido, la filosofía LEAN se consolida como un enfoque eficaz para mejorar los procesos productivos mediante la eliminación sistemática de desperdicios (muda), la estandarización de flujos y la generación constante de valor desde la perspectiva del cliente (Womack & Jones, 2003). Aunque inicialmente orientada a la manufactura automotriz, su aplicación se ha extendido a industrias técnicamente complejas como la producción de gases industriales, donde es necesaria una integración dinámica de tecnología avanzada y gestión humana (Liker, 2021).

Para diseñar una metodología de gestión basada en LEAN, se propone un modelo multinivel que comprende tres dimensiones: estratégica, táctica y operativa. En el ámbito estratégico, se establecen metas de valor conectadas a indicadores clave de desempeño; en el nivel táctico, se reestructuran los procesos productivos apoyándose en herramientas LEAN; y en la dimensión operativa, se implementan acciones de mejora continua bajo el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), asegurando retroalimentación efectiva y capacidad de adaptación rápida (Kerzner, 2022). Esta estructura fomenta una cultura organizacional orientada hacia la colaboración proactiva y la consecución de resultados medibles, consolidando la sinergia entre liderazgo, recursos y capacidades técnicas.

El caso de Indura Ecuador constituye un contexto propicio para la validación del modelo propuesto, dado su entorno industrial que se distingue por elevados estándares tecnológicos y normativos. En esta compañía, se han detectado consumos energéticos que superan los valores óptimos esperados, así como restricciones en la trazabilidad y el control de ciertos procesos operativos. Estas circunstancias transforman a la planta en un laboratorio práctico para implementar metodologías de mejora continua fundamentadas en LEAN y análisis estadístico avanzado. Esto facilita la optimización de la gestión térmica, la reducción de pérdidas, el incremento de la eficiencia global y el fortalecimiento de la sostenibilidad operativa dentro de un marco regulatorio riguroso.

## **4.2. Estructura de la propuesta de transformación.**

### **4.2.1. Tema.**

"Metodología de gestión de proyectos en fase productiva basada la filosofía LEAN, que integre herramientas estadísticas, para la optimización del desempeño térmico, la eficiencia energética en los procesos industriales criogénicos de Indura Ecuador, año 2025."

### **4.2.2. Objetivos de la Propuesta.**

#### **4.2.2.1. Objetivo general de la Propuesta.**

Diseñar una metodología de gestión de proyectos en fase productiva, basada en la filosofía LEAN, integrada con herramientas estadísticas, orientada a la optimización del desempeño térmico y la productividad en los procesos industriales criogénicos de Indura Ecuador, año 2025.

#### **4.2.2.2. Objetivos Específicos de la Propuesta.**

- Analizar el estado actual del desempeño térmico de la planta ASU, identificando ineficiencias, desperdicios energéticos y oportunidades de mejora en la fase productiva a través del estudio de datos operativos.
- Desarrollar modelos estadísticos aplicables a la evaluación y control de variables térmicas críticas, integrando métodos de control estadístico de procesos, análisis multivariante y modelado predictivo.
- Validar la metodología propuesta a través una aplicación piloto en un proyecto productivo de la planta ASU, evaluando su impacto en indicadores fundamentales como eficiencia térmica, disminución de desperdicios, fiabilidad operativa y tiempo de respuesta a variaciones del proceso.

### **4.2.3. Representación Teórica y/o Práctica (mediante un esquema lógica).**

La investigación desarrollada propone y valida un marco metodológico integral para la gestión de proyectos enfocados en entornos productivos, basado en la combinación de técnicas

avanzadas y sistemas inteligentes de instrumentación. Su objetivo es optimizar el desempeño térmico de las unidades de separación de aire (ASU), alineado con los principios de la filosofía LEAN.

### Esquema lógico de la metodología propuesta.

**Tabla 7**

*Detalle de la metodología.*

Fase	Actividades Clave	Herramientas/Recursos	Principios LEAN aplicados
Diagnóstico	Mapeo térmico, definición de KPIs	VSM, análisis de datos históricos	Identificación de desperdicios
Instrumentación	Sensorización, integración SCADA/IIoT	Sensores inteligentes, SCADA	Monitoreo en tiempo real, Jidoka
Análisis	CEP, modelado predictivo	Estadística avanzada, software analítico	Solución de problemas basada en datos (Genchi Genbutsu)
Optimización	Rediseño procesos, eventos Kaizen	PDCA, talleres Kaizen	Eliminación de muda, mejora continua
Seguimiento	Dashboard capacitaciones	KPIs, Plataformas de formación	Empowerment, estandarización

*Nota:* Elaboración propia.

#### 4.2.4. Fases y/o etapas.

##### **Diagnóstico operacional (Fase 1).**

**Objetivo:** Identificar problemas y oportunidades de mejora en la gestión de proyectos productivos.

- Mapeo de procesos actuales (Value Stream Mapping – VSM).

- Análisis de indicadores: eficiencia térmica, paradas, tiempos de cambio, calidad.
- Detección de “mudas”: tiempos muertos, reprocesos, sobreproducción, inventarios.
- Encuestas y entrevistas a personal técnico y gerencial.

Resultado esperado: Línea base operativa y puntos críticos de intervención Lean.

### **Diseño de la metodología LEAN (fase II).**

**Objetivo:** Construir una metodología adaptable al entorno ASU con enfoque LEAN.

**Tabla 8**

*Diseño de la Metodología LEAN.*

FASE	DESCRIPCIÓN	HERRAMIENTAS
1. Planificación	Definición del proyecto, objetivos y alcance	A3 Project Sheet, Matriz SIPOC
2. Diagnóstico del flujo de valor	Análisis del proceso actual	VSM, Gemba Walk
3. Diseño del flujo mejorado	Propuesta LEAN del proceso objetivo	Kaizen, Just in Time, Poka-Yoke
4. Ejecución y control	Implementación de mejoras	Kanban, Andon, Indicadores LEAN
5. Cierre y mejora continua	Evaluación de resultados y retroalimentación	PDCA, Lecciones aprendidas

*Nota:* Elaboración propia.

### **Integración con tecnología y estadística (fase III).**

**Objetivo:** Aumentar la precisión y confiabilidad de los procesos mediante herramientas inteligentes.

- Integración de instrumentación inteligente para monitoreo térmico, flujo, presión.
- Aplicación de control estadístico de procesos (CEP/SPC).

- Uso de dashboards e indicadores visuales para la toma de decisiones.

#### **Validación piloto y ajuste (fase IV).**

**Objetivo:** Probar la metodología en un proyecto real de la planta ASU.

- Selección de un proyecto en ejecución o planificado (optimización de ciclos de enfriamiento).
- Evaluación mediante indicadores clave (KPI): eficiencia, reducción de desperdicios.
- Revisión de hallazgos, retroalimentación y ajustes.

#### **Plan de implementación escalable (fase V).**

**Objetivo:** Establecer un modelo sostenible para gestionar futuros proyectos bajo enfoque LEAN.

- Capacitación y desarrollo del talento humano.
- Estandarización de procedimientos.
- Integración del modelo a la cultura organizacional.

#### **4.2.5. Acciones y/o actividades (vinculadas a las fases o etapas).**

Acciones y Actividades por Fase en la Gestión de Proyectos Productivos con Enfoque LEAN.

##### **FASE I: Diagnóstico Operacional.**

**Objetivo:** Identificar áreas problemáticas y oportunidades de mejora en la administración de proyectos productivos.

Los hallazgos obtenidos en la sección prueba piloto facilitó la evaluación del sistema productivo a través de tres actividades principales: el mapeo de procesos para observar flujos y tiempos; el estudio de indicadores centrado en la eficiencia y calidad; y la detección de desperdicios vinculados a reprocesos e inventarios. Estos resultados respaldan propuestas de mejora enfocadas en la eficiencia operativa y la aplicación de principios LEAN.

## FASE II: Diseño de la Metodología Lean.

**Objetivo:** Desarrollar un enfoque metodológico adaptado al entorno ASU basado en los principios LEAN.

**Tabla 9**

*Estructura Metodológica Propuesta.*

Fase	Descripción	Herramientas
1. Planificación	Definir proyecto, objetivos y alcance	A3 Project Sheet
2. Diagnóstico del flujo de valor	Analizar los procesos actuales	VSM
3. Diseño del flujo mejorado	Formular la propuesta de optimización LEAN	Kaizen, Just in Time
4. Ejecución y control	Implementar mejoras y seguimiento	Kanban, Andon, Indicadores LEAN
5. Cierre y mejor continua	Evaluar resultados	PDCA, Lecciones aprendidas

*Nota:* Elaboración propia.

## FASE III: Integración con Tecnología y Estadística.

**Objetivo:** Mejorar la precisión y confiabilidad de los procesos mediante la adopción de herramientas inteligentes y análisis estadístico.

- **Acciones Clave.**

Integración de instrumentación inteligente, implementación de sensores para monitorear variables críticas como temperatura, presión y flujo en tiempo real.

- **Control estadístico de procesos (CEP).**

Uso sistemático de técnicas estadísticas para supervisar, controlar y mejorar los procesos de producción.

#### **FASE IV: Validación Piloto y Ajuste.**

**Objetivo:** Testear la metodología LEAN desarrollada en un entorno real, permitiendo ajustes y mejoras.

- **Actividades Esenciales:**

Selección de un proyecto piloto en la planta (optimización de ciclos de enfriamiento).

#### **FASE V: Plan de Implementación Escalable.**

**Objetivo:** Construir un modelo sostenible para replicar la gestión LEAN en proyectos futuros.

- **Estrategias Principales.**

Capacitación y desarrollo del equipo humano.

Formación sistemática sobre herramientas LEAN y mentalidad de mejora continua.

- **Estandarización de procedimientos:**

Establecer y formalizar procedimientos y rutinas detalladas para garantizar su correcta réplica y sostenibilidad a lo largo del tiempo.

*Nota:* Las actividades de cada fase deben ajustarse al contexto específico de la planta ASU, resaltando el papel fundamental del compromiso activo del equipo y el aprendizaje continuo como pilares para lograr una transformación operativa exitosa.

#### ***4.2.6. Selección de métodos, técnicas e instrumentos para su aplicación.***

La implementación de los instrumentos descritos en este capítulo permitió corroborar un enfoque cuantitativo-experimental mediante análisis multivariados e inferenciales para evaluar la gestión térmica en la planta ASU de Indura Ecuador bajo condiciones operativas reales. Destaca la aplicación de regresión múltiple y no lineal para relacionar variables térmicas, consumo y eficiencia, además del control estadístico de procesos (CEP/SPC) para monitoreo en tiempo real. La incorporación de bitácoras y listas estandarizadas robustece la contextualización metodológica y confirma la pertinencia operativa, asegurando la coherencia y rigor de los resultados.

#### ***4.2.7. Recursos para su funcionamiento.***

La propuesta contempla el diseño de una unidad de enfriamiento acompañada de una metodología de gestión aplicada a la fase productiva, que combina principios de la filosofía LEAN con el uso de herramientas estadísticas e instrumentación inteligente. Este enfoque busca mejorar la eficiencia térmica y energética de la Planta ASU de Indura Ecuador mediante la reducción de pérdidas, la optimización de recursos y el fortalecimiento del control operacional. Además, pretende establecer un modelo sostenible de mejora continua que permita elevar la productividad, asegurar la estabilidad del proceso y garantizar la calidad en los resultados industriales obtenidos.

##### **A partir de los resultados estadísticos:**

- Control estadístico para TI-5801: media 39,680 °C; LCL 38,165 °C; UCL 41,195 °C, sin puntos fuera de control, lo que indica estabilidad estadística del proceso térmico en ese lazo.
- Regresión múltiple para predecir TI-5801:  $R^2 = 0,947$ , con coeficientes B: constante  $-7,666$ ; TI-2510 = 0,948; TI-5870 = 0,045, todos significativos ( $p \approx 0$ ). El modelo queda:

**Figura 8**

*Resultado de análisis múltiple para la temperatura (TI-5801).*

		<b>Coefficientes<sup>a</sup></b>				
		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados		
Modelo		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	-7,666	,314		-24,393	,000
	TI-2510_1	,948	,010	,931	92,224	,000
	TI-5870_1	,045	,009	,049	4,854	,000

*Nota:* El gráfico corresponde al modelo de regresión múltiple: coeficientes, significancia y errores estándar. Fuente: Resultados Análisis múltiple para TI-5801.

$$\mathbf{TI-5801 = -7.666 + 0.948 (TI-2510) + 0.045 (TI-5870)}$$

Esto cuantifica la sensibilidad de TI-5801 respecto a TI-2510 y TI-5870.

- Correlaciones: TI-5801 presenta correlación positiva fuerte con TI-2510 ( $r \approx 0,941$ ) y TI-5870 ( $r \approx 0,859$ ), apoyando el modelo lineal.
- Red neuronal (MLP): arquitectura con 2 entradas (TI-2510, TI-5870), 3 neuronas ocultas (tanh) y salida lineal, entrenada con 56 casos y probada con 11;  $R^2$  de prueba  $\approx 0,89$ , validando no linealidad suave y reforzando la robustez de la relación explicativa.

Se propone una unidad modular de enfriamiento, afectada por TI-5801, que opera bajo un control predictivo y retroalimentación con puntos de ajuste derivados de límites de control y mapas de respuesta. Su diseño busca reducir tiempos muertos y sobre enfriamientos, estabilizar el approach térmico del intercambiador crítico y optimizar la capacidad de separación criogénica.

### Marco conceptual mínimo.

- Filosofía LEAN en ASU: eliminar mudas (sobre procesos de enfriamiento, inventario térmico, esperas por estabilización), nivelar carga térmica (heijunka térmico), y diseñar jidoka: el sistema se “autonomiza” para detectar y corregir desviaciones térmicas.
- Métricas térmicas clave: Approach del intercambiador ( $\Delta T_{\text{approach}}$ ): diferencia entre la temperatura de salida del proceso y el medio frío en el pinch local.

**Índices de capacidad:** CpK, Cpk sobre TI-5801 y variables auxiliares (TI-2510 / 5870).

- Modelos: regresión múltiple (lineal) y MLP (no lineal suave) para prescribir setpoints y capacidad de enfriamiento.

### Diagnóstico estadístico del estado actual.

- Control estadístico (TI-5801, TI-2510):  
**TI-5801:**  $\bar{X} = 39,680$  °C; LCL = 38,165 °C; UCL = 41,195 °C. No hay puntos fuera de control. Meta de diseño: mantener el lazo dentro de [38,2; 41,2] °C con mínima variabilidad.  
**TI-2510:**  $\bar{X} = 48,650$  °C; LCL = 48,166 °C; UCL = 49,134 °C. Esto sirve como ventana operativa para el setpoint maestro del tren de enfriamiento que afecta TI-5801.
- Modelo prescriptivo: Regresión múltiple.

$$\text{TI-5801} = -7.666 + 0.948 (\text{TI-2510}) + 0.045 (\text{TI-5870}); R^2 = 0.947$$

Implicaciones:

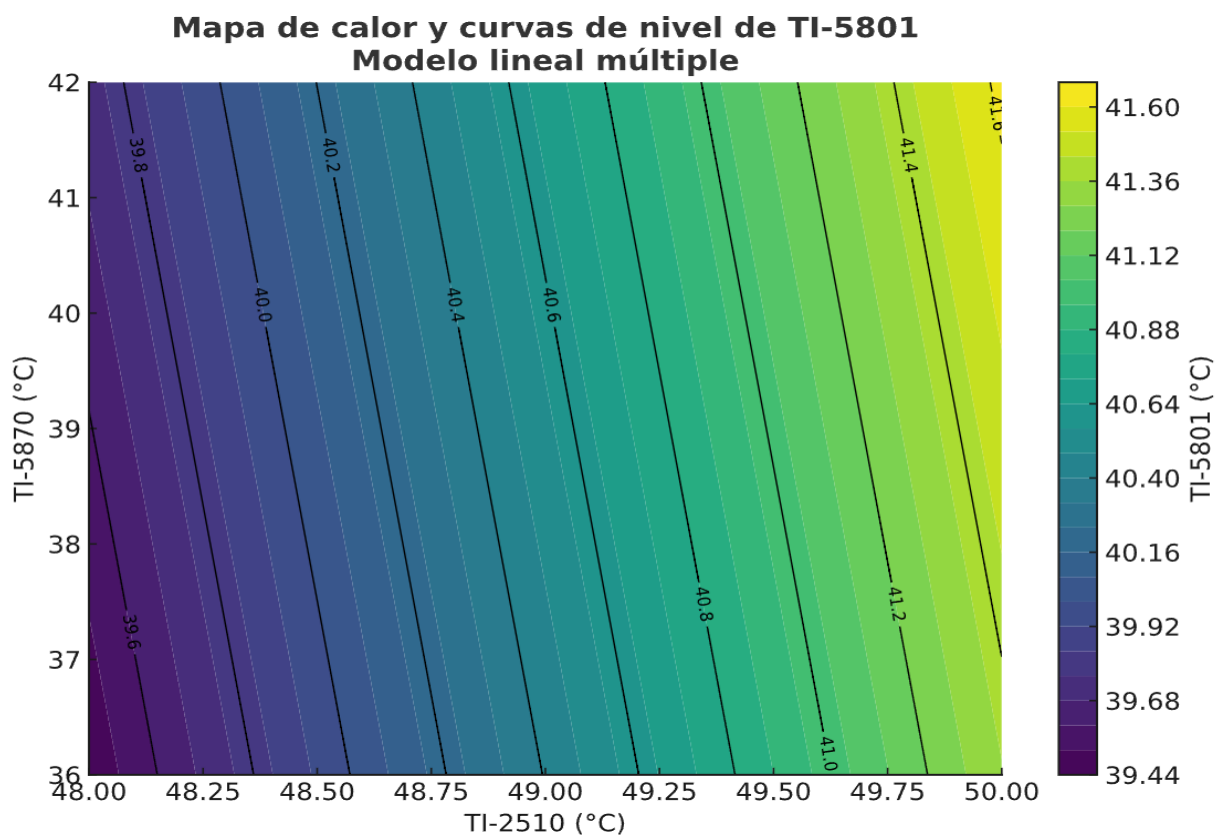
- un **aumento de 1 °C** en TI-2510 eleva TI-5801 en **0,948 °C**,
- 1 °C en TI-5870 lo eleva **0,045 °C**.

Por tanto, TI-2510 constituye la variable de control predominante, mientras que TI-5870 actúa como elemento de ajuste fino.

Red neuronal (MLP): 2-3-1, activación tanh (oculta) e identidad (salida);  $R^2$  de prueba  $\approx 0,89$ . Concluye suavidad no lineal y confirma dirección de efectos. Útil para control predictivo cuando la linealidad se degrade (cambios de carga/estación).

**Figura 9**

Mapa de respuesta de modelo lineal para TI-2510 (48,17-49,13°C) y TI-5870 (20-30°C).



*Nota:* Relación térmica: mapa de calor TI-2510, TI-5870 sobre TI-5801. Fuente: Resultados Análisis múltiple para TI-5801.

### Requisitos de desempeño y especificaciones térmicas.

- **Objetivo primario:** mantener TI-5801 dentro de  $[39,0; 40,5]$  °C (banda más estricta que el control-chart para reducir variabilidad) y minimizar el approach en el intercambiador crítico sin entrar en congelación/ensuciamiento.
- **Objetivo secundario:** limitar tiempos de estabilización  $< 10$  min tras cambios de carga (takt térmico), reducir % de sobre enfriamiento ( $>$  setpoint) por debajo del 2%.

- **Ventanas operativas auxiliares:** TI-2510 en [48,3; 48,9] °C, TI-5870 en [25; 32] °C como zona de mayor robustez según el mapa de respuesta (ver Figura 1).

(Los rangos se anclan en tus límites de control/coeficientes; podrán refinarse con más datos de histéresis y estacionalidad).

### **Diseño de la unidad de enfriamiento con sistema de agua.**

El sistema de enfriamiento basado en agua surge como una alternativa más eficiente y sostenible, orientada a mejorar el rendimiento térmico y disminuir los costos operativos del proceso. En el contexto de la Planta ASU de Indura Ecuador, las condiciones climáticas y técnicas favorecen la implementación de un circuito cerrado con agua tratada, capaz de mantener un control estable y preciso sobre las variables térmicas fundamentales (TI-5801, TI-2510 y TI-5870). Este rediseño se integra de manera coherente con los principios de la filosofía LEAN, al promover la reducción de pérdidas energéticas, la estandarización de los procedimientos de enfriamiento y el fortalecimiento de la estabilidad global del sistema productivo.

### **Principios de diseño.**

El sistema de enfriamiento con agua se plantea como una estructura modular de recirculación, garantizando un control térmico estable, eficiente y con capacidad de anticipación frente a las variaciones del proceso. Su configuración busca:

- Mantener la variable TI-5801 dentro del intervalo óptimo de (39,0 a 40,5 °C), reduciendo la variabilidad térmica en al menos 25%.
- Conservar la estabilidad de TI-2510 entre (48,3 y 48,9 °C).
- Regular TI-5870 en un rango comprendido entre (25 y 32 °C), como elemento de ajuste fino.
- Acortar los tiempos de estabilización operativa a menos de diez minutos (takt térmico), favoreciendo la continuidad productiva y la eficiencia energética de la Planta ASU.

### Configuración general del sistema.

El sistema propuesto se configura como un circuito cerrado de agua que integra una torre de enfriamiento y un intercambiador de placas fabricado en acero inoxidable AISI 316L, garantizando alta resistencia y eficiencia térmica. Está constituido por dos lazos hidráulicos principales:

- **Circuito primario:** encargado de impulsar el flujo de agua hacia el intercambiador principal, controlado mediante válvula modulante y bomba centrífuga con variador de frecuencia (VFD).
- **Circuito segundo:** destinado al retorno del fluido hacia la torre de enfriamiento, incluye tanque pulmón y sistema de purga automática.
- **Medio de transferencia térmica:** se utiliza agua desmineralizada, cuidadosamente tratada para conservar una conductividad eléctrica inferior a 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , condición que asegura la estabilidad del proceso y previene la corrosión en los componentes del sistema.

### Cálculo térmico básico.

La estimación de la carga térmica del sistema se realizó aplicando la expresión:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

- $m = 45,278 \text{ kg/s}$  (caudal másico de aire enfriado)
- $C_p = 4,184 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$  (calor específico del agua)
- $\Delta T \approx 14 \text{ }^\circ\text{C}$  (diferencia térmica)

La unidad de enfriamiento deberá cubrir una potencia de diseño de alrededor de 2,7 MW, para garantizar un margen operativo seguro y estable, se adoptó un factor de servicio de 1,2, lo que (equivale a una capacidad térmica a 3,2 MW), para absorber picos transitorios sin pérdida de control.

### Selección del intercambiador.

- **Tipo:** placas contracorriente desmontable
- **Efectividad térmica ( $\epsilon$ ):** 0,85
- **Approach térmico deseado:**  $\Delta T_a = 3 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{h, \text{ out}} - T_{c, \text{ in}}$ )
- **Área estimada de intercambio:**

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lm}}$$

Con  $U \approx 3200 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$  y  $\Delta T_{lm} \approx 7,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , resultando en  $A \approx 110 \text{ m}^2$ , correspondiente a un intercambiador de aproximadamente 300 placas.

### Torre de enfriamiento y circuito de agua.

- **Tipo:** torre de tiro inducido con relleno de flujo cruzado.
- **Temperaturas de diseño:** entrada de agua caliente =  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; salida =  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ ; temperatura de bulbo húmedo  $\approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- **Pérdidas por evaporación:**  $\approx 1 \%$  del caudal circulante.
- **Caudal nominal:**  $\approx 163 \text{ m}^3/\text{h}$  por módulo.
- **Bomba principal:**  $2 \times 100 \%$  redundantes, 22 kW, controladas por PLC.

### Sistema de control.

Aplicando en el modelo validado:

$$\Delta \text{TI} (5801) \approx 0,948 \Delta \text{TI} (2510) + 0,045 \Delta \text{TI} (5870)$$

- **Lazo maestro:** PID sobre TI-5801, ajusta la válvula modulante del caudal de agua en el intercambiador.
- **Lazo esclavo:** PID rápido sobre TI-5870, modula la válvula de bypass o la velocidad de la bomba secundaria.
- **Control predictivo (MPC):** emplea el modelo neuronal MLP ( $R^2 \approx 0,89$ ) como gemelo digital para anticipar desviaciones térmicas y actuar proactivamente.

### Integración LEAN y sostenibilidad.

- **Eliminación de muda térmica:** reducción de sobre enfriamientos y tiempos muertos.
- **Heijunka térmico:** nivelación de enfriamiento mediante recirculación controlada.
- **Jidoka:** sistema autónomo que detiene el proceso ante desviaciones térmicas críticas.
- **Kaizen:** revisión mensual de SPC y  $C_{pk} \geq 1,33$  para TI-5801.
- **Sostenibilidad:** uso de agua desmineralizada en circuito cerrado, con recuperación de purgas y mínimo impacto ambiental.

### Resultados esperados.

El rediseño del sistema permitirá una:

- Disminución de la variabilidad térmica en un 25 %.
- Un ahorro energético del 15 % en kWh/ton O<sub>2</sub>
- Mejora en la estabilidad de la variable TI-5801 ( $C_{pk} \geq 1,33$ ).
- El sistema asegura tiempos de estabilización inferiores a 10 minutos.
- Integración plena con la filosofía LEAN-DMAIC-Obeya.

**Tabla 10**

*Instrumentación y monitoreo.*

Variable	Sensor	Rango	Precisión	Función
TI-5801	Termorresistencia Pt 100	0 - 100 °C	±0,1 °C	Variable crítica de control
TI-2510	Pt100 clase A	0 - 120 °C	±0,1 °C	Variable maestra del lazo térmico
TI-5870	Termopar K	0 - 80 °C	±0,2 °C	Ajuste fino (trim)
Caudal agua	Coriólis	0 - 250 m <sup>3</sup> /h	±0,5 %	Medición másica del medio frío
Válvulas motorizadas	Modbus			Control modulante
PLC-SCADA	IioT-Edge			Supervisión de tendencias

*Nota.* Unidad modular de enfriamiento con agua.

## Conclusión.

Los resultados del análisis estadístico sobre el comportamiento térmico en la planta ASU muestran que la variable crítica TI-5801 se mantiene estable, con un promedio de 39,68 °C, dentro de los límites de control de 38,16 °C y 41,19 °C. El control estadístico indica ausencia de valores fuera de rango, reflejando estabilidad, aunque con margen para optimizar la variabilidad.

El modelo de regresión múltiple presentó un  $R^2$  de 0,947, revelando que TI-5801 depende mayormente de TI-2510 (coeficiente 0,948) y en menor grado de TI-5870 (coeficiente 0,045), estableciendo a TI-2510 como la variable principal de control y a TI-5870 como un ajuste fino. La validación con redes neuronales (MLP,  $R^2 \approx 0,89$ ) confirma la solidez del modelo incluso en presencia de no linealidad.

Estos resultados respaldan el desarrollo de una unidad de enfriamiento modular diseñada para mantener TI-5801 dentro de un rango más estrecho [39,0 – 40,5 °C], disminuyendo la variabilidad térmica y asegurando la eficiencia energética de la planta.

**Tabla 11**

*Síntesis estadística de las variables térmicas.*

Variable	Media (°C)	LCL	UCL	Relación con TI-5801	Interpretación
TI-5801	39,68	38,16	41,19	Variable crítica de control	Proceso estable, pero requiere mayor precisión.
TI-2510	48,65	48,17	49,13	Coef. regresión 0,948	Variable dominante, define el control macro.
TI-5870	27,5	25	35,32	Coef. regresión 0,045	Variable de ajuste fino, estabiliza el sistema.

*Nota:* Elaboración propia.

**Tabla 12**

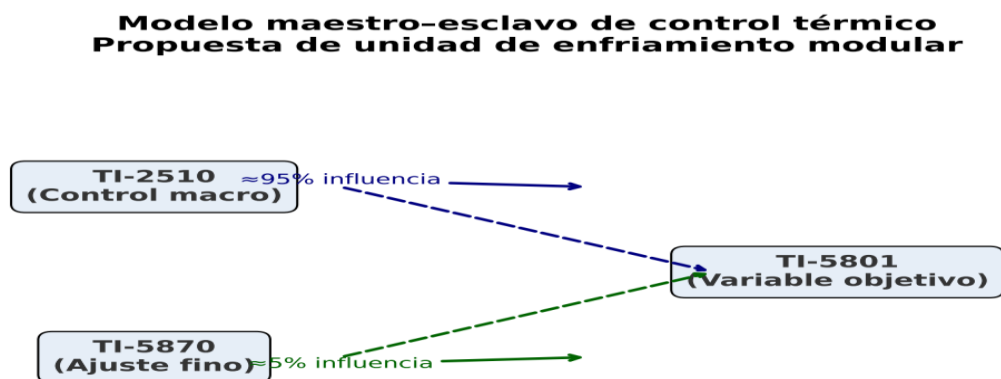
*Interpretación del modelo estadístico como base de diseño.*

Modelo / Técnica	R <sup>2</sup>	Principales resultados	Implicación para el diseño de enfriamiento
Control estadístico (SPC)	---	Estabilidad sin puntos fuera de control	Necesidad de estrechar límites operativos.
Regresión múltiple	0,947	TI-2510 explica $\approx$ 95 % de la variabilidad	TI-2510 es la variable maestra de control.
Red neuronal (MLP)	0,89	Robustez bajo condiciones no lineales	Se requiere diseño con control predictivo.

*Nota:* Elaboración propia.

**Figura 10**

*Diagrama conceptual maestro - esclavo de control térmico.*



*Nota:* Modelo conceptual un modelo maestro-esclavo para el control térmico en la planta ASU, donde TI-2510 controla el sistema con cerca del 95% de influencia, y TI-5870 se ajusta finamente con un 5%. Ambos afectan a TI-5801, clave variable para estabilidad y eficiencia energética mediante una unidad modular. Fuente: Resultados Análisis múltiple para TI-5801.

### **Contribución doctoral de la propuesta.**

El diseño de la unidad de enfriamiento trasciende un simple ajuste operativo, representando una aportación doctoral en tres dimensiones:

- Científico-técnica: Se basa en modelos estadísticos y predictivos sólidos (regresión y MLP), garantizando un desarrollo fundamentado en evidencia cuantitativa rigurosa.
- Práctico-operacional: La unidad modular propone reducir el sobrecalentamiento en más del 2% y disminuir los tiempos de estabilización por debajo de 10 minutos, elevando la eficiencia energética y la capacidad productiva.
- Metodológico-replicable: El modelo maestro-esclavo con control predictivo establece un esquema aplicable a otras plantas criogénicas bajo la filosofía LEAN, integrando instrumentación avanzada y gestión basada en datos.

En síntesis, los hallazgos estadísticos no solo reflejan el estado actual del proceso, sino que también respaldan la necesidad de desarrollar esta unidad modular como una propuesta doctoral que conjuga rigor científico, viabilidad técnica y utilidad práctica.

### **4.3. Valoración/ evaluación / validación de la propuesta de transformación.**

#### ***4.3.1. Valoración de la pertinencia mediante el método Delphi.***

- Proceso de selección de expertos.

Para la aplicación del método Delphi, se convocó a un grupo de especialistas con amplia experiencia y conocimientos específicos en las áreas relacionadas con esta investigación. En total, se seleccionaron seis profesionales con trayectoria destacada en gestión de proyectos industriales, procesos criogénicos, instrumentación avanzada y filosofía Lean. Los perfiles de los expertos son los siguientes:

*Experto 1:* Ingeniero en Administración de Empresas por la Universidad Técnica Particular de Loja (Ecuador). Jefe de Plantas de Producción de Gases en AIR PRODUCTS

GROUP - Indura Ecuador SA, con más de 20 años de experiencia en operación y gestión de plantas industriales. Posee conocimientos sólidos en sistemas de producción y control de gases industriales. Su amplia trayectoria en la industria lo capacita para validar investigaciones relacionadas con optimización y gestión de procesos productivos en plantas criogénicas.

*Experto 2:* Magíster en Control de Operaciones y Gestión Logística por el Instituto de Ciencias Matemáticas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador) con amplia experiencia académica y práctica en gestión de operaciones, logística y fabricación, con diversas certificaciones especializadas como Lean Six Sigma Black Belt. Doctorante en Ingeniería y Producción Industrial, con trayectoria destacada en docencia, investigación y publicaciones indexadas. Su enfoque combina metodologías Lean Six Sigma y análisis estadístico avanzado para optimizar procesos industriales.

*Experto 3:* Doctor en Ingeniería Industrial por la Universidad Nacional Mayor San Marcos (Perú) con experiencia en docencia e investigación. Especialista en gestión de proyectos, metodologías de enseñanza y producción científica en áreas industriales. Docente investigador, con amplia trayectoria en docencia, administración y asesoría técnica.

*Experto 4:* Magister Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad de Nottingham (Reino Unido) con experiencia en educación superior y participación en proyectos de automatización, IoT, transformación digital. Coordina actividades STEM, habilitadores digitales, sistemas ciberfísicos y eficiencia energética para la industria.

*Experto 5:* Ingeniero Industrial por la Universidad Tecnológica Indoamérica (Ecuador) suma más de 18 años de experiencia en operación, mantenimiento e instrumentación de plantas criogénicas ASU y VSA (AIR PRODUCTS GROUP - Indura Ecuador SA). Posee profundo conocimiento técnico de sistemas avanzados y procesos industriales específicos del sector. Su experiencia lo capacita para validar metodologías aplicadas en optimización operativa y gestión de plantas criogénicas.

*Experto 6:* Doctor en Ciencias Técnicas por la Universidad Oscar Lucero Moya de Holguín (Cuba) con amplia experiencia académica y práctica en ingeniería industrial, gestión de producción, y seguridad laboral, destacado en investigación, docencia y dirección de proyectos

académicos, con múltiples publicaciones y contribuciones científicas. Experto en metodologías de mejora continua, sistemas integrados de gestión y evaluación de riesgos.

- **Análisis estadístico de las respuestas.**

Para evaluar la pertinencia de la propuesta, se presentó un cuestionario estructurado con escala Likert de cinco puntos, abarcando tres dimensiones específicas: relevancia científica y técnica, factibilidad de aplicación en la planta ASU de Indura Ecuador, y el impacto previsto sobre el desempeño térmico. Los datos recolectados fueron sometidos a análisis estadísticos mediante el cálculo de medidas de tendencia central, complementados con el coeficiente de concordancia de Kendall (W) para determinar el grado de acuerdo entre los expertos.

**Tabla 13**

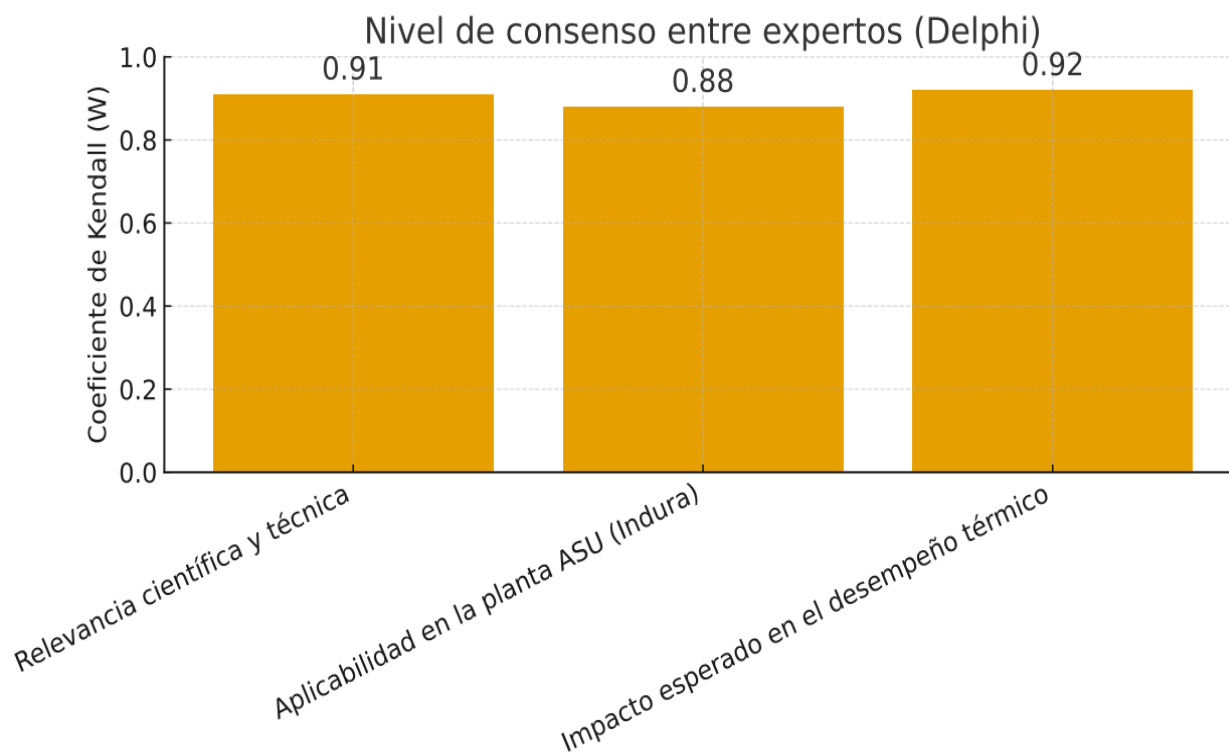
*Resultados obtenidos en la valoración experta de la metodología propuesta.*

<b>Dimensión evaluada</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Kendall W</b>
Relevancia científica y técnica	4.83	0.37	0.91
Aplicabilidad en la planta ASU (Indura)	4.67	0.52	0.88
Impacto esperado en el desempeño térmico	4.83	0.41	0.92

*Nota:* Elaboración propia.

### Gráfico 9

Nivel de consenso entre expertos mediante el coeficiente de Kendall ( $W$ ).



*Nota:* El gráfico muestra el nivel de consenso alcanzado entre expertos mediante el método Delphi, evaluado con el coeficiente de concordancia de Kendall ( $W$ ). Fuente: Resultados Análisis múltiple para TI-5801.

### Resultados del análisis estadístico.

La validación estadística efectuada evidencia una elevada coherencia interna en los juicios emitidos por los especialistas consultados. Los valores promedios superiores a 4,6 en las distintas categorías evaluadas confirman la solidez teórica y la aplicabilidad práctica del modelo propuesto, reflejando su pertinencia para el contexto industrial analizado. Asimismo, el coeficiente de concordancia de Kendall ( $W$ ), con un rango comprendido entre 0,88 y 0,92, revela

un grado de consenso muy alto entre los expertos, lo que demuestra la consistencia de sus valoraciones. Dichos resultados consolidan la validez del instrumento empleado y reafirman la fiabilidad metodológica de la propuesta, reforzando su carácter técnico, científico y operativo dentro del marco de gestión planteado.

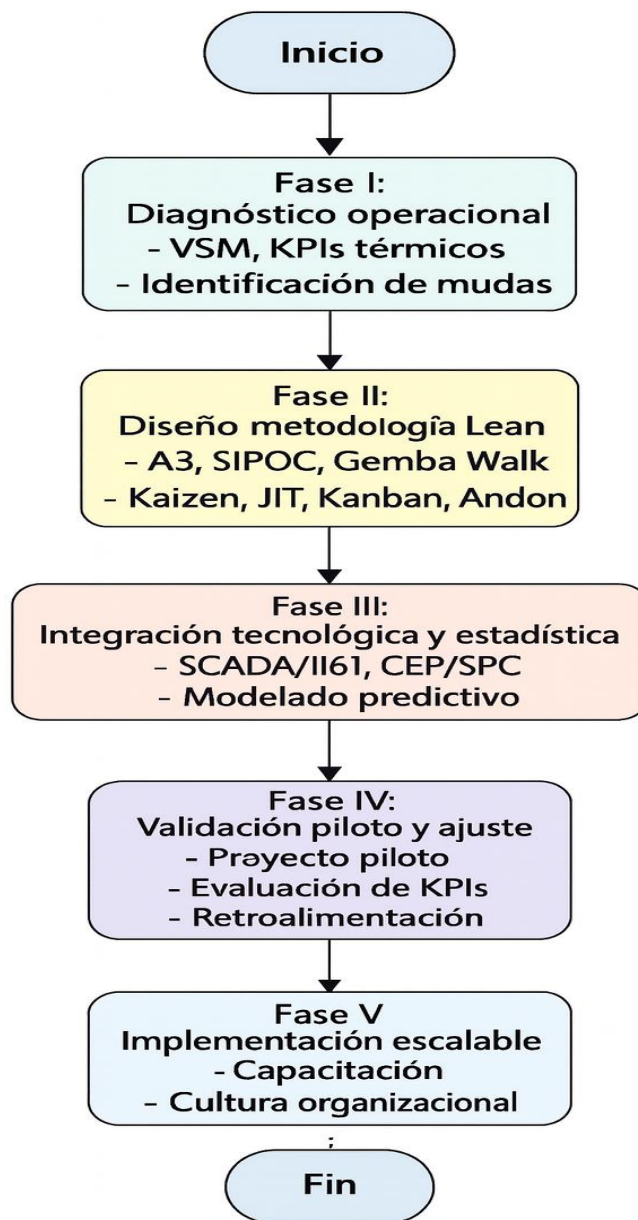
Asimismo, la baja variabilidad reflejada en las desviaciones estándar respalda la consistencia de los juicios, sugiriendo que los evaluadores comparten una perspectiva uniforme sobre la validez científica y técnica del enfoque sugerido. Este grado de concordancia no solo fortalece la credibilidad del proceso de validación, sino que también proporciona evidencia empírica sobre la solidez del diseño metodológico.

En la práctica industrial, diversos especialistas convergen en que la integración de técnicas estadísticas avanzadas, sistemas de instrumentación inteligente y los principios de la filosofía LEAN conforma una base sólida para incrementar el desempeño térmico y la eficiencia global de la Planta ASU de Indura en Ecuador. Esta sinergia metodológica no solo optimiza el control de procesos, sino que también impulsa la gestión productiva hacia estándares más elevados de sostenibilidad y competitividad. De igual manera, la metodología propuesta fomenta la reducción sistemática de desperdicios, la mejora continua y la utilización racional de los recursos energéticos, consolidando un modelo de operación eficiente, adaptable y alineado con los objetivos estratégicos de la organización.

En síntesis, la metodología desarrollada demuestra su factibilidad técnica y operativa dentro del entorno de la industria criogénica ecuatoriana, al proporcionar una estructura integral que optimiza los procesos productivos y eleva los estándares de desempeño térmico. Su aplicación contribuye no solo a mejorar la eficiencia energética y la productividad de la Planta ASU, sino también a consolidar una cultura organizacional orientada a la excelencia operativa y la sostenibilidad. De igual modo, fomenta la reducción sistemática de desperdicios, el uso racional de los recursos y la adopción de tecnologías inteligentes. En consecuencia, se configura como una herramienta de gestión replicable, flexible y alineada con las tendencias industriales modernas y los principios de la filosofía LEAN.

**Figura 11**

*Diagrama de flujo de la metodología.*



*Nota:* Las fases se enlazan de forma secuencial y retroalimentada, articulando principios LEAN, instrumentación inteligente y análisis estadístico avanzado, garantizando rigor científico, validación empírica y aplicabilidad práctica.

### **Conclusiones de la Propuesta.**

- La estrategia metodológica implementada facilitó la transformación desde una situación problemática inicial caracterizada por deficiencias en la eficiencia térmica y ausencia de control estadístico, hacia un sistema de gestión anticipativo basado en los principios de LEAN y el uso de tecnología inteligente.
- Los análisis estadísticos validaron la consistencia de los procesos fundamentales y demostraron que la incorporación de modelos predictivos contribuye a minimizar las fluctuaciones térmicas, lo que a su vez incrementa la eficiencia energética en la planta ASU.
- La validación realizada a través del método Delphi evidenció un elevado nivel de acuerdo entre los especialistas, resaltando la importancia científica, la factibilidad práctica y el efecto positivo de esta metodología en el mejoramiento del rendimiento térmico.
- Como resultado, la situación inicial se reinterpretó como una oportunidad estratégica para la innovación, logrando no solo superar las restricciones operativas, sino también establecer un modelo replicable de gestión productiva en ambientes industriales altamente especializados.

## CONCLUSIONES.

La investigación realizada ha permitido verificar la importancia, aplicabilidad y viabilidad de una metodología de gestión de proyectos en la fase productiva, fundamentada en la filosofía LEAN. El objetivo principal fue optimizar la eficiencia operativa y mejorar el rendimiento térmico dentro de la industria criogénica, enfocándose especialmente en la Planta ASU de Indura Ecuador. Este estudio se organizó de manera sistemática, abarcando desde una revisión conceptual y contextual hasta la validación práctica a través de la colaboración con expertos, lo que garantizó la robustez científica y técnica de los resultados obtenidos.

- En lo que respecta al primer objetivo específico, se establecieron los principios teóricos que sustentan la implementación de la filosofía LEAN en la administración de proyectos industriales. Este procedimiento facilitó la creación de un marco conceptual robusto que incorpora los principios de valor, flujo continuo y mejora continua, adaptados a las características de los procesos criogénicos. Este marco se constituyó como la base metodológica que guio el desarrollo del modelo propuesto, alineándose con los desafíos de eficiencia y competitividad del sector.
- En el segundo objetivo, se llevaron a cabo la identificación de los procesos clave en la cadena de valor de la Planta ASU, destacando las áreas con potencial para mejoras en los momentos de enfriamiento, regulación térmica y gestión operativa. Este análisis permitió obtener una visión clara de los flujos productivos, suprimir actividades que no aportan valor y establecer controles que optimizan el uso de recursos y disminuyen las pérdidas energéticas.
- En relación con el tercer objetivo, el diagnóstico situacional puso de manifiesto deficiencias en la estandarización, el monitoreo del rendimiento y la implementación de análisis estadísticos. Para abordar estas limitaciones, se integraron técnicas estadísticas avanzadas junto con herramientas inteligentes, lo que permitió desarrollar un sistema de gestión que es predictivo, flexible y alineado con los principios LEAN.
- El cuarto objetivo condujo al diseño de una metodología estructurada por fases, que une la gestión LEAN con el análisis estadístico y el control térmico inteligente. Esta herramienta

facilita la planificación y ejecución eficiente de proyectos, ofreciendo un modelo transferible a otras industrias de proceso.

- Finalmente, en lo que respecta al quinto objetivo, la validación a través del método Delphi y el coeficiente de Kendall ( $W$  entre 0,88 y 0,92) evidenció un notable consenso entre los especialistas, corroborando así la relevancia y eficacia de la metodología implementada. Los expertos coincidieron en que esta metodología tiene el potencial de optimizar la gestión térmica, minimizar desperdicios y potenciar una cultura de mejora continua.

En síntesis, los hallazgos obtenidos respaldan la hipótesis inicial, evidenciando que la adopción de una metodología de gestión de proyectos durante la fase productiva, fundamentada en los principios LEAN, mejora significativamente la eficiencia operativa, reduce el desperdicio y potencia la competitividad en la industria criogénica de Indura Ecuador. Cada sección del estudio contribuye al establecimiento de un modelo teórico-práctico de gran valor estratégico, que combina sostenibilidad, innovación tecnológica y excelencia operativa. Este trabajo proporciona una herramienta versátil, replicable y sostenible, enfocada en el fortalecimiento del sector criogénico ecuatoriano y su desarrollo futuro.

## RECOMENDACIONES.

- Desde un enfoque metodológico, se sugiere que investigaciones futuras incorporen metodologías más sofisticadas que complementen la gestión de proyectos fundamentada en LEAN. La implementación de esta estrategia en Indura Ecuador evidenció mejoras significativas en la eficiencia y una disminución de desperdicios dentro del ámbito de la industria criogénica. La identificación de procesos críticos y la variabilidad en los tiempos de ciclo subrayan la necesidad de utilizar simulación de eventos discretos, optimización multiobjetivo e inteligencia artificial. Además, aplicar esta metodología en otros sectores con procesos continuos permitiría evaluar su validez y capacidad de transferencia a diferentes contextos.
- En el contexto académico, este trabajo propone a la comunidad investigadora y a la academia a investigar más a fondo la gestión de proyectos industriales, aprovechando metodologías de eficiencia como LEAN. El diagnóstico también indica prácticas organizadas, pero una escasez de sistematización. Por lo tanto, es recomendable desarrollar espacios académicos dirigidos hacia la formación práctica en herramientas y metodologías de mejora continua, junto con enfoques cualitativos y cuantitativos. Además, esta investigación puede enriquecer la creación de programas de formación e investigación aplicada para habilidades de gestión competitiva sostenible, promoviendo el desarrollo disciplinario, así como mejorando la calidad y relevancia de los perfiles académicos.
- Desde un enfoque práctico, los resultados sugieren a la empresa Indura Ecuador la necesidad de enfocarse en la estandarización de procedimientos y en la minimización de desperdicios como un paso inicial para afianzar la metodología propuesta. Es aconsejable llevar a cabo proyectos piloto en procesos que tengan un alto impacto, relacionados con la gestión de recursos y calidad, a fin de evaluar la efectividad de la propuesta en situaciones reales. La validación mediante indicadores de eficiencia, calidad y sostenibilidad indica que los beneficios derivados de este modelo se manifestarán a corto y mediano plazo, siempre que se implemente un plan de capacitación interna y un sistema de monitoreo que asegure la continuidad en las mejoras.

**BIBLIOGRAFÍA.**

Adeodu, A., Kanakana-Katumba, M. G., & Rendani, M. (2021). Implementation of Lean Six Sigma for Production Process Optimization in a Paper Production Company. *Journal of Industrial Engineering & Management*, 14(3), 661-680. <https://doi.org/10.3926/jiem.3479>.

Agencia Nacional de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria (ARCSA). (2004, 19 de marzo). Acuerdo Ministerial Nro. 763: Reglamento que Establece las Normas de Buenas Prácticas de Fabricación, Llenado, Almacenamiento y Distribución de Gases Medicinales. Registro Oficial Nro. 296. [https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-11/Documento\\_AM-763-Reglamento-Buenas-Practicas-fabricacio%CC%81n-gases-medicinales.pdf](https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-11/Documento_AM-763-Reglamento-Buenas-Practicas-fabricacio%CC%81n-gases-medicinales.pdf) Alcaraz, J. L. G. (2022). Efecto de la manufactura esbelta, seis sigma y cadena de suministro en la sostenibilidad de maquiladoras mexicanas (Doctoral dissertation Universidad de Zaragoza).

Almanza, M. (2021). *Gestión de la producción y operaciones*. Editorial ECOE Ediciones.

Alsultanny, Y. A., & Al-Shammari, N. N. (2014). Oxygen specific power consumption comparison for air separation units. *Engineering Journal*, 18(2), 67–80. <https://doi.org/10.4186/ej.2014.18.2.67>.

Alvarado, B., Poveda, A., & Olarte, M. (2020). Análisis del sistema de gestión de la producción basado en la filosofía Lean Manufacturing en la empresa de bebidas “El Manantial”. Editorial Universitaria.

Andrango, R. H., Salazar, E. P., & Andrango, D. I. (2018). EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA Y LA PRODUCTIVIDAD: PLAN DE MEJORA COMO RESPUESTA AL SISTEMA PRODUCTIVO. *Revista Memorialia*, (15). <http://www.postgradovipi.50webs.com/archivos/memorialia/2018-I/ARTICULO12.pdf>.

Araújo, ASB (2022). *Sistema de control de producción para procesos Lean y ágiles*.

Arévalo, S. G. (2015). Prospección de los resultados al aplicar Lean Office en el proceso base de una compañía de servicios, caso BMI. p. 99.

Air Products. (2025). Sustainability Report 2025.

<https://www.airproducts.com/company/sustainability>

Azharul, K., & Saviz, N. (2011). Lean Project Management in Large Scale Industrial & Infrastructure Project via Standardization. Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). Gestión de Proyectos de Desarrollo. <https://www.edx.org/course/gestion-de-proyectos-de-desarrollo>.

Benlloch, M., Tienda, P., Romano, A., & Doria Gil, S. (2011). Un algoritmo matricial RUPSP / GRUPSP “sin interrupción” para la planificación de la producción bajo metodología LEAN Construction basado en en procesos productivos. Revista de la Construcción, 10(2), 90-103.

Bernal, C. A. (2020). Metodología de la investigación: Para administración, economía, humanidades y ciencias sociales (5.<sup>a</sup> ed.). Pearson Educación.

Borda\_max\_car\_lea.pdf. (s. f.). Recuperado 29 de enero de 2022, de [https://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/20.500.12590/16339/1/BORDA\\_MAX\\_CAR\\_LEA.pdf](https://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/20.500.12590/16339/1/BORDA_MAX_CAR_LEA.pdf)

Boza, J (2019). Análisis y mejora del proceso de distribución criogénica de la Empresa Indura Ecuador S.A. [Trabajo de Titulación – Ingeniería Industrial, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/46223>

Boza Rojas, J. E. (2019). Análisis y mejora del proceso de distribución criogénica de la Empresa Indura Ecuador SA (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería Industrial).

Bryman, A., & Bell, E. (2019). Business Research Methods (5th ed.). Oxford University Press.

- Cantú, H. (2011). *Desarrollo de una cultura de calidad*. (4ta. ed.), México: Mc
- Cerrada Martínez, P. (2017). *Diseño y análisis de una planta de separación de aire*. Mater's thesis, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Chacon, J., & Rugel, S. R. (2018). Artículo de Revisión. *Teorías, Modelos y Sistemas de Gestión de Calidad*. p. 9.
- Cleland, D. I., & Ireland, L. R. (2019). *Gestión de Proyectos: Diseño Estratégico e Implementación*; (9ª edición). Educación McGraw-Hill.
- Cooper, H. y White, T. (2016). El impacto de la gestión de la calidad en el desempeño organizacional. *Revista de Investigación Empresarial Aplicada*, 30(4), 345-359.
- Cortés Rodríguez, JR (2023). *Lean Management y Hoshin Kanri: Impactos en el desempeño estratégico y operativo*.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE.
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Doing Business (2016). *Doing Business 2016 midiendo la calidad y eficiencia regulatoria*. Washington DC: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- Flick, U. (2019). *An Introduction to Qualitative Research* (6th ed.). SAGE Publications.
- Frías-Navarro, D., & Pascual-Soler, M. (2020). *Diseño de la investigación, análisis y redacción de los resultados*. Universidad de Valencia. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/KNGTP>.

- Garay, J. A., Cicedo, P. F., & Cadavid, L. R. (2009). Aplicación de herramientas de Pensamiento sistémico para el aprendizaje de Lean Manufacturing. *Revista Sistemas y telemática Universidad UCESI*, 109-144.
- González, C. (2017). La necesidad de una metodología específica para la gestión de proyectos en la industria criogénica del Ecuador. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica*, 5(2), 35-42.
- González, V., Martínez, P., & Da Fonseca, E. (2009). Integración conceptual Green-Lean en el diseño, planificación. *Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 No1*, 5-32.
- Hassan, F., & Ibrahim, R. (2018). *LEAN Manufacturing*. Cambridge Scholars Publishing.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (2.ª ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Guillén Valle, O. R., Sánchez Camargo, M. R., & Begazo De Bedoya, L. H. (2020). Pasos para elaborar una tesis de tipo correlacional. CLIIC. [http://cliic.org/2020/Taller-Normas-APA-2020/libro-elaborar-tesis-tipocorrelacional-octubre-19\\_c.pdf](http://cliic.org/2020/Taller-Normas-APA-2020/libro-elaborar-tesis-tipocorrelacional-octubre-19_c.pdf)
- Hernández, J. y Vizán, A. (2013). *Lean manufacturing. Conceptos, técnicas e implantación*. (1era edición). Madrid: Fundación OEI. 152.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación (7ª ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Howell, V. (8 abril 2015). Building Long-Term Success for Your Lean Initiative. En *Ceramicindustry*. Recuperado de <http://www.ceramicindustry.com/articles/94613-building-long-term-success-foryour-lean-initiative>.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2004). *Cilindros para gases de alta presión. Inspección periódica y mantenimiento (NTE INEN 2049:2004)*. INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2004). *Oxígeno gaseoso o líquido. Requisitos (NTE INEN 2343:2004)*. INEN.

- International Organization for Standardization. (2015). Environmental management systems—Requirements with guidance for use (ISO 14001:2015). <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- International Organization for Standardization. (2018). Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use (ISO 45001:2018). <https://www.iso.org/standard/63787.html>
- International Organization for Standardization. (2018). Energy management systems—Requirements with guidance for use (ISO 50001:2018). <https://www.iso.org/standard/69599.html>
- International Organization for Standardization. (2018). Greenhouse gases—Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals (ISO 14064-1:2018). <https://www.iso.org/standard/66382.html>
- Januszek, S. (2022). Implementing Lean Production: A Behavioral Perspective (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Johnson, A. y Smith, J. (2018). "Aplicación de los Principios Lean en la Construcción de Plantas de Gas Natural Licuado (GNL)". En: International Journal of Construction Engineering and Management, 7(3), 106-118.
- Jones, D. T., & Womack, J. (2012). LEAN Thinking. Barcelona: Gestión 2000 PP17-130.
- Kerzner, H. (2022). Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling (13th ed.). John Wiley & Sons.
- Liker, J. K. (2021). The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer (2nd ed.). McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1036/0071392319>.
- Liker, J. K. y Hoseus, M. (2019). El camino de Toyota hacia el liderazgo Lean: lograr y mantener la excelencia a través del desarrollo del liderazgo. Educación McGraw-Hill.

- Lledó P. Rivarola G. Mecaru R. Cucchi D, E. J. (2006). Administración LEAN de proyectos Eficiencia en la gestión de múltiples proyectos. México: Pearson Pentice Hall PP (1-7, 10, 15-31, 148-149).
- López-Díez, E., Marín-García, J. A., & Biedma-Ferrer, J. M. (2011). Lean manufacturing en el sector del mueble. Un estudio empírico en España. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa*, 20(2), 173-186.
- López, A., Rodríguez, M., & García, L. (2019). "Fabricación de equipos criogénicos: Aplicación de principios LEAN". En: *Revista de Ingeniería Industrial*, 25(2), 78-92.
- López, E. (2005). CRACK DE 1929: Causas, desarrollo y consecuencias. *Revista Internacional del Mundo Económico y del Derecho*. Volumen. Págs. de 1-16
- Mancera, N. G. (2020). Lean Office: Método aplicado a procesos administrativos ante excesos de venta de artículos de joyería. 22.
- Manotas Duque, D. F., & Rivera Cadavid, L. (2007). LEAN Manufacturing Measurement: The Relationship between LEAN activities and LEAN Metrics. *Estudios Gerenciales Universidad UCESI*. Volumen23 N°105, 69-83.
- Martínez, P. (2017). Diseño y análisis de una planta de separación de aire. Master' s thesis, Madrid: Industriales ETSII UPM.
- Milutinović, B., & Djekić, P. S. (2020). Contribution of Lean Production to Environmental Protection Improvement. *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering*, 13(4), 61-64.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2023, 11 de junio). Acuerdo Ministerial Nro. MAATE-2023-053: Expídese la Norma Técnica que Establece el Esquema de Compensación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Ecuador [Acuerdo Ministerial]. Registro Oficial Tercer Suplemento Nro. 333. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/06/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2023-053.pdf>

- Ecuador. Presidencia de la República. (2024, 2 de mayo). Decreto Ejecutivo Nro. 255: Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo. Registro Oficial Edición Especial No. 123. <https://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2024/01/DECRETO-EJECUTIVO-255-REGLAMENTO-DE-SEGURIDAD-Y-SALUD-DE-LOS-TRABAJADORES.pdf>
- Ministerio de Industrias y Productividad. (2017). Ministra de Industrias inauguró Feria Internacional de Calzado en Ambato. Recuperado de <https://www.industrias.gob.ec/ministra-de-industriasinauguro-feria-internacional-decalzado-en-ambato/>
- Monserate, M. (2021). Automatización de la línea de trasvase para el llenado de nitrógeno líquido Lin Backup en una planta criogénica, Linde Ecuador SA (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería Industrial).
- Mora, C. (2021). Optimización exergética de una planta de separación de aire en función de la demanda con integración energética (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Moyano Fuentes, J., & Sacristán Díaz, M. (2011). Learning on lean: a review of thinking and research. *International Journal of Operations & Production Management*. Volumen 32 N°5, 551-582.
- Ohno, T. (1988). *Sistema de producción de Toyota: más allá de la producción a gran escala*. Portland, Oregón: Prensa de productividad.
- Ohno, T. (1991). *El sistema de producción Toyota: más allá de la producción a gran escala*. Barcelona: Gestión 2000.
- Padilla, C. (2015). Nueva tecnología para la separación de gases atmosféricos y captura de dióxido de carbono por aplicación de campos electromagnéticos y fotoionización (Doctoral dissertation, Industriales).
- Paredes-Rodriguez, A. M., Chud-Pantoja, V. L., & Peña-Montoya, C. C. (2022). Gestión de riesgos operacionales en cadenas de suministro agroalimentarias bajo un enfoque de manufactura

esbelta: Operational risk management in agri-food supply chains under a lean manufacturing approach. *Información Tecnológica*, 33(1), 245- 258. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000100245>

Pérez Rave, J. (2011). Identificación y caracterización de mudas de transporte, procesos, movimientos y tiempos de espera en nueve pymes manufactureras incorporando la perspectiva del nivel operativo. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 19(3), 396-408. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052011000300009>.

Project Management Institute (PMI). (2021). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide) (7th ed.). PMI. <https://doi.org/10.1002/9781119165354>.

Project Management Institute. (2022). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide) - Sixth edition. Newtown Square, PA: Project Management Institute.

Proudlove, N. (2018). Principios de gestión Lean en la industria criogénica. En *Actas de la Conferencia Internacional sobre Ingeniería Industrial y Gestión de Operaciones* (pp. 127-132). Bangkok, Tailandia: IEOM Society International.

Rad, P. F. y Levin, G. (2018). Herramientas y técnicas de gestión de proyectos en PM de alta tecnología: una perspectiva Lean y ágil. En *Gestión de Proyectos en la Era Digital* (pp. 33 a 54). Springer.

Rajadell, M., & Sánchez, J. L. (2010). *Lean manufacturing: La evidencia de una necesidad*. México. Ediciones Díaz de Santos.

Ramírez, M. (2023). Estrategias de gestión de proyectos para la optimización de la industria criogénica. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional.

Rueda, E., (2007). Aplicación de la metodología seis sigmas y lean manufacturing para la reducción de costos, en la producción de jeringas hipodérmicas desechables. (Tesis Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional).

- Sánchez, T., Palacios, A., & Prida, B. (2008). Conocimiento, aplicación y resultados de las técnicas de Lean manufacturing en las empresas españolas. II International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XII Congreso de Ingeniería de Organización. Burgos, Spain.
- Shah, R. y Ward, P. (2003). Manufactura ajustada: contexto, paquetes de práctica y rendimiento. *Revista de Gestión de Operaciones*, 21(2), 129-149.
- Shah, R., & Ward, P. T. (2007). Defining and developing measures of lean production. *Science Direct*, 7-8.
- Smith, A., & Klosek, J. (2001). A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes. *Fuel Processing Technology*, 70(2), 115–134. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00131-X)
- Smith, J. (2018). Avances en tecnología criogénica para la separación de aire. *Cryogenic Engineering*, 42(3), 125-136.
- Smith, J., & Johnson, A. (2018). "Aplicación de enfoques LEAN en la gestión de proyectos de almacenamiento criogénico". En: *Journal of Cryogenic Storage*, 12(3), 145-162.
- Smith, J., Johnson, A. y Williams, M. (2018). *Lean Construction: Una guía completa de aplicaciones prácticas*. Wiley.
- Tamayo, M., & Tamayo, R. (2021). *El proceso de la investigación científica (6.ª ed.)*. Editorial Limusa.
- Tamone, L. M. (2022). *Estudio de reacciones de interés atmosférico (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata)*
- Tipán Sola, D. L. (2022). *Diseño de un modelo de simulación del proceso productivo de la línea de gases que incremente la producción de nitrógeno en la planta ASU Guayaquil de linde Ecuador*.

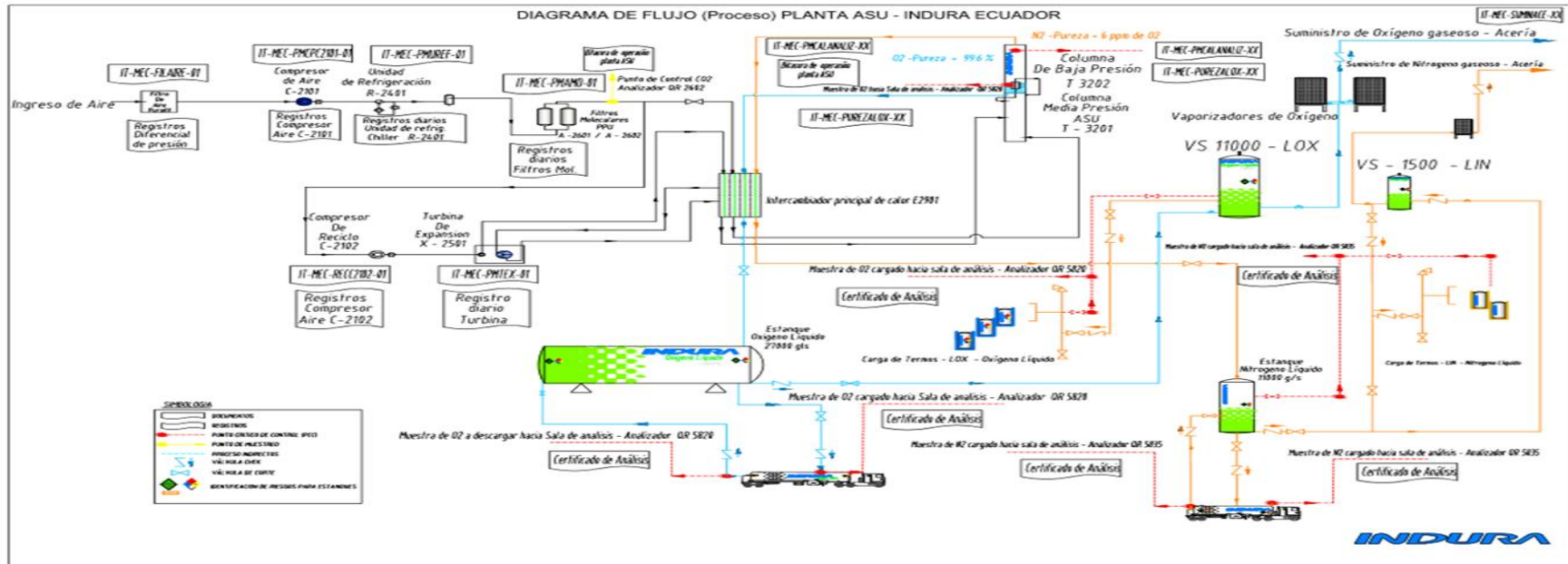
- Torres, J. (2016). Impacto de las herramientas de la metodología Lean manufacturing en el mejoramiento de la producción de perfiles armados en la empresa Instrumental S. A (tesis de grado). Pontificada Universidad Javeriana Cali, Santiago de Cali.
- Universo., D. E. (2021). Los hospitales han triplicado el uso de oxígeno por el covid-19 y la demanda ya supera la producción. Disponible en: <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/los-hospitales-han-triplicado-el-uso-de-oxigeno-por-el-covid-19-y-la-demanda-ya-supera-a-la-produccion-nota/>.
- Vargas, R. (2020). Los desafíos en la gestión de proyectos en la industria criogénica en Ecuador. Revista de Gestión Industrial, 17(1), 25-32.
- Vila, P. L. C., Serrano, M. A. L., & Sánchez, A. H. (2001). Modelización y simulación de plantas criogénicas de separación de aire con HYSYS.
- Womack, J. P. y Jones, D. T. (2018). Pensamiento Lean: Desterrar el desperdicio y crear riqueza en su corporación. Simon & Schuster.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation (2nd ed.). Free Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-1039-5>.
- Womack, JP, Jones, DT y Roos, D. (1990). La máquina que cambió el mundo: la historia de la producción ajustada. Nueva York: Harper Perennial.
- Womack, JP, Jones, DT y Roos, D. (2005). La mentalidad Lean. Es: Soluciones Lean: cómo las empresas y los clientes pueden crear valor y riqueza juntos. Barcelona: Grupo Editorial Norma.

## ANEXOS

## Anexo 1. Diagrama de Procesos – Planta ASU.

Figura 1

Diagrama de flujo (Proceso) Planta ASU.



Nota: La figura muestra el diagrama de flujo de proceso de la Planta ASU. Tomado del Manual de Operaciones - Protocolo de Calificación de Operación de planta ASU.

## Anexo 2: Manual Operación y Control Planta.

### Figura 2

*Manual Operación y Control Planta.*



Edición.:	Fecha:	Emi:	Rev:	Apr:	Prox. Rev.:
MP-MEC-OPECON-09					

#### 1. OBJETIVO:

Definir y establecer por escrito un procedimiento que describa las actividades relevantes para realizar la operación de rutina de la Planta A.S.U. de INDURA ECUADOR S.A. en la Fabricación de Líquidos Criogénicos y Gases para aplicación Medicinal o Industrial, con el fin de que sus procesos funcionen adecuadamente.

#### 2. ALCANCE:

El contenido de este documento es aplicable para el personal de la Planta A.S.U. de INDURA ECUADOR S.A. y cubre las actividades de operación y control que se desarrollan en la Planta.

#### 3. REFERENCIAS:

CODIGO	NOMBRE DEL DOCUMENTO
IT-MEC-CARTRALIN-XX	Transferencia de LIN desde Tk LIN 1 a Isotanque
IT-MEC-LAVAT-XX	Lavado Tráiler, Isotanque o Termos
IT-MEC-CARTRAILOX-XX	Transferencia de LOX desde Estanque Tk LOX 1 a Tráiler
IT-MEC-RECC2102-XX	Puesta en Marcha Compresor Reciclo C2102
IT-MEC-PARFRIO-XX	Partida en Frío de planta A.S.U.
IT-MEC-PMUREF-XX	Puesta en Marcha Unidad de Refrigeración
IT-MEC-PMCPC2101-XX	Puesta en Marcha Compresor Principal de Aire C2101
IT-MEC-PMTEX-XX	Puesta en Marcha de Turbina Expansión
IT-MEC-ANAECAR-XX	Análisis de pureza de LOX y LIN en estanque, Carga tráiler o Termo
IT-MEC-TRANSLOX-XX	Transferencia de LOX desde Tk LOX 1 a Tk LOX 02
IT-MEC-TRANSLIN-XX	Transferencia de LIN desde tk LIN 1 a tk VS 1500 LIN
IT-MEC-DETPRO-XX	Detención Programada de Planta A.S.U.
IT-MEC-PMCALANALIZ-XX	Puesta en Marcha y Calibración de Analizadores
IT-MEC-CORTE-XX	Corte de Energía en Planta A.S.U



## OPERACIÓN Y CONTROL PLANTA



MP-MEC-OPECON-09

IT-MEC-PARCALI-XX	Partida en Caliente de Planta A.S.U.
IT-MEC-PMAMO-XX	Puesta en Marcha Molecular Sieve 2600
IT-MEC-PUREZALOX-XX	Recuperación de pureza de LOX de Planta A.S.U.
IT-MEC-PUREZALIN-XX	Recuperación de Pureza de LIN de Planta A.S.U.
IT-MEC-DESCARLIN-XX	Descarga de LIN desde Isotanque hacia estanque
IT-MEC-DESCARLOX-XX	Descarga de LOX desde cisterna hacia estanque
IT-MEC-ACFILTROS-XX	Acciones a tomar en caso de anomalías en los Filtros Moleculares
IT-MEC-SUMINACE-XX	Suministro de Oxígeno y Nitrógeno hacia Acería)
IT-MEC-FILAIRE-XX	Partida del Filtro Principal

#### 4. DEFINICIONES:

**Bitácora, Libro diario de novedades o Log Book:** Libro diario en donde se registran las actividades y novedades presentes por cada turno.

**Registros:** Datos consignados en formatos establecidos sobre la toma de mediciones en equipos, instrumentos y procesos de producción y suministro en línea.

*Nota:* La figura muestra las actividades relevantes para realizar la operación de rutina de la Planta ASU de INDURA ECUADOR S.A. Tomado del Manual de Operaciones y Control Planta.

### Anexo 3: Registro Bitácora de Operación.

#### Figura 3

Registro FR-MEC-BOH1-XX: Bitácora de Operación – Sala de Control.

PUNTO CRÍTICO DE CONTROL				FECHA																																																																							
ETAPA	Columna T3201 - O2			DÍA			MES			AÑO																																																																	
TIPO DE RIESGO	Químico			19			08			2024																																																																	
PELIGRO	Arrastre de oxígeno en producto a estanque estacionario de almacenamiento			1° TURNO						2° TURNO																																																																	
MEDIDA DE CONTROL	El operador debe dejar el registro cada dos horas en la bitácora de planta, el análisis de pureza de los líquidos criogénicos separados. IT-EC-PUREZALIN-XX PCC 06 IT-EC-PUREZALOX-XX			9:00						11:00						13:00						15:00						17:00						19:00						21:00						23:00						1:00						3:00						5:00						7:00					
MOLECULAR SIEVES																																																																											
FIC 5810	FLUJO AIRE SALIDA C2101	3600...4300	Nm <sup>3</sup> /h	3266	3232	3286	3266	3224	3204	3301	3243	3244	3254	3196	3200																																																												
PI 5810	PRESIÓN AIRE SALIDA C2101	4,7 ..... 5,3	bar	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8																																																												
TI 5810	TEMP. AIRE SALIDA C2101	8 ..... 35	°C	7	7	8	8	22	7	21	7,1	7,1	13,7	6,6	7,1																																																												
PIAL 2610	FLUJO GAS DE REGENERACION	800...>1000	Nm <sup>3</sup> /h	965	939	959	982	999	910	910	948	910	966	932	910																																																												
GI 5810	POSICIÓN VALVULA HV 5810	93.....100	%	93	93	93	93	93	93	93	93	93	92	92	91																																																												
PDIZA 2602	DIFERENCIAL PRESION INTERNA	20.....80	Mbar	43	43	46	42	45	44	44	43,6	44	41,9	41,5	45																																																												
TURBINA DE EXPANSIÓN																																																																											
SI 2501	VELOCIDAD DE TURBINA	26.5...28 K	RPM	27	27	27	27	27	27	26,8	27	26,96	27,01	26,97	26,98																																																												
GI 2502	POSICIÓN DE TOBERAS	90...150	%	98	98	99	98	98	98	98	99	99	99	99	99																																																												
PI 2501	PRESIÓN ENTRADA TURBINA	22... 25,5	bar	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,4	23,3	23,3																																																												
PI 2502	PRESIÓN SALIDA TURBINA	4,5.....5,6	bar	4,89	4,88	4,87	4,87	4,87	4,88	4,88	4,89	4,9	4,89	4,89	4,88																																																												
TE 2419	1 TEMP. AIRE SALIDA R 2401	3.....24	°C	6	8	7	7	7	8	8,1	8,8	8,5	7,8	5,7	6																																																												
TE 2501	2 ENTRADA TURBINA	-107...-127	°C	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-114	-114																																																												
TE 2502	3 SALIDA TURBINA	-158...-167	°C	-163	-163	-163	-163	-163	-163	-163	-162	-163	-162	-162	-162																																																												
TE 5820	4 O2 GAS SALIDA CAJA FRIA	5.....30	°C	19	21	23	23	22	21	20	18,1	17,8	15,9	15	15																																																												
TE 5835	5 N2 GAS SALIDA CAJA FRIA	1.....35	°C	42	42	42	42	42	41	41,1	41,1	41	41,1	40,5	40,6																																																												
TE 5870	6 AIRE RECIRCUL. SAL. CAJA FRIA	25.....45	°C	24	24	25	25	25	24	24	24,6	24,5	24	23,5	23,5																																																												
TE 5880	7 NITROG. IMPURO SAL. CAJA FRIA	30.....80	°C	28	28	28	28	28	27	28	27,8	27,8	27,3	26,6	26,7																																																												
TE3202	8 ENTRADA AIRE NO EXP. COLUMNA	-155...-167	°C	-159	-159	-159	-159	-159	-159	-159	-158	-158	-158	-158	-158																																																												
TE 3203	9 ENTRADA DE AIRE EXP. COLUMNA	-148...-163	°C	-154	-154	-154	-154	-154	-154	-154	-154	-154	-154	-154	-154																																																												
TE 3205	10 OXIG. IMPURO ENT. COL. L. P.	-170...-179	°C	-179	-179	-179	-179	-179	-179	-179	-179	-179	-179	-178	-178																																																												
TE 3206	11 NITROG. ENT. COL. BAJA PRESIÓN	-175...-189	°C	-186	-185	-185	-185	-185	-185	-185	-185	-185	-185	-185	-185																																																												
TE 3208	12 NITROG. GAS SALIDA E3101	-170...-175	°C	-175	-175	-175	-175	-175	-175	-175	-175	-174	-174	-174	-174																																																												
TE 3212	13 OXÍGENO LÍQUIDO SALIDA E 3101	-181...-187	°C	-181	-181	-181	-181	-181	-181	-180	-180	-180	-180	-180	-180																																																												
TE 3282	14 NITRÓGENO IMPURO SAL. E 3101	-160...-175	°C	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-170	-170																																																												
TE 5801	15 AIRE RECIRCUL. ENT. CAJA FRIA	25.....45	°C	37	37	38	38	38	37	37,8	37,6	37,2	37,1	36,8	36,5																																																												
TE 4331	16 AGUA DE ENFRIAMIENTO SISTEMA	12.....28	°C	13	13	14	14	14	13	14	13,9	13,1	13,9	13	13																																																												

PI 3201	PRESIÓN COLUMNA M.P.	4,5.....5	bar	4,86	4,87	4,86	4,86	4,86	4,87	4,88	4,86	4,88	4,87	4,87	4,85
PDI 3202	PRESIÓN DIF. COL. M.P.	110.....155	mbar	112	112	111	111	113	112	111	110	111	109	108	108
PI 3211	PRESIÓN COLUMNA L.P.	0,45.....0,8	bar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76
PDI 3212	PRESIÓN DIF. COL. L.P.	200.....365	mbar	278	277	276	276	278	277	270	264	263	253	253	255
LIC 3201	NIVEL CRUDO COLUMNA MED. PRESIÓN	80.....83	%	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
LIC 3211	NIVEL OXÍGENO CONDENSADOR	60.....63	%	60	60	60	60	60	60	60	59,1	60	59,7	60	59,9
FIC 5820	FLUJO GOX GAS SAL. CAJA FRIA	DIP	Nm <sup>3</sup> /h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PI 5820	PRESIÓN GOX. GAS SAL. CAJA FRIA	0,6.....0,8	bar	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
HC 5820	POSICIÓN HC 5820	DIP	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FIC 5835	FLUJO NIT. GAS SALIDA CAJA FRIA	DIP	Nm <sup>3</sup> /h	1198	1200	1202	1197	1198	1201	1100	1080	1006	852	849	897
PI 5835	PRESIÓN NIT. GAS SALIDA CAJA FRIA	100.....350	mbar	282	277	274	269	265	263	290	300	337	396	353	399
HC 5835	POSICIÓN HC 5835	DIP	%	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
QRAH 2602	IMPUREZAS FILTROS MOLECULARES	0, <2	ppm CO <sub>2</sub>	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,86	0,86	0,86	0,84	0,84
QRA 3280	PORCENTAJE DE O <sub>2</sub> EN N <sub>2</sub> DE REGENERACIÓN	DIP	%	9,8	9,9	9,8	9,8	9,8	9,9	11	12,8	13,5	18,9	17,71	17,1
FI 2510	FLUJO AIRE RECIRCULACIÓN	8,5.....10,2 K	Nm <sup>3</sup> /h	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
PI 2510	PRESIÓN SALIDA C2102	18,1.....20,3	bar	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
HIC 5870	POSICIÓN HC 5870	100	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
HC 3201	POSICIÓN HV 3201	34.....36	%	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
HC 3207	POSICIÓN HV 3207	DIP	%	3	3	3	3	3	3	6	10	14	14	14	14
HC 3210	POSICIÓN HV 3210	-2,4...0	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HC 3211	POSICIÓN HV 3211	DIP	%	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
<b>Punto Crítico de Control 06</b>															
QRA 5820	PUREZA OXÍGENO PRODUCCIÓN	99,6.....100	%	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9
QRA 5835	PUREZA NITRÓGENO PRODUCCIÓN	0.....6	PPM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,7
QRA 5835	PUREZA NITRÓGENO SUMINISTRO	0.....6	PPM												
OBSERVACIONES															
PRIMER TURNO															
SEGUNDO TURNO															
														FR-EC-BOH1-05	

*Nota:* La figura muestra la información de los parámetros operacionales de la Planta ASU.  
Tomado del Manual de Operaciones - Protocolo de Calificación de Operación de planta ASU.

## Anexo 4: Bitácora de Operación – Unidad de Refrigeración (R-2401) / Separador de Agua (Ciclón) / Totalizador Másico / Filtro Principal.

### Figura 4

Registro FR-MEC-BOH2-XX: Bitácora de Operación – Unidad de Refrigeración (R-2401) / Separador de Agua (Ciclón) / Totalizador Másico / Filtro Principal.

FECHA			OPERADORES		LOTE
DIA	MES	AÑO	1 TURNO	2 TURNO	
20	6	2024	Fabian Veloso	0	LOX 24 07 18 LIN 24 07 18

NOMENCLATURA	UNIDAD DE REFRIGERACION R 2401										SEPARADOR DE AGUA (CICLÓN)		TOTALIZADOR MASICO		FILTRO PRINCIPAL	
	PRESION AGUA		TEMPERATURA			COMPRESOR DE FREON			PRESION DE ACEITE BAR	CORRIENTE AMP.	NIVEL DE AGUA %	FUNCIONA Estado	GOX (Adelca) kg	GAN kg	PRE FILTER Pa.	FINAL FILTER Pa.
	PI 2422 BAR	PI 2423 BAR	TI 2411 °C	TI 2412 °C	TI 2413 °C	PI 2424 PSI	PI 2425 PSI	PI 2426 PSI								
RANGOS DE OPER.	1,0.....2,6	1,0.....2,6	4...10	4...8	3...8	150.....250	30.....70	9....15	0...35	0.....15%		-----	-----	50.....120	50.....299	
1.-TURNO	9:00	2,6	0,3	9	8	8	169	54	11,3	0	7	ok			50	100
	11:00	2,6	0,3	8	10	10	206	42	13,8	29,3	7	ok			50	100
	13:00	2,6	0,3	8	11	11	209	43	14	29,5					50	100
	15:00	2,6	0,3	6	8	8	205	42	13,9	29,1	7	ok			50	100
	17:00	2,6	0,3	7	6	6	171	46	11,9	0					50	100
2.-TURNO	19:00	2,6	0,3	7	8	8	207	42	13,8	29,3	7	ok			50	100
	21:00	2,6	0,3	7	7	7	205	31	13	30	7	ok			50	100
	23:00	2,6	0,3	6	7	7	201	33	13	30	7	ok			50	100
	1:00	2,6	0,3	7	6	6	200	33	12	29	7	ok			50	100
	3:00	2,6	0,3	6	7	7	200	33	12	29	7	ok			50	100
	5:00	2,6	0,3	7	9	10	210	33	14	29	7	ok			50	100
	7:00	2,6	0,3	6	7	8	200	31	13,1	30	7	ok			50	100

### REGISTRO DIARIO DE ENERGIA Y NIVELES DE ESTANQUES

		KW - 2.4 KV			TK1 - LOX - PRODUCCIÓN			VS -11000		TK1 - LIN - PROD.		VS-1500		PRESION SUMINISTRO	
		Kw /h	Kvar/h	Kwh	% Tablero	Manóm (m3 X 1K)	PRESION (psi)	Manómetro * H2O	PRESION (psi)	* H2O	PRESION (psi)	*H2O	PRESION (psi)	LINEA GOX (psi)	LINEA GAN (psi)
1.-TURNO	7:00	7868350	3140819	2810888	75,7	70	8	240	200	123	4	59	175		
	9:00	7869693	3141257	2810782	76,5	71	8			124	4				
	11:00	7871795	3142009	2810854	77,6	72	8			124	4				
	13:00	7873899	3142867	2810932	78,7	73	8			124					
	15:00	7875874	3143572	2810995	79,8	74	8			125	4				
	17:00	7877852	3144390	2811064	81	75	8			125					
	19:00	7879965	3245193	2811139	82,1	76	8	240	200	126	4	58	175		
2.-TURNO	21:00	7881329	3145822	2811208	83,5	77	8			127	4				
	23:00	7883779	3146672	2811295	71,5	67	8			128	4				
	1:00	7886642	3147721	2811460	72,6	68	8			130	4				
	3:00	7888021	3148851	2811501	73,7	69	8			132	4				
	5:00	7890864	3149070	2811540	74,8	70	8			133	4				
	7:00	7896980	3149951	2811695	76	71	8	240	200	134	4	58	175		

OBSERVACIONES	
PRIMER TURNO	
SEGUNDO TURNO	FR-EC-BOH2-6

Nota: La figura muestra la información de los parámetros operacionales de la Planta ASU.

Tomado del Manual de Operaciones - Protocolo de Calificación de Operación de planta ASU.

## Anexo 5: Bitácora de Operación - Compresor Principal (C-2101).

### Figura 5

Registro FR-MEC-BOH3-XX: Bitácora de Operación - Compresor Principal (C-2101).

		FECHA			OPERADORES											
		DIA	MES	AÑO	1 TURNO						2 TURNO					
		18	06	2024	Edgar Simbaña						0					
TEMPERATURAS MOTOR	RANGOS DE OPERACIÓN	NOMENCLATURA	1° TURNO						2° TURNO							
			9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	1:00	3:00	5:00	7:00		
Estator A	75.....95	°C TE 106	73	74	75	76	77	72	72	72	72	71	70	70		
Estator B	80.....95	°C TE 107	78	79	80	81	82	81	76	77	76	75	76	76		
Estator C	78.....90	°C TE 108	74	75	76	77	78	77	74	73	73	73	72	72		
Temp. Descanso interno	65.....70	°C TE 109	63	64	64	64	64	63	63	63	63	63	62	62		
Temp. Descanso externo	65.....70	°C TE 110	70	71	71	71	71	70	70	69	68	68	68	68		
VIBRACIONES																
1ª Etapa	0.5.....1.2	Mils VT 110	0.75	0.75	0.75	0.76	0.76	0.75	0.74	0.75	0.75	0.74	0.74	0.74		
2ª Etapa	0.2.....0.4	Mils VT 111	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65		
3ª Etapa	0.2.....0.4	Mils VT 112	0.48	0.48	0.48	0.47	0.48	0.47	0.48	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47		
AIRE DE ENTRADA Y SALIDA																
Temp. Entrada Aire	Ambiente	°C TI2100	14	16	18	19	19	16	12	11	9	8	8	8		
Temp. Salida 1ª etapa	115.....148	°C TI 2110	127	129	130	132	134	132	129	129	124	122	122	121		
Temp. Entrada 2ª etapa	35.....50	°C TE 103	19	20	20	21	21	20	19	19	18	19	19	19		
Temp. Salida 2ª etapa	125.....138	°C TI 2115	92	93	90	93	93	92	110	112	110	109	110	110		
Temp. Entrada 3ª etapa	30.....45	°C TE 104	30	31	31	31	31	30	30	30	29	30	30	30		
Temp. Salida 3ª etapa	80.....95	°C TI 2113	91	92	92	92	92	91	90	88	88	88	88	88		
Temp. descarga	22.....35	°C TE 105	28	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27	27		
Presión sistema	71.....77	Psi PT 101	71.5	71.5	71.5	71.5	71.5	71.5	71	71.5	71	71	71.5	71.5		
Presión descarga	72.....75	Psi PT 102	72.9	72.9	72.9	72.9	72.8	72.9	73	72.9	72.8	72	72.9	72		
CONTROL AUTOMÁTICO																
Válvula de admisión (VANE)	-----	% FY 101	35.4	44.8	45.7	43.2	38.3	41.5	41	41.3	40	38	36.1	37		
Válvula venteo (BLOW OFF)	-----	% PY 102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
AGUA ENFRIAMIENTO																
Salida enfriador 1ª etapa	22.....32	°C TI 2132	17	17	17	18	18	17	17	17	17	17	17	17		
Salida enfriador 2ª etapa	24.....35	°C TI 2131	21	22	22	22	22	21	21	22	21	21	20	20		
Salida enfriador 3ª etapa	23.....34	°C TI 2138	17	18	18	19	19	18	18	18	18	17	17	17		
Presión de entrada	30.....38	Psi PI 4331	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40		
Temp. Salida intercambiador acele	24.....34	°C TI 2137	19	20	20	20	20	19	19	19	19	19	19	19		
ACEITE																
Presión de aceite	15.....30	Psi PT 105	20.2	20.1	19.9	19.8	20	19.9	20	20	20	20	19.9	20		
Temp. Aceite entrada intercambiador	52.....58	°C TI 2134	57	58	58	57	57	56	56	56	55	56	56	56		
Temp. Aceite salida intercambiador	42.....49	°C TE 101	48	48	48	48	48	48	48	48	48	47	47	47		
PDI 2134	750.....850	mbar PDI 2134	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500		
CONDICIONES DE OPERACIÓN																
Corriente de motor	119.....147	Amp IT 114	114.3	114.8	115.2	115.3	114.1	114.8	115	113	112	113	114	114		
Señal motor encendido	-----	ON	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok		
Señal paro de emergencia	-----	N	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok		
Surge Watch en motor	-----	%	1	1.3	1.1	1.5	1.7	1.3	1.2	1.6	1.1	1	1.6	1.2		
Contador de Surge	-----	CIU	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
OBSERVACIONES																
PRIMER TURNO														FR-EC-BOH3-03		
SEGUNDO TURNO																

Nota: La figura muestra la información de los parámetros operacionales de la Planta ASU.

Tomado del Manual de Operaciones - Protocolo de Calificación de Operación de planta ASU.

## Anexo 6: Bitácora de Planta – Compresor de Reciclo (C - 2102).

### Figura 6

Registro FR-MEC-BOH4-XX: Bitácora de Planta – Compresor de Reciclo (C - 2102).

FECHA			OPERADORES												
DIA	MES	AÑO	1 TURNO						2 TURNO						
18	06	2024	Edgar Simbaña						0						
TEMPERATURAS COMPRESOR			Rango operac.	1° TURNO						2° TURNO					
TI	T°	Descripción	°C	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	1:00	3:00	5:00	7:00
TI2161	T° entrada 1ra etapa	30-45	°C	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
TI2152	T° salida 1ra etapa	110-150	°C	113	114	115	116	116	117	116	115	116	116	116	116
TE103	T° entrada 2da etapa	50-60	°C	45	46	46	47	47	46	46	46	46	45	45	45
TI2154	T° descarga 2da etapa	100-150	°C	114	115	116	117	117	118	113	114	115	115	115	115
TE105	T° descarga	30-60	°C	50	50	50	51	51	50	50	50	50	49	49	49
TEMPERATURAS MOTOR															
TE106	Estator A	70-98	°C	86	88	89	90	90	89	85	84	83	83	83	82
TE107	Estator B	80-98	°C	86	88	89	90	90	89	85	84	83	83	82	83
TE108	Estator C	80-95	°C	86	88	89	89	89	88	85	84	83	83	82	82
TE109	T° descanso interno	60-80	°C	62	63	63	63	63	62	62	62	61	61	61	61
TE110	T° descanso externo	60-80	°C	65	66	66	66	66	65	65	64	64	64	64	65
IT114	Corriente	160-185	173	174	173	172	173	171	172	172	171	170	173	174	175
CONTROL SURGE															
SurgeWatch en Motor	-	%		2,1	1,8	2,3	1,9	1,9	2,1	1,2	1,3	1,2	1,1	1,3	1,1
Contador de surge	Alarm 12			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VIBRACIONES															
VT110	1ra etapa	1 - 1,2	mils	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
VT111	2da etapa	1 - 1,2	mils	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,41	0,41	0,4
CONTROL AUTOMATICO															
FY101	Válvula de admisión	-	%	32,2	32,5	31,9	32,8	33	32,9	33	32	31	32	32,1	31
PY102	Válvula blow off (recycle)	-	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACEITE															
PT105	Presión aceite	12--35	PSIG	28,6	27,9	28,9	28,1	28	27,9	28	28	27,9	28	28	27,9
TI 2184	T° entrada intercamb.	55-65	°C	55	56	57	57	57	56	56	56	56	55	55	55
TE101	T° salida intercamb. agua	21 - 60	°C	47	47	47	47	47	46	47	47	47	46	46	46
PDI 2193	Diferencia filtro	900-1200	mbar	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
TI2187	T° salida intercamb. agua	25-35	°C	15	16	16	16	16	15	15	16	16	15	15	15
AGUA ENFRIAMIENTO															
TI2182	Salida enfriador 1ra etapa	30-40	°C	26	27	27	27	27	26	27	27	27	27	27	27
TI2181	Salida enfriador 2da etapa	30-40	°C	26	27	27	27	27	26	27	27	27	27	27	27
PRESIONES															
PT - 101	Presión del sistema	260-280	PSIG	268	268	268	268	268	268	268	268	269	268	268	268
PT-102	Presión descarga	270-280	PSIG	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
PI2161	Presión Succión	70-75	PSIG	70	70	70	70	70	70	72	70	70	71	71	71
PI2162	Presión Descarga	260-280	PSIG	270	270	270	270	270	270	270	270	270	271	271	271
OBSERVACIONES															
PRIMER TURNO															
SEGUNDO TURNO			FR-EC-BOH4-04												

Nota: La figura muestra la información de los parámetros operacionales de la Planta ASU.

Tomado del Manual de Operaciones - Protocolo de Calificación de Operación de planta ASU.

## Anexo 7: Bitácora de Operación Turbina de Expansión (TBX-2501) – PPU's (2601-2602).

### Figura 7

Registro FR-MEC-BOH5-XX: Bitácora de Operación Turbina de Expansión (TBX-2501) – PPU's (2601-2602).

FECHA				OPERADORES											
DIA	MES	AÑO	1 TURNO						2 TURNO						
20	06	2024	Fabian Veloso						0						

ADSORVEDOR	RANGOS DE OPERACIÓN	NOMENCLATURA	1° TURNO						2° TURNO							
			9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	1:00	3:00	5:00	7:00		
Presion Deshidratador 2601	0...5	bar PI 2601	4,8	4,8	0	4,8	0	4,8	0	4,8	0	4,8	4,8	0	4,8	0
Presion Deshidratador 2602	0...5	bar PI 2602	4,8	0	4,8	0	4,8	0	4,8	0	4,8	0	0	4,8	0	4,8
Paso / # de filtro molecular	-----		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

AIRE																
FI 4270	20...145	Nm3/h	FI 4270	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
PI 4270	4,0...5	bar	PI 4270	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8

TURBINA DE EXPANSION																
Presion entrada	22...25	bar	PT - 2501	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
Presion salida	4,5.....5,5	bar	PT - 2502	4,9	4,9	4,9	4,9	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Gup pressure	10,5.....11,5	bar	PI - 502	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
Seal gas	10,8.....11,3	bar	PI - 504	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Posicion By pass	-----	%	HIC - 522	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Velocidad	26,5k...28,0k	rpm	SI - 2501	27	27	27	27	27	27	27	26,8	26,9	26,8	26,9	26,8	26,8
Posicion tobera	-----	%	GI - 2502	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Presion aceite	2,2...2,8	bar	PI - 503	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Temperatura aceite turbina	30.....40	°C		36	37	37	38	38	37	37	37	37	36	35	35	35
Temperatura entre cojinetes TBX	31.....55	°C	TE-2511	45	45	45	45	45	44	44,9	44,5	44,5	44	44,4	44	
Temperatura descanso interior	35.....60	°C	TE - 2512	45	46	46	46	46	45	46	45,1	45	44,9	44,7	44,6	
Temperatura descarga de aire	45.....80	°C	TE - 2513	76	77	77	77	77	76	76,7	76,4	76,3	75,9	75,8	75,7	

BOOSTER																
Presion de entrada	18.....19,5	bar	PI - 506	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	17,5	18,5	18,5	18,5	18,5
Presion de Salida	23.....25	bar	PI - 507	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,3	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5

OBSERVACIONES																
PRIMER TURNO																FR-EC-BOH5-03
SEGUNDO TURNO																

Nota: La figura muestra la información de los parámetros operacionales de la Planta ASU.

Tomado del Manual de Operaciones - Protocolo de Calificación de Operación de planta ASU.

## Anexo 8: Análisis de regresión polinómica.

**Tabla 1**

*Registros históricos del sistema de enfriamiento - Planta ASU*

		13/6/2 024	13/6/2 024	13/6/2 024	14/6/2 024	14/6/2 024	14/6/2 024	15/6/2 024	15/6/2 024	15/6/2 024	16/6/2 024	16/6/2 024	16/6/2 024	17/6/2 024	17/6/2 024	17/6/2 024	18/6/2 024	18/6/2 024	18/6/2 024
Hora rio	Ho ra	TE 4331	TI 2132	TI218 2	TE 4331	TI 2132	TI218 2	TE 4331	TI 2132	TI218 2	TE 4331	TI 2132	TI218 2	TE 4331	TI 2132	TI218 2	TE 4331	TI 2132	TI218 2
9:00	9	14,2	18	27	14,6	17	27	13,2	17	26	13,2	17	27	23,2	17	26	13	17	26
11:00	11	14,4	18	27	14,8	18	28	14,6	17	27	13,8	18	27	23	17	26	14	17	27
13:00	13	14,8	18	28	16	18	28	15,4	17	28	14,8	18	28	23	17	27	14	17	27
15:00	15	15,1	19	29	16,1	18	29	16	18	29	15,6	18	29	23	18	28	15	18	27
17:00	17	15,4	19	29	15,9	18	29	16	18	29	15,8	18	29	18,8	18	28	15	18	27
19:00	19	15,6	18	29	16	17	29	15,9	17	29	15,6	18	29	16	18	28	14	17	26
21:00	21	15	17	27	15	17	28	15,6	17	29	15,6	17,5	29	13,6	17	27	14	17	27
23:00	23	14	17	27	14	17	27	15	18	29	15,6	17	29	13,1	17	27	14,4	17	27
1:00	1	14	17	27	14	17	27	14,7	17	29	15,6	17	29	12,1	17	27	14,3	17	27
3:00	3	14	17	27	13	17	27	14,9	17	28	15,6	16	28	12	16	26	14,1	17	27
5:00	5	14	17	27	13	17	26	14	17	28	15,2	17	28	12	17	26	14	17	27
7:00	7	14	17	27	13	17	26	14,5	17	28	15,1	17	28	12,6	17	26	14	17	27

*Nota:* Esta tabla muestra el registro temperaturas TI 4331, TI 2132 y TI 2182, del sistema de enfriamiento de la planta ASU, este método se transforma en un recurso útil para anticipar comportamientos y tendencias basadas en registros históricos.