

Desarrollo de un software para el diseño de recipientes a presión esféricos mediante el código

ASME BPVC Sección VIII División I

Paula Camila Villamil Báez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Mecánica

Director

Luis Humberto Martínez Palmeth

Doctor en diseño avanzado en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

Dedico este título a mi mamá Adriana que fue mi principal motivación en todo este camino, no fue fácil, pero lo logramos mami, este título es más tuyo que mío. A mi papá Lelis que me enseñó el significado de paciencia, me dio tranquilidad y apoyo en los momentos más difíciles.

Sin sus grandes esfuerzos en pro de mi bienestar esto no sería posible.

A mi hermana Mariana que le da sentido a todo mi esfuerzo y trabajo queriendo aportarle siempre lo mejor de mí, es mi inspiración y mayor compañía para avanzar cada día más.

### **Agradecimientos**

A Dios, por permitirme culminar esta bonita etapa de mi vida y por darme la fortaleza necesaria  
para no rendirme en el camino.

De igual manera, agradezco a mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por  
estar siempre presentes en cada paso de este proceso.

Así mismo, a mi hermana, por su compañía y comprensión, por estar a mi lado en los momentos  
buenos y difíciles, siendo un apoyo fundamental.

De este modo, extendiendo mi agradecimiento a mis familiares y amigos, quienes me acompañaron  
durante esta etapa, brindándome su apoyo y alegrándose conmigo en cada logro alcanzado.

Finalmente, agradezco a mi director de grado, el Doctor Luis Humberto Martínez Palmeth, por  
su orientación, acompañamiento y valiosos aportes en el desarrollo de este trabajo; a la  
Universidad Industrial de Santander, por brindarme los recursos y espacios necesarios para mi  
formación.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Justificación .....	18
3. Objetivos.....	19
3.1 Objetivo General.....	19
3.2 Objetivos Específicos.....	19
4. Marco teórico .....	20
4.1 Recipientes a presión esféricos .....	20
4.1.1 Definición y comportamiento general .....	20
4.2 Código ASME BPVC .....	21
4.2.1 Sección VIII, División 1 .....	21
4.2.2 Sección II, Parte D.....	22
4.3 Variables y criterios de diseño .....	23
4.3.1 Presión y temperatura de diseño .....	23
4.3.2 Esfuerzo admisible.....	24
4.3.3 Eficiencia de junta.....	24
4.3.4 Margen de corrosión .....	24
4.4 Materiales.....	25
4.4.1 Propiedades mecánicas y selección de materiales .....	25
4.5 Aberturas.....	26
4.5.1 Boquillas y refuerzo de aberturas .....	26

4.6 Estructura .....	27
4.7 Ecuaciones de diseño para recipientes esféricos.....	28
4.8 MATLAB.....	36
4.8.1 Funciones de cálculo.....	36
4.8.2 Gestión de datos.....	37
4.8.3 Interfaz gráfica.....	37
4.8.4 Despliegue de aplicaciones.....	38
5. Metodología.....	39
5.1 Fase I. Revisión normativa y estructuración de los datos de entrada.....	39
5.2 Fase II. Desarrollo de las funciones de cálculo en MATLAB.....	40
5.3 Fase III. Desarrollo de la interfaz de usuario y control de interacción.....	41
5.4 Fase IV. Validación del software.....	43
6. Resultados.....	44
6.1 Resultados de la Fase 1.....	44
6.1.1 Clasificación de las variables del proceso de diseño.....	44
6.1.2 Base de datos de materiales.....	46
6.1.3 Base de datos de corrosión.....	47
6.1.4 Base de datos de propiedades de los fluidos.....	49
6.1.5 Base de datos de tamaños de tubería para boquillas.....	51
6.1.6 Estructuración del flujo de datos de entrada.....	52
6.2 Resultados de la Fase II.....	53
6.2.1 Implementación de las funciones de cálculo.....	53
6.2.2 Generación de los archivos de almacenamiento.....	56

6.3 Resultados de la Fase III .....	59
6.3.1 Estructura de la interfaz .....	59
6.3.2 Implementación de componentes gráficos .....	61
6.4 Resultados de la Fase IV .....	70
6.4.1 Selección de casos de prueba .....	71
6.4.2 Ejecución del software .....	73
6.4.3 Comparación de resultados .....	78
7. Conclusiones .....	85
Referencias .....	87

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Corte transversal para refuerzos de boquillas.....	30
Figura 2 Materiales ferrosos para ASME BPVC-II-Parte D .....	46
Figura 3 Materiales ferrosos aplicables para ASME BPVC-VIII-1 .....	47
Figura 4 Propiedades termo-físicas de algunos fluidos .....	49
Figura 5 Ejemplo de dimensiones normalizadas de tamaños de tubería .....	51
Figura 6 Diagrama de flujo de datos para el diseño de recipientes esféricos a presión.....	53
Figura 7 Función desarrollada en MATLAB.....	55
Figura 8 Archivo de almacenamiento de datos.....	58
Figura 9 Pantalla inicial del sistema y definición del flujo general de trabajo.....	61
Figura 10 Selección del fluido de proceso mediante lista desplegable.....	63
Figura 11 Selección de la condición externa para evaluación de corrosión .....	64
Figura 12 Pantalla de captura de datos iniciales de diseño.....	65
Figura 13 Pantalla de datos preliminares para cálculo.....	66
Figura 14 Módulo de selección de boquillas .....	67
Figura 15 Tabla de boquillas con parámetros definidos por el usuario .....	68
Figura 16 Previsualización de la memoria de cálculo generada por el sistema.....	69
Figura 17 Memoria de cálculo generada por el sistema .....	70
Figura 18 Valor de CA para el caso 1 .....	73
Figura 19 Ingreso de datos para el caso 1 .....	74
Figura 20 Valores preliminares arrojados por sferapp.....	75

Figura 21 Presión de diseño calculado en sferapp .....	76
Figura 22 Valores obtenidos para el material seleccionado.....	76
Figura 23 Resultado de espesor para el caso 1 .....	77
Figura 24 Resultados para los refuerzos del MA1 .....	80
Figura 25 Resultados de la estructura para el caso 4 .....	81
Figura 26 Sección transversal del tubo en SolidWorks .....	82
Figura 27 Resultado del análisis estático en SolidWorks .....	83
Figura 28 Resultado del análisis de pandeo en SolidWorks .....	84

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Actividades desarrolladas en la Fase I.....	40
Tabla 2 Actividades desarrolladas en la Fase II.....	41
Tabla 3 Actividades desarrolladas en la Fase III .....	42
Tabla 4 Actividades desarrolladas en la Fase IV .....	43
Tabla 5 Clasificación de las variables del proceso de diseño .....	45
Tabla 6 Valores de tasa de corrosión para materiales y condiciones seleccionadas.....	48
Tabla 7 Coeficientes polinómicos para el cálculo de la densidad de fluidos.....	50
Tabla 8 Resumen de funciones desarrolladas .....	56
Tabla 9 Resumen de archivos .mat creados .....	58
Tabla 10 Comparación de resultados de espesor .....	78
Tabla 11 Comparación de resultados para las boquillas .....	80

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Funciones para cálculo del recipiente.

Apéndice B. Base de datos de propiedades, materiales y fluidos.

Apéndice C. Interfaz gráfica.

Apéndice D. Herramienta computacional de cálculo.

Apéndice E. Memoria de cálculo para las validaciones.

Apéndice F. Manual de instalación

## Glosario

**ASME BPVC:** Código desarrollado por la *American Society of Mechanical Engineers* que establece los requisitos técnicos para el diseño, fabricación, inspección y prueba de calderas y recipientes a presión.

**ASME BPVC Sección VIII División I:** Parte del ASME BPVC que define los criterios de diseño por reglas para recipientes a presión, incluyendo ecuaciones para el cálculo de espesor, verificaciones de esfuerzo y requisitos generales de seguridad.

**Casco:** Elemento estructural principal del recipiente a presión que contiene el fluido y soporta directamente los esfuerzos generados por la presión interna.

**Condiciones de operación:** Conjunto de variables que describen el estado de funcionamiento del recipiente, tales como presión, temperatura y tipo de fluido contenido.

**Corrosión:** Proceso de degradación del material causado por interacciones químicas o electroquímicas con el entorno o el fluido de operación, considerado en el diseño mediante una tolerancia adicional de espesor.

**Espesor mínimo:** Espesor requerido del casco obtenido a partir de las ecuaciones normativas del código aplicable, sin considerar tolerancias adicionales por corrosión u otros factores.

**Espesor nominal:** Espesor final de diseño del recipiente, que resulta de sumar al espesor mínimo la tolerancia por corrosión y otros márgenes establecidos.

**Fluido de operación:** Sustancia contenida en el recipiente a presión, cuyas propiedades físicas influyen en las condiciones de diseño y en el comportamiento del sistema.

**Interfaz gráfica de usuario (GUI):** Entorno visual que permite la interacción entre el usuario y el software, facilitando el ingreso de datos, la ejecución de cálculos y la visualización de resultados.

**Presión de diseño:** Presión máxima utilizada para el dimensionamiento del recipiente, definida conforme a los criterios del código de diseño y superior a la presión de operación.

**Recipiente a presión:** Equipo diseñado para contener fluidos a presiones superiores a la atmosférica, bajo condiciones controladas y conforme a códigos y normas técnicas.

**Recipiente esférico:** Tipo de recipiente a presión cuya geometría principal es una esfera, caracterizado por una distribución uniforme de esfuerzos cuando está sometido a presión interna.

**Repositorio de datos:** Conjunto estructurado de información técnica, como propiedades de materiales, fluidos y corrosión, utilizado por el software para ejecutar los cálculos de diseño.

**Tolerancia por corrosión:** Incremento de espesor añadido al diseño para compensar la pérdida de material esperada durante la vida útil del recipiente.

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un software para el diseño de recipientes a presión esféricos mediante el código ASME BPVC Sección VIII División I\*

**Autor:** Paula Camila Villamil Báez\*\*

**Palabras Clave:** ASME, Matlab, Recipientes a presión

**Descripción:** El diseño de recipientes a presión constituye una actividad crítica en la ingeniería mecánica debido a los riesgos asociados a su operación y a la necesidad de cumplir estrictos criterios normativos que garanticen la seguridad y confiabilidad de estos equipos. En particular, los recipientes a presión esféricos presentan ventajas estructurales relevantes, pero su diseño requiere la correcta aplicación de los lineamientos establecidos en el ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sección VIII División I. No obstante, en el contexto académico, la aplicación manual de dichos procedimientos resulta compleja y propensa a errores, y se evidencia la ausencia de herramientas computacionales orientadas específicamente a apoyar el proceso de enseñanza del diseño normativo de este tipo de recipientes. En este sentido, el presente trabajo propone el desarrollo de un software especializado que implemente de forma sistemática los criterios del código ASME para el diseño de recipientes a presión esféricos, con el propósito de facilitar su comprensión y aplicación en el ámbito formativo. La metodología se basó en la estructuración de los datos de entrada, la programación del modelo matemático en MATLAB, el desarrollo de una interfaz gráfica y la validación del software mediante la comparación con diseños documentados en la literatura técnica. Como resultado, se obtuvo una herramienta funcional que reproduce de manera consistente los procedimientos normativos, con diferencias relativas reducidas frente a referencias técnicas, confirmando su utilidad como apoyo académico en el diseño de recipientes a presión esféricos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería. Director: Luis Humberto Martínez Palmeth. Doctor en diseño avanzado en Ingeniería Mecánica.

### Abstract

**Title:** Development of Software for the Design of Spherical Pressure Vessels Using the ASME BPVC Section VIII Division I Code\*

**Author(s):** Paula Camila Villamil Báez \*\*

**Key Words:** ASME, MATLAB, Pressure Vessels

**Description:** The design of pressure vessels is a critical activity in mechanical engineering due to the risks associated with their operation and the need to strictly comply with normative criteria that ensure the safety and reliability of these systems. In particular, spherical pressure vessels present significant structural advantages; however, their design requires the correct application of the guidelines established in the ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I. In academic contexts, the manual application of these procedures is complex and prone to errors, and there is a lack of computational tools specifically aimed at supporting the teaching of normative design for this type of vessel. In this regard, this work proposes the development of specialized software that systematically implements the ASME code criteria for the design of spherical pressure vessels, with the purpose of facilitating their understanding and application in educational settings. The methodology was based on structuring the required input data, programming the mathematical model in MATLAB, developing a graphical user interface, and validating the software by comparing its results with documented designs reported in the technical literature. As a result, a functional tool was obtained that consistently reproduces the normative procedures, presenting reduced relative differences with respect to technical references, thus confirming its usefulness as an academic support tool for the design of spherical pressure vessels.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Engineering. Advisor: Luis Humberto Martínez Palmeth. PhD in Advanced Design in Mechanical Engineering.

## Introducción

El diseño de recipientes a presión ocupa un lugar importante en la ingeniería mecánica por su aplicación en sectores como el energético, el químico, el petroquímico y el industrial. Debido a que estos equipos operan bajo condiciones de presión que pueden comprometer la seguridad de las instalaciones y de las personas, su dimensionamiento debe desarrollarse con base en criterios técnicos y normativos que aseguren un comportamiento estructural adecuado.

Dentro de esta categoría, los recipientes esféricos presentan un interés particular, ya que su geometría favorece una distribución más uniforme de los esfuerzos generados por la presión interna. Sin embargo, su diseño exige considerar de manera integrada variables como la presión de operación, las propiedades mecánicas del material, la corrosión admisible y las condiciones geométricas del equipo, todo ello bajo el marco de un código reconocido.

En este contexto, la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), a través del *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC), Sección VIII, División 1 (BPVC-VIII-1), constituye una de las referencias normativas más utilizadas para el diseño de recipientes a presión. No obstante, la aplicación directa de sus procedimientos puede resultar extensa en entornos académicos, especialmente cuando se busca no solo obtener resultados, sino también comprender la secuencia de cálculo y la influencia de cada parámetro de diseño.

Frente a ello, el uso de herramientas computacionales representa una alternativa adecuada para trasladar los procedimientos normativos a un entorno de trabajo más ordenado, trazable y didáctico. Con base en esta necesidad, el presente proyecto plantea el desarrollo de un software para el diseño de recipientes a presión esféricos mediante la implementación del código BPVC-

VIII-1 en MATLAB, con orientación al apoyo del proceso formativo en la Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM) de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

## 1. Planteamiento del problema

El diseño de recipientes a presión requiere aplicar procedimientos normativos que permitan determinar dimensiones, espesores y condiciones de seguridad acordes con las exigencias del servicio. En el caso de los recipientes esféricos, esta tarea implica trabajar con criterios establecidos en el código BPVC-VIII-1, cuya aplicación demanda el manejo organizado de variables de entrada, ecuaciones de diseño y verificaciones técnicas.

Aunque existen programas comerciales orientados al análisis y diseño de recipientes a presión, su uso en contextos académicos no siempre resulta viable. Las restricciones de licencia, los costos de adquisición y la limitada disponibilidad institucional reducen el acceso de estudiantes y docentes a este tipo de herramientas, dificultando la apropiación práctica de los procedimientos normativos y su relación con los fundamentos teóricos del diseño mecánico.

A esta limitación se suma que, en muchos casos, el estudiante termina dependiendo de resultados generados por software especializado sin contar con una herramienta ajustada a fines formativos, que permita seguir la lógica de cálculo, identificar las variables involucradas y relacionar los resultados con los criterios del código. Esto genera una brecha entre el estudio de la norma y su aplicación computacional en ejercicios de diseño.

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar una herramienta computacional accesible que implemente los lineamientos del BPVC-VIII-1 para el diseño de recipientes a presión esféricos, y que además cuente con una interfaz que facilite el ingreso de datos, la visualización de resultados y la validación de los cálculos en un entorno académico.

## 2. Justificación

El desarrollo de un software para el diseño de recipientes a presión esféricos se justifica por su aporte al proceso de formación en ingeniería mecánica, al ofrecer una herramienta que permita aplicar de manera estructurada los procedimientos del código BPVC-VIII-1. Más que reemplazar el análisis técnico, el software busca servir como apoyo para comprenderlo, organizarlo y ejecutarlo de forma consistente.

Desde el punto de vista académico, la herramienta facilita la articulación entre los fundamentos teóricos del diseño mecánico y su implementación computacional. Esto permite que el usuario no solo obtenga resultados, sino que también reconozca la secuencia de cálculo, las variables que intervienen y el efecto de los criterios normativos sobre el diseño final. En ese sentido, el proyecto fortalece el aprendizaje aplicado y favorece el uso de recursos tecnológicos en la enseñanza de asignaturas afines.

Desde el punto de vista técnico, la implementación de las ecuaciones de diseño y verificación en MATLAB contribuye a sistematizar el procedimiento de cálculo, reducir errores asociados al desarrollo manual y presentar resultados de manera ordenada. Asimismo, el diseño de una interfaz gráfica mejora la interacción con el software y amplía su utilidad como recurso de apoyo para estudiantes y docentes.

Por otra parte, el proyecto aporta una base funcional que puede ser ampliada en futuros desarrollos, ya sea mediante nuevas rutinas de cálculo, mayores capacidades de reporte o la incorporación de otros componentes normativos. Por ello, su valor no radica únicamente en resolver una necesidad puntual, sino en constituir una herramienta académica con potencial de crecimiento dentro de la EIM de la UIS.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Desarrollar un software especializado para el diseño de recipientes a presión esféricos, mediante la implementación del código ASME BPVC Sección VIII División I en un entorno computacional, con el propósito de poner a disposición de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS una herramienta accesible que permita aplicar los procedimientos normativos en el proceso de formación académica.

#### 3.2 Objetivos Específicos

Establecer los datos de entrada necesarios para el diseño de recipientes a presión esféricos, a partir de los parámetros definidos en el código ASME BPVC Sección VIII División I, con el fin de disponer de la información requerida para realizar los cálculos de espesor y esfuerzo.

Programar en MATLAB las ecuaciones del código ASME BPVC Sección VIII División I, utilizando funciones que resuelvan el cálculo de espesor y la verificación de esfuerzos, con el fin de automatizar el diseño de recipientes a presión esféricos.

Diseñar una interfaz gráfica en MATLAB que permita ingresar los datos del diseño, mostrar los resultados calculados y generar reportes estructurados, con el fin de facilitar el uso del software por parte del usuario.

Validar el software mediante la comparación de resultados con diseños documentados y referencias técnicas, aplicando los lineamientos del código ASME BPVC Sección VIII División I, con el fin de verificar que los cálculos se correspondan con resultados esperados en escenarios de diseño conocidos.

## 4. Marco teórico

En este capítulo se presentan los conceptos normativos y técnicos necesarios para el diseño de recipientes a presión esféricos. Se abordan el código ASME BPVC, las variables de diseño, los materiales, las aberturas, las ecuaciones de cálculo y el entorno MATLAB, como base conceptual del software desarrollado.

### 4.1 Recipientes a presión esféricos

Los recipientes a presión esféricos constituyen una configuración de interés en ingeniería mecánica debido a su comportamiento estructural frente a la presión interna. Su análisis se apoya en relaciones de esfuerzo de membrana y en criterios de diseño establecidos por norma.

#### 4.1.1 Definición y comportamiento general

Un recipiente a presión es un equipo cerrado diseñado para contener fluidos a una presión diferente de la atmosférica (ASME, 2023). Su diseño debe asegurar que las tensiones generadas durante la operación permanezcan dentro de límites admisibles, de acuerdo con las propiedades del material y con los requisitos establecidos por los códigos de diseño (Delgadillo Rendon, 2026). Dentro de las geometrías empleadas en este tipo de equipos, la forma esférica presenta particular interés por su respuesta mecánica bajo presión interna.

En un recipiente esférico, la presión interna produce esfuerzos tangenciales de igual magnitud en toda la superficie del casco (ASME, 2023). Esta distribución uniforme de esfuerzos constituye una de las principales ventajas estructurales de la geometría esférica, ya que permite un aprovechamiento más eficiente del material en comparación con otras configuraciones, como la

cilíndrica (Vargas Olmedo & Tortorella Rodríguez, 2025). Desde el punto de vista del análisis, esto facilita el uso de expresiones cerradas para el dimensionamiento del espesor del casco.

El comportamiento de estos recipientes suele analizarse bajo la hipótesis de pared delgada, condición en la cual el espesor es pequeño en relación con el radio y los esfuerzos pueden asumirse uniformes a través del espesor (ASME, 2023). Esta aproximación es la que sustenta las ecuaciones empleadas por el código ASME para el diseño de recipientes esféricos sometidos a presión interna, y por ello constituye la base teórica principal del modelo de cálculo desarrollado.

## **4.2 Código ASME BPVC**

El diseño de recipientes a presión se desarrolla con base en códigos que establecen requisitos de cálculo, materiales, fabricación e inspección. Entre ellos, el BPVC-VIII-1 constituye la referencia normativa más utilizada para este tipo de equipos.

### ***4.2.1 Sección VIII, División 1***

La Sección VIII del ASME BPVC está orientada al diseño y construcción de recipientes a presión. Dentro de esta sección, la División 1 establece reglas de diseño basadas en ecuaciones de cálculo y criterios prescriptivos, ampliamente empleados tanto en la práctica industrial como en el ámbito académico. Su uso resulta especialmente conveniente cuando se requiere estructurar procedimientos de cálculo claros y verificables.

La División 1 contempla aspectos relacionados con espesores mínimos, presión de diseño, presión de prueba, materiales permitidos, juntas soldadas, inspección y condiciones generales de fabricación. En el caso de recipientes esféricos sometidos a presión interna, esta división proporciona la ecuación de espesor del casco y los criterios asociados al esfuerzo admisible del

material y a la eficiencia de la junta soldada, los cuales constituyen variables fundamentales en el diseño.

Por su estructura normativa, la Sección VIII, División 1, permite organizar el proceso de diseño de manera secuencial. Esto favorece su implementación en un entorno computacional, ya que las relaciones establecidas por el código pueden traducirse en rutinas de cálculo para el ingreso de datos, la evaluación de condiciones y la obtención de resultados de diseño.

#### ***4.2.2 Sección II, Parte D***

La Sección II del ASME BPVC reúne la información relacionada con los materiales permitidos para la construcción de recipientes a presión. En ella se consignan propiedades mecánicas, límites de temperatura, esfuerzos admisibles y demás datos requeridos para seleccionar materiales conformes al código (ASME, 2021). Esta sección complementa el proceso de diseño, ya que las ecuaciones de espesor dependen directamente de las propiedades resistentes del material.

Particularmente, la Sección II, Parte D, contiene tablas con los valores de esfuerzo admisible para distintos materiales y temperaturas de diseño. Esta información permite identificar si un material es apto para determinadas condiciones de operación y suministra el valor de esfuerzo admisible que se emplea en las ecuaciones de cálculo. Por esta razón, la consulta de esta sección es necesaria para establecer correctamente los datos de entrada del diseño.

En términos prácticos, la Sección II sirve de apoyo normativo para la selección de materiales como aceros al carbono, aceros inoxidable y otras aleaciones reconocidas por el código. Su uso dentro del diseño computacional permite asociar propiedades mecánicas y límites de servicio a cada material, facilitando así la ejecución consistente de los cálculos.

### **4.3 Variables y criterios de diseño**

El diseño de recipientes a presión requiere definir un conjunto de variables que intervienen directamente en las ecuaciones y verificaciones normativas. Entre ellas se encuentran la presión de diseño, la temperatura de diseño, el esfuerzo admisible, la eficiencia de junta soldada y el margen de corrosión.

#### ***4.3.1 Presión y temperatura de diseño***

La presión de diseño corresponde al valor de presión interna utilizado como base para dimensionar el recipiente (ASME, 2023). Este valor debe representar la condición de presión máxima que el equipo puede experimentar durante su operación, incluyendo márgenes requeridos por norma o por criterio de diseño. A partir de esta variable se determina el espesor mínimo necesario del casco y de otros elementos sometidos a presión.

La temperatura de diseño, por su parte, es la temperatura empleada para seleccionar el material y establecer el valor de esfuerzo admisible correspondiente (ASME, 2021, 2023). Su importancia radica en que las propiedades mecánicas de los materiales varían con la temperatura, de manera que un mismo material puede presentar distintos esfuerzos admisibles según las condiciones térmicas del servicio (ASME, 2021). En consecuencia, la presión y la temperatura de diseño deben definirse de manera conjunta.

Desde el punto de vista del cálculo, estas dos variables constituyen datos iniciales del procedimiento normativo. La presión de diseño interviene de forma directa en la ecuación de espesor, mientras que la temperatura condiciona la selección del material y el valor de esfuerzo admisible usado en dicha ecuación.

### ***4.3.2 Esfuerzo admisible***

El esfuerzo admisible es el valor máximo de tensión que el material puede soportar bajo las condiciones establecidas por el código. Este parámetro se obtiene a partir de la normativa de materiales y depende del tipo de material y de la temperatura de diseño (ASME, 2023). En el diseño de recipientes a presión, el esfuerzo admisible constituye una variable central, ya que limita la tensión de trabajo y define la resistencia disponible para el dimensionamiento del casco.

### ***4.3.3 Eficiencia de junta***

La eficiencia de junta soldada representa el efecto de la calidad e inspección de la unión sobre la capacidad resistente del recipiente. El código asigna diferentes valores de eficiencia de acuerdo con el tipo de junta y el nivel de examinación aplicado. Este valor modifica el espesor requerido, ya que una junta con menor eficiencia exige un mayor espesor para mantener la seguridad estructural del conjunto (ASME, 2023).

### ***4.3.4 Margen de corrosión***

El margen de corrosión corresponde al espesor adicional incorporado al valor calculado por resistencia mecánica, con el fin de compensar la pérdida de material durante la vida útil del equipo. Este valor no se usa para resistir la carga de presión, sino como reserva frente al deterioro esperado del material (ASME, 2023). Por ello, en el diseño se diferencia entre el espesor calculado por presión y el espesor total requerido con adición del margen de corrosión.

## 4.4 Materiales

La selección de materiales en recipientes a presión depende de criterios normativos y mecánicos. Para ello deben considerarse las propiedades resistentes del material, su comportamiento frente a la temperatura y su aptitud para los procesos de fabricación, en especial la soldadura.

### 4.4.1 *Propiedades mecánicas y selección de materiales*

Entre las propiedades mecánicas relevantes para el diseño de recipientes a presión se encuentran el límite elástico, la resistencia última a la tracción y el módulo de elasticidad. Estas propiedades permiten caracterizar la capacidad resistente del material y sirven de base para establecer los esfuerzos admisibles utilizados por el código (ASME, 2021). En consecuencia, la selección del material no depende únicamente de su disponibilidad, sino también de su respuesta frente a las condiciones de carga y temperatura del servicio.

La normativa ASME contempla materiales reconocidos y listados para construcción de recipientes a presión, entre ellos aceros al carbono, aceros inoxidable y otras aleaciones. La elección entre ellos depende de factores como presión, temperatura, medio de servicio, corrosión esperada y requerimientos de fabricación. En aplicaciones generales, los aceros al carbono suelen ser una opción frecuente por su equilibrio entre resistencia, disponibilidad y costo.

Además de las propiedades resistentes, la selección del material debe considerar aspectos como corrosión y soldabilidad. Un material puede cumplir con la resistencia requerida, pero no resultar adecuado si presenta limitaciones frente al ambiente de operación o dificultades en la fabricación de juntas soldadas. Por ello, el proceso de selección debe leerse de manera integrada con los criterios de diseño e inspección definidos por la norma.

## 4.5 Aberturas

Las aberturas en recipientes a presión son discontinuidades geométricas necesarias para permitir conexiones de proceso, instrumentación, inspección o mantenimiento. Entre estas aberturas, las boquillas son elementos frecuentes y requieren verificación porque modifican la distribución local de esfuerzos en el casco.

### 4.5.1 Boquillas y refuerzo de aberturas

Una boquilla es un elemento conectado al casco del recipiente que permite la entrada o salida de fluidos, la instalación de válvulas o la incorporación de instrumentos (ASME, 2023). Su presencia genera una abertura en la pared, lo que implica una reducción del área resistente original del recipiente. Debido a ello, el código exige verificar que dicha pérdida de resistencia sea compensada adecuadamente (ASME, 2023).

El refuerzo de aberturas consiste en restituir el área resistente removida mediante material disponible en la vecindad de la abertura, ya sea por el exceso de espesor del casco, por el espesor de la propia boquilla o por el uso de anillos o elementos de refuerzo (ASME, 2023). Este criterio se basa en el método de reemplazo de área, ampliamente utilizado en el diseño de boquillas conforme a la normativa ASME. Su propósito es asegurar que la presencia de la abertura no comprometa la integridad estructural del recipiente.

En términos de cálculo, la verificación de boquillas y refuerzos exige considerar dimensiones geométricas, espesores requeridos, espesores disponibles y límites de contribución de cada zona reforzante. Por ello, este tipo de evaluación se integra de manera natural en herramientas computacionales, donde es posible organizar las variables y ejecutar verificaciones sistemáticas para distintas configuraciones de abertura.

#### 4.6 Estructura

En recipientes esféricos, la estabilidad operativa y la integridad mecánica dependen no solo del casco sometido a presión, sino también de la estructura de soporte que transfiere las cargas hacia la cimentación. Una solución común consiste en disponer 12 elementos tubulares de soporte, distribuidos de manera uniforme alrededor del recipiente y unidos mediante soldadura a puntos definidos del casco o a accesorios estructurales asociados. Esta configuración busca repartir la carga gravitacional del conjunto (peso propio del recipiente, contenido, accesorios y posibles cargas permanentes) minimizando concentraciones de esfuerzo en la zona de unión y garantizando una trayectoria de carga estable hacia el sistema de apoyo.

El dimensionamiento de los tubos de soporte se estima mediante dos verificaciones complementarias: resistencia por estática y estabilidad por pandeo. En el enfoque estático, se determina la fuerza axial y, cuando corresponda, los efectos de flexión inducidos por excentricidades geométricas, rigidez desigual o condiciones de apoyo; dichas solicitaciones se comparan con la capacidad resistente del tubo según el criterio de esfuerzos admisibles o estados límite. En paralelo, la verificación por pandeo es crítica porque los tubos trabajan predominantemente a compresión, por lo que su capacidad puede quedar gobernada por inestabilidad global (función de la esbeltez, longitud efectiva y condiciones de restricción) y, dependiendo de la geometría, por inestabilidad local de pared. La combinación de ambas evaluaciones permite seleccionar un tamaño de tubo que no solo resista las cargas, sino que mantenga un margen adecuado frente a modos de falla por inestabilidad en servicio.

#### 4.7 Ecuaciones de diseño para recipientes esféricos

El diseño normativo de recipientes esféricos se apoya en ecuaciones cerradas que relacionan presión, dimensiones geométricas, propiedades del material y calidad de la junta soldada. Estas ecuaciones permiten determinar espesores mínimos y verificar condiciones básicas de integridad estructural.

La formulación básica del comportamiento de un recipiente esférico sometido a presión interna puede expresarse mediante la relación de esfuerzo de membrana. Esta expresión constituye el fundamento mecánico del diseño y permite establecer la relación entre presión, radio, espesor y esfuerzo tangencial en la pared del recipiente, como se presenta en la Ecuación 1 (ASME, 2023).

##### Ecuación 1. Esfuerzo de membrana en recipientes esféricos

$$\sigma = \frac{PR}{2t}$$

Donde:

$\sigma$ : Esfuerzo de membrana (kPa).

$P$ : Presión interna (kPa).

$R$ : Radio interior del recipiente (mm).

$t$ : Espesor de la pared (mm).

A partir de este fundamento, la BPVC-VIII-1 establece la ecuación de diseño para recipientes esféricos sometidos a presión interna, incorporando el esfuerzo admisible del material y la eficiencia de la junta soldada, como se presenta en la Ecuación 2 (ASME, 2023).

**Ecuación 2. Espesor mínimo requerido del casco esférico**

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$$

Donde:

$t$ : Espesor mínimo requerido (mm).

$P$ : Presión de diseño (kPa).

$R$ : Radio interior (mm).

$S$ : Esfuerzo admisible del material (kPa).

$E$ : Eficiencia de la junta soldada (-).

El espesor final del recipiente debe considerar además el margen de corrosión. Por ello, el valor calculado por presión se complementa con un espesor adicional destinado a compensar la pérdida de material durante el servicio. Esta expresión se observa en la Ecuación 3 (ASME, 2023).

**Ecuación 3. Espesor total con margen de corrosión**

$$t_{\text{total}} = t + CA$$

Donde:

$t_{\text{total}}$ : Espesor total requerido (mm).

$t$ : Espesor calculado por resistencia mecánica (mm).

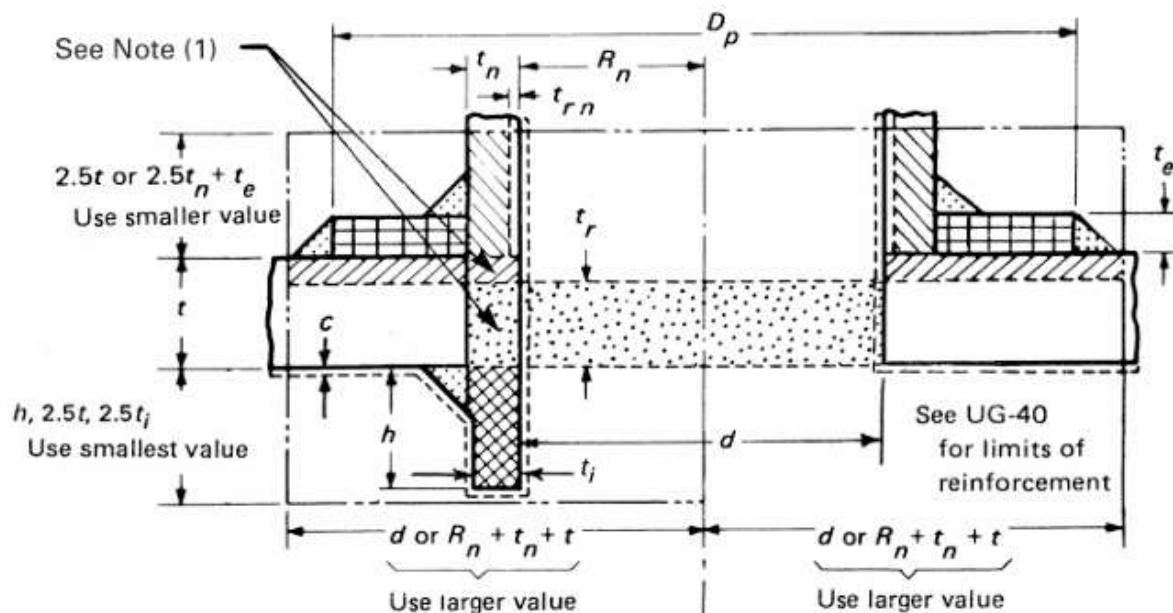
$CA$ : Margen de corrosión (mm).

La geometría de la boquilla y su interacción con el casco esférico se representa en la Figura 1, la cual define las dimensiones relevantes para la evaluación del área de refuerzo conforme a ASME BPVC-VIII-1. En esta figura se identifican el diámetro de la abertura, los espesores del casco y de la boquilla, la extensión de la zona efectiva de refuerzo y las configuraciones típicas de

unión, tanto para boquillas insertadas como para boquillas adosadas al casco. Estas dimensiones constituyen la base geométrica para la aplicación de las ecuaciones normativas, ya que permiten determinar el área removida por la abertura y las áreas disponibles en el casco, la boquilla y cualquier elemento de refuerzo adicional. A partir de esta representación, se emplean las expresiones establecidas en UG-37 y UG-40 para cuantificar el área requerida y el área disponible dentro de los límites de refuerzo definidos por el código.

**Figura 1**

*Corte transversal para refuerzos de boquillas*



Nota. Tomado de (ASME, 2023) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels.

A partir de la geometría mostrada en la Figura 1, el primer parámetro que debe establecerse es la longitud límite de refuerzo  $L_R$ , la cual define la extensión dentro de la cual pueden contabilizarse

las áreas aportadas por el casco, la boquilla y cualquier elemento adicional. Conforme a UG-40, esta longitud se determina comparando el diámetro de la abertura con la suma geométrica del radio de la abertura y los espesores involucrados, así como se indica en la Ecuación 4 (ASME, 2023).

#### **Ecuación 4. Límite de refuerzo**

$$L_R = \max (d , R_n + t_n + t)$$

Donde:

$L_R$ : Longitud límite de refuerzo (mm).

$d$ : Diámetro de la abertura en el casco (mm).

$R_n$ : Radio de la abertura, definido como  $d/2$ (mm).

$t_n$ : Espesor de la boquilla (mm).

$t$ : Espesor del casco (mm).

Una vez establecida la longitud límite de refuerzo, el siguiente parámetro requerido es el espesor mínimo de la boquilla, el cual debe verificarse conforme a los criterios de resistencia por presión interna. Para ello, ASME BPVC-VIII-1 remite a la expresión de UG-27(c)(1), que permite determinar el espesor requerido de la boquilla en función de la presión de diseño, el radio de la abertura y el esfuerzo admisible del material. La relación correspondiente se expresa en la Ecuación 5 (ASME, 2023).

#### **Ecuación 5. Espesor mínimo requerido de la boquilla**

$$t_{rn} = \frac{P R_n}{S_n E - 0.6P}$$

Donde:

$t_{rn}$ : Espesor mínimo requerido de la boquilla por presión interna (mm).

$P$ : Presión de diseño (kPa)

$R_n$ : Radio de la abertura en el casco (mm).

$S_n$ : Esfuerzo admisible del material de la boquilla (kPa).

$E$ : Eficiencia de la junta soldada (-).

El área requerida para compensar el material removido por la abertura se determina aplicando la expresión establecida en UG-37, la cual depende del diámetro de la abertura, del espesor efectivo del casco y del factor de reducción correspondiente al material de la boquilla. Para el caso analizado, el factor geométrico toma el valor  $F = 1$ , por lo que la ecuación se expresa en la Ecuación 6 (ASME, 2023).

#### **Ecuación 6. Área requerida de refuerzo**

$$A_{\text{req}} = d t_r F + t_n t_r F (1 - f r_1)$$

Donde:

$A_{\text{req}}$ : Área requerida para el refuerzo de la abertura (mm<sup>2</sup>).

$d$ : Diámetro de la abertura en el casco (mm).

$t_r$ : Espesor efectivo del casco dentro de la zona de refuerzo (mm).

$t_n$ : Espesor de la boquilla (mm).

$F$ : Factor geométrico, aquí igual a 1.

$f r_1$ : Factor de reducción asociado al material de la boquilla (-).

Para determinar el área disponible que puede contabilizarse como material de refuerzo, deben evaluarse las contribuciones del casco, la boquilla, las soldaduras y el elemento de refuerzo externo. Conforme a UG-37, estas áreas se obtienen mediante las siguientes expresiones:

### Ecuación 7. Área disponible del casco

$$A_1 = \max \left[ d(E_1 t - t_r) - 2t_\eta(E_1 t - t_r)(1 - fr_1), 2(t + t_\eta)(E_1 t - t_r) - 2t_\eta(E_1 t - t_r)(1 - fr_1) \right]$$

Donde:

$A_1$ : Área disponible en el casco (mm<sup>2</sup>).

$E_1$ : Eficiencia de la junta del casco, para este caso igual a 1 (.

$t$ : Espesor nominal del casco (mm).

$t_r$ : Espesor requerido del casco (mm).

$t_\eta$ : Longitud efectiva dentro del límite de refuerzo (mm).

$d$ : Diámetro de la abertura (mm).

$fr_1$ : Factor de reducción según UG-37(c).

### Ecuación 8. Área disponible de la boquilla

$$A_2 = \min \left[ 2(t_n - t_{rn}) fr_2 t, 2(t_n - t_{rn})(2.5t_n + t_e) fr_2 \right]$$

Donde:

$A_2$ : Área disponible en la boquilla (mm<sup>2</sup>).

$t_n$ : Espesor nominal de la boquilla (mm).

$t_{rn}$ : Espesor requerido de la boquilla (mm).

$t_e$ : Espesor del elemento de refuerzo externo (mm).

$fr_2$ : Factor de reducción según UG-37(c).

$t$ : Espesor del casco (mm).

### Ecuación 9. Área disponible en soldaduras

$$A_{41} = (\text{leg})^2 fr_3$$

$$A_{42} = (\text{leg})^2 fr_4$$

Donde:

$A_{41}$ : Área de la soldadura de la boquilla (mm<sup>2</sup>).

$A_{42}$ : Área de la soldadura del refuerzo externo (mm<sup>2</sup>).

leg: Tamaño de pierna del filete (mm).

$fr_3, fr_4$ : Factores de reducción según UG-37(c).

### Ecuación 10. Área disponible del elemento de refuerzo externo

$$A_5 = (D_p - d - 2t_n) t_e fr_4$$

Donde:

$A_5$ : Área del refuerzo externo (mm<sup>2</sup>).

$D_p$ : Diámetro exterior del refuerzo (mm).

$d$ : Diámetro de la abertura (mm).

$t_n$ : Espesor de la boquilla (mm).

$t_e$ : Espesor del refuerzo externo (mm).

$fr_4$ : Factor de reducción según UG-37(c).

Con las áreas disponibles definidas, la verificación del refuerzo se establece mediante la condición de cumplimiento indicada en UG-37, la cual exige que la suma de las áreas aportadas por el casco, la boquilla, las soldaduras y el elemento de refuerzo externo sea igual o mayor que el área requerida, como se expresa en la Ecuación 11 (ASME, 2023).

### **Ecuación 11. Comparación de áreas**

$$A_1 + A_2 + A_{41} + A_{42} + A_5 \geq A_{\text{req}}$$

Cuando esta condición no se satisface, el parámetro que se ajusta para incrementar el área disponible es el diámetro exterior del elemento de refuerzo,  $D_p$ . El aumento de  $D_p$  incrementa directamente el valor de  $A_5$ , permitiendo alcanzar el área necesaria dentro de los límites establecidos por el Código. Este diámetro debe cumplir la restricción geométrica  $D_p \leq 2L_R$ , lo cual garantiza que el refuerzo permanezca completamente contenido dentro de la zona límite de refuerzo. Una vez que el diámetro exterior del refuerzo alcanza su valor máximo permitido ya no es posible incrementar el área  $A_5$  mediante un aumento adicional de diámetro. En ese punto, el ajuste se realiza aumentando el espesor del refuerzo externo, lo cual incrementa directamente el área disponible.

La formulación presentada reúne los elementos necesarios para describir el comportamiento resistente de la boquilla y su interacción con el casco, integrando los espesores requeridos, los límites geométricos de refuerzo y las expresiones que gobiernan la disponibilidad de material en cada componente involucrado. Este conjunto de relaciones permite establecer las condiciones bajo las cuales la abertura mantiene su integridad estructural frente a la presión interna y define los parámetros que deben ajustarse cuando la capacidad resistente resulta insuficiente. Sobre esta base, el desarrollo computacional permite trasladar dichas expresiones al ámbito

numérico, facilitando la evaluación sistemática de las variables de diseño y la verificación automática de los criterios establecidos por el código.

## **4.8 MATLAB**

MATLAB es un entorno de desarrollo orientado al cálculo numérico, la programación y el análisis de problemas de ingeniería. Su arquitectura permite integrar algoritmos, gestión de datos y visualización de resultados dentro de una misma plataforma, lo que lo convierte en una herramienta idónea para el desarrollo de aplicaciones técnicas (MathWorks, 2024). Facilita la construcción de soluciones computacionales mediante scripts, funciones, estructuras de datos y herramientas gráficas integradas, ampliando su utilidad en ingeniería al simplificar la implementación de modelos matemáticos, la automatización de cálculos y la organización lógica de los procesos de análisis.

Además de su capacidad de cómputo, MATLAB incorpora recursos para la depuración, validación de resultados y administración de archivos, favoreciendo un desarrollo ordenado y modular. Estas características permiten estructurar programas en distintos componentes y vincular rutinas de cálculo con interfaces de usuario y bases de datos internas, fortaleciendo la trazabilidad y la eficiencia en el diseño de aplicaciones.

### ***4.8.1 Funciones de cálculo***

En MATLAB, las rutinas de cálculo se desarrollan principalmente mediante archivos con extensión *.m*, los cuales pueden corresponder a scripts o funciones. Los scripts ejecutan una secuencia de instrucciones en un orden definido, mientras que las funciones permiten procesar

datos de entrada y retornar resultados específicos, lo que facilita una organización modular del código (MathWorks, 2024).

El uso de funciones favorece la separación de tareas dentro del programa, ya que permite definir procedimientos independientes para operaciones como validación de datos, aplicación de ecuaciones, conversión de unidades o generación de resultados. Esta estructura mejora la legibilidad del código, facilita su mantenimiento y permite reutilizar rutinas en diferentes partes de la aplicación.

#### **4.8.2 Gestión de datos**

MATLAB permite almacenar información mediante archivos con extensión *.mat*, los cuales se utilizan para guardar variables, matrices, tablas, estructuras y otros objetos propios del entorno. Estos archivos son útiles para conservar información que posteriormente puede ser cargada y utilizada por la aplicación sin necesidad de redefinirla en cada ejecución (MathWorks, 2024).

La gestión de datos mediante archivos *.mat* resulta adecuada cuando se requiere organizar propiedades de materiales, parámetros geométricos, bases de datos auxiliares o resultados intermedios del cálculo. De esta manera, la información queda integrada al entorno de desarrollo y puede ser consultada por las funciones del programa de forma estructurada.

#### **4.8.3 Interfaz gráfica**

MATLAB dispone de *App Designer* como herramienta para el desarrollo de interfaces gráficas de usuario (MathWorks, 2024). Este entorno permite construir aplicaciones visuales mediante componentes como campos de entrada, listas desplegables, botones, tablas, ejes de

representación y áreas de texto, integrando estos elementos con la lógica de programación del modelo matemático.

Las aplicaciones creadas en App Designer se almacenan en archivos con extensión *.mlapp*, los cuales contienen tanto el diseño de la interfaz como el código asociado a su funcionamiento. Esta integración permite desarrollar aplicaciones interactivas en las que el usuario puede ingresar datos, ejecutar cálculos y visualizar resultados dentro de una misma ventana de trabajo.

#### ***4.8.4 Despliegue de aplicaciones***

MATLAB permite preparar aplicaciones para su ejecución y distribución mediante herramientas de despliegue incluidas en su ecosistema de desarrollo (MathWorks, 2024). Estas herramientas facilitan la organización de los archivos necesarios para que una aplicación pueda ser ejecutada de manera estructurada, incluyendo funciones, datos y componentes de interfaz.

El despliegue de aplicaciones constituye una etapa importante cuando se busca que una herramienta desarrollada en MATLAB pueda ser utilizada de forma práctica por otros usuarios. Para ello, el entorno permite consolidar los recursos del programa y generar una aplicación con una estructura definida para su instalación o ejecución en equipos compatibles.

## **5. Metodología**

La metodología se estructuró en un conjunto de fases técnicas que permitieron desarrollar el software de manera ordenada. Inicialmente, se realizó la revisión normativa y la organización de los datos de entrada, recopilando los parámetros, propiedades de materiales y características de los fluidos requeridos para el diseño. Posteriormente, se desarrollaron las funciones de cálculo y validación, asegurando la coherencia de los datos y la correcta ejecución de los procedimientos. A continuación, estas funciones se integraron en una interfaz de usuario que permitió el ingreso controlado de la información y la interacción con el sistema. Finalmente, el software fue validado mediante la ejecución de casos de prueba reportados por otros autores, comparando los resultados obtenidos con referencias técnicas y realizando los ajustes necesarios para garantizar su correcto funcionamiento y su disponibilidad para uso en otros entornos.

### **5.1 Fase I. Revisión normativa y estructuración de los datos de entrada**

En esta fase se realizó la revisión y análisis de los apartados aplicables del código ASME BPVC Sección VIII División I, con el fin de identificar los parámetros normativos requeridos para el diseño de recipientes a presión esféricos. De manera complementaria, se revisó la Sección II, Parte D del mismo código para recopilar las propiedades mecánicas de los materiales permitidos. A partir de la información obtenida, se recopilaron y organizaron los datos normativos necesarios para el proceso de diseño, incluyendo propiedades de materiales, valores de corrosión permisible y propiedades físicas de los fluidos. Esta información fue estructurada en bases de datos que permiten su uso posterior en las etapas de cálculo y programación.

Finalmente, se elaboró un diagrama de flujo que representa la secuencia lógica de selección y uso de los datos de entrada requeridos por la norma, estableciendo una base clara y ordenada para el desarrollo del proceso de diseño del recipiente a presión. Los detalles de las actividades desarrolladas en esta fase se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Actividades desarrolladas en la Fase I*

<b>Actividades</b>	<b>Normas / Artículos</b>	<b>Alcance / Enfoque</b>	<b>Medios de verificación</b>
Revisar y analizar la Sección VIII División I del código BPVC	(ASME, 2023)	Revisar los apartados aplicables al diseño de recipientes esféricos para identificar los parámetros exigidos por la norma.	Sección 4.2 Código ASME BPVC
Revisar y analizar la Sección II Parte D del código BPVC	(ASME, 2021)	Consultar las tablas de propiedades mecánicas de los materiales permitidos por el código.	Sección 4.4 Materiales
Construir la base de datos de materiales y corrosión	(ASME, 2021)	Organizar las propiedades mecánicas y los valores de corrosión en una estructura de datos.	Figura 2, Figura 3 y Sección 6.1.2 Base de datos de materiales y 6.1.3 Base de datos de corrosión
Recopilar las propiedades físicas de los fluidos	—	Reunir propiedades como densidad y otras necesarias para el análisis de cargas internas.	Sección 6.1.4 Base de datos de propiedades de los fluidos
Elaborar el diagrama de flujo de los datos de entrada	—	Representar gráficamente la secuencia de selección y uso de los datos requeridos para el diseño.	Figura 6

## 5.2 Fase II. Desarrollo de las funciones de cálculo en MATLAB

En esta fase se desarrolló la estructura funcional necesaria para ejecutar los cálculos del proceso de diseño, a partir de las variables y datos definidos previamente. Se implementaron

funciones que permiten realizar los cálculos requeridos de manera ordenada y repetible, asegurando la correcta aplicación de las relaciones matemáticas involucradas. De forma complementaria, se incorporaron funciones orientadas a la validación de los datos de entrada, con el fin de garantizar la coherencia de unidades, rangos y condiciones antes de realizar los cálculos. Asimismo, se integraron las bases de datos construidas en la fase anterior, permitiendo su uso estructurado dentro del proceso de cálculo. Esta fase consolida la lógica operativa del diseño, estableciendo una base funcional que soporta las etapas posteriores de interacción con el usuario y presentación de resultados. En la Tabla 2 se presentan las tareas realizadas en esta fase.

**Tabla 2***Actividades desarrolladas en la Fase II*

<b>Actividades</b>	<b>Normas / Artículos</b>	<b>Alcance / Enfoque</b>	<b>Medios de verificación</b>
Programar funciones de cálculo	(MathWorks, 2024)	Implementar funciones para el cálculo de espesor, esfuerzos, soldaduras boquillas y refuerzos.	Tabla 8 Resumen de funciones desarrolladas
Generar archivos de almacenamiento de datos	(MathWorks, 2024)	Almacenar las bases de datos estructuradas para su uso en las funciones de cálculo.	Tabla 9 Resumen de archivos .mat creados
Verificar el funcionamiento de las funciones	—	Comprobar que las funciones desarrolladas operan correctamente con diferentes conjuntos de datos.	Sección del documento con pruebas funcionales descritas.

**5.3 Fase III. Desarrollo de la interfaz de usuario y control de interacción**

En esta fase se desarrolló la estructura de la interfaz de usuario, orientada al ingreso y gestión de los datos requeridos para el proceso de diseño. Se definieron y construyeron las pantallas necesarias para la entrada de información, organizando los campos de manera lógica y coherente

con la secuencia del proceso previamente establecido. Posteriormente, se implementaron los mecanismos de interacción entre la interfaz y las funciones de cálculo, permitiendo la correcta transmisión de los datos ingresados y la ejecución de las operaciones correspondientes. Esta etapa permitió integrar la lógica de cálculo con la interacción del usuario, asegurando un flujo de trabajo continuo y controlado dentro del sistema. Las actividades desarrolladas se describen en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Actividades desarrolladas en la Fase III*

<b>Actividades</b>	<b>Normas / Artículos</b>	<b>Alcance / Enfoque</b>	<b>Medios de verificación</b>
Diseñar la estructura de las pantallas de ingreso de datos	(MathWorks, 2024)	Definir la organización de las pantallas y los campos necesarios para el ingreso de información.	Sección del documento donde se describe la estructura de la interfaz.
Construir las pantallas de ingreso de datos	(MathWorks, 2024)	Implementar las pantallas para la captura de los datos requeridos en el proceso de diseño.	Sección del documento con la descripción de las pantallas desarrolladas.
Integrar las pantallas con las funciones de cálculo	(MathWorks, 2024)	Conectar la interfaz con las funciones desarrolladas para ejecutar los cálculos correspondientes.	Sección del documento donde se describe la integración funcional.
Implementar los mecanismos de interacción	(MathWorks, 2024)	Desarrollar los controles que permiten la ejecución de acciones desde la interfaz.	Sección del documento con la descripción de los mecanismos de interacción.
Verificar el flujo de interacción de la interfaz	—	Comprobar la correcta secuencia de ingreso de datos y ejecución de funciones.	Sección del documento con la verificación del flujo de interacción.

#### 5.4 Fase IV. Validación del software

En esta fase se realizó la validación del software desarrollado mediante la ejecución de casos de prueba reportados por otros autores para recipientes a presión esféricos. Los escenarios seleccionados corresponden a ejemplos documentados en referencias técnicas, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de diseño previamente estudiadas. Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores reportados en dichas referencias, con el fin de verificar la consistencia de los cálculos y la correcta implementación de los criterios normativos. Adicionalmente, se realizaron ajustes finales orientados a garantizar el funcionamiento integral del software y su adecuada preparación para su uso e instalación en otros entornos. Las actividades desarrolladas en esta fase se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Actividades desarrolladas en la Fase IV*

<b>Actividades</b>	<b>Normas / Artículos</b>	<b>Alcance / Enfoque</b>	<b>Medios de verificación</b>
Selección de casos de prueba	(Adeyefa & Oluwole, 2013; García, 2021; Lafuente, 2016)	Selección de casos documentados por otros autores para la validación del software.	6.4.1 Selección de casos de prueba
Ejecución del software	No aplica	Obtención de resultados de cálculo para los casos de prueba seleccionados.	6.4.2 Ejecución del software
Comparación de resultados	(Adeyefa & Oluwole, 2013; García, 2021; Lafuente, 2016)	Contraste de los resultados obtenidos con los valores reportados en referencias técnicas.	6.4.3 Comparación de resultados

## **6. Resultados**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metodología propuesta, organizados por fases y documentados conforme a las actividades definidas. Cada resultado corresponde a productos concretos desarrollados para la construcción del software.

### **6.1 Resultados de la Fase 1**

Como resultado de esta fase se obtuvo la recopilación y organización de la información normativa y técnica necesaria para el desarrollo del proceso de diseño. La revisión de los criterios normativos aplicables y de las propiedades de los materiales permitió establecer los parámetros y datos de entrada requeridos para las etapas posteriores del proyecto. El análisis normativo y la descripción de los fundamentos técnicos asociados a esta fase se presentan en el capítulo de marco teórico, mientras que en esta sección se documentan los resultados derivados de dicha revisión, incluyendo las bases de datos construidas y la estructuración de la información utilizada por el software.

#### ***6.1.1 Clasificación de las variables del proceso de diseño***

Se definieron y clasificaron las variables que intervienen en el proceso de diseño del recipiente a presión, de acuerdo con su función dentro del sistema de cálculo. Esta clasificación permitió identificar las variables que son ingresadas por el usuario, aquellas que requieren procesos intermedios y las que intervienen directamente en las ecuaciones de diseño.

Se establecieron las variables de operación, correspondientes a los datos definidos inicialmente por el usuario, tales como el volumen del recipiente, la presión de operación, la temperatura de operación, el fluido contenido y la cantidad, distribución y tamaño de las boquillas. Asimismo, se definieron las variables asociadas a las condiciones externas del recipiente, las cuales incluyeron la condición ambiental y el tiempo de vida útil.

Adicionalmente, se identificaron variables que no ingresan de forma directa a las ecuaciones de cálculo, pero que fueron necesarias para la consulta de bases de datos y la obtención de parámetros adicionales, como las propiedades de los materiales y los valores asociados al proceso de corrosión. Finalmente, se establecieron las variables que intervienen directamente en las ecuaciones de cálculo, las cuales fueron utilizadas en las etapas posteriores del diseño. La Tabla 5 presenta la clasificación de las variables definidas en esta fase, de acuerdo con su función dentro del proceso de diseño.

**Tabla 5**

*Clasificación de las variables del proceso de diseño*

<b>Tipo de variable</b>	<b>Variables incluidas</b>
VARIABLES DE OPERACIÓN	Volumen del recipiente, presión de operación, temperatura de operación, fluido, boquillas (cantidad, tamaño, ubicación)
VARIABLES DE CORROSIÓN	Condición ambiental, tiempo de vida útil
VARIABLES PROVENIENTES DE BASES DE DATOS	Propiedades del material, propiedades del fluido, tasas de corrosión, tamaños estándar de tubería
VARIABLES DE SELECCIÓN	Material

Tipo de variable	Variables incluidas
Variables de cálculo	Variables que ingresan directamente a las ecuaciones de diseño

### 6.1.2 Base de datos de materiales

La base de datos de materiales se construyó a partir de la información contenida en las tablas del código ASME BPVC, las cuales presentan los materiales de manera segmentada según su forma de producto y su aplicabilidad a las diferentes secciones del código. En particular, se utilizaron las tablas correspondientes a los valores de esfuerzo admisible para materiales ferrosos, como se muestra en la Figura 2, donde se identifican los materiales tipo *plate* empleados en la fabricación de cascos esféricos.

**Figura 2**

*Materiales ferrosos para ASME BPVC-II-Parte D*

Table 1A (Cont'd) Section I; Section III, Division 1, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials (*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)									
Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	Carbon steel	Castings	SA-352	LCB	J03003	...	...	1	1
2	Carbon steel	Plate	SA-515	65	K02800	...	...	1	1
3	Carbon steel	Plate	SA-516	65	K02403	...	...	1	1
4	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB65	K02800	...	...	1	1
5	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC65	K02403	...	...	1	1

*Nota.* Tomado de (ASME, 2021). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D: Materials.

Adicionalmente, se verificó la aplicabilidad de estos materiales para la Sección VIII, División 1 del código, de acuerdo con los valores máximos de temperatura permitidos indicados

en las tablas normativas. Esta verificación se realizó considerando los valores de aplicabilidad reportados, como se presenta en la Figura 3, incluyendo únicamente aquellos materiales que presentan valores permitidos para dicha sección y descartando los que no cumplen esta condición.

**Figura 3**

*Materiales ferrosos aplicables para ASME BPVC-VIII-1*

Table 1A (Cont'd)									
Section I; Section III, Division 1, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII									
Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials									
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)									
Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)				External Pressure Chart No.	Notes	
			I	III	VIII-1	XII			
1	65	35	NP	700	650	650	CS-2	G1, G17	
2	65	35	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2	
3	65	35	B50	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2	
4	65	35	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12	
5	65	35	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12	

*Nota.* Tomado de (ASME, 2021). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D: Materials.

### 6.1.3 Base de datos de corrosión

Se estructuró una base de datos de corrosión a partir de la clasificación de las condiciones externas a las que puede estar expuesto el recipiente durante su operación. Estas condiciones correspondieron a diferentes ambientes y fluidos, los cuales fueron considerados en función de su interacción con el material del casco del recipiente. Para cada condición externa definida, se estableció una tasa de corrosión expresada en milímetros por año (mm/año), la cual representó la pérdida de espesor del material a lo largo del tiempo. Esta tasa fue asociada directamente a la condición ambiental seleccionada y al material del casco, permitiendo su incorporación dentro del

proceso de diseño. La tasa de corrosión fue utilizada para determinar el espesor adicional requerido por corrosión, el cual se calculó en función del tiempo de vida útil del recipiente, de acuerdo con la Ecuación 12.

### Ecuación 12. Tolerancia a la corrosión

$$CA = r \cdot t$$

Donde

$CA$ : Espesor adicional por corrosión

$r$ : Tasa de corrosión en mm/año.

$t$ : Tiempo de vida útil del recipiente en años.

La Tabla 6 presenta algunos de los valores de tasa de corrosión definidos para distintos materiales y condiciones externas. La base de datos completa fue estructurada posteriormente en el entorno MATLAB y su implementación y uso se describen en la fase siguiente del desarrollo.

**Tabla 6**

*Valores de tasa de corrosión para materiales y condiciones seleccionadas*

<b>Material</b>	<b>Condición externa</b>	<b>Tasa de corrosión (mm/año)</b>
Acero al carbono	Aire húmedo no contaminado	0,0050
Acero al carbono	Atmósfera industrial con SO <sub>2</sub>	0,0500
Acero al carbono	Ambiente marino costero	0,1000
Acero al carbono	Agua dulce aireada	0,0200
Acero al carbono	Agua de mar	0,3000
AISI 304	Agua dulce	0,0050
AISI 316	Agua de mar	0,0050

*Nota.* Adaptado de (API, 2022) Standard 510: Pressure Vessel Inspection Code — In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration.

### 6.1.4 Base de datos de propiedades de los fluidos

Se estructuró una base de datos de propiedades de los fluidos considerados en el diseño del recipiente a presión, a partir de información termo-física tabulada que describe la variación de la densidad en función de la temperatura para distintos fluidos de interés industrial. Un ejemplo de este tipo de información se presenta en la Figura 4, donde se muestran valores de densidad reportados a diferentes temperaturas para algunos fluidos seleccionados.

**Figura 4**

*Propiedades termo-físicas de algunos fluidos*

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, $Pr$	Coficiente de expansión volu- métrica, $\beta,$ $1/\text{K}$
<i>Metano (CH<sub>4</sub>)</i>								
-160	420.2	3 492	0.1863	$1.270 \times 10^{-7}$	$1.133 \times 10^{-4}$	$2.699 \times 10^{-7}$	2.126	0.00352
-150	405.0	3 580	0.1703	$1.174 \times 10^{-7}$	$9.169 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-7}$	1.927	0.00391
-140	388.8	3 700	0.1550	$1.077 \times 10^{-7}$	$7.551 \times 10^{-5}$	$1.942 \times 10^{-7}$	1.803	0.00444
-130	371.1	3 875	0.1402	$9.749 \times 10^{-8}$	$6.288 \times 10^{-5}$	$1.694 \times 10^{-7}$	1.738	0.00520
-120	351.4	4 146	0.1258	$8.634 \times 10^{-8}$	$5.257 \times 10^{-5}$	$1.496 \times 10^{-7}$	1.732	0.00637
-110	328.8	4 611	0.1115	$7.356 \times 10^{-8}$	$4.377 \times 10^{-5}$	$1.331 \times 10^{-7}$	1.810	0.00841
-100	301.0	5 578	0.0967	$5.761 \times 10^{-8}$	$3.577 \times 10^{-5}$	$1.188 \times 10^{-7}$	2.063	0.01282
-90	261.7	8 902	0.0797	$3.423 \times 10^{-8}$	$2.761 \times 10^{-5}$	$1.055 \times 10^{-7}$	3.082	0.02922
<i>Metanol (C<sub>1</sub>H<sub>4</sub>OH)</i>								
20	788.4	2 515	0.1987	$1.002 \times 10^{-7}$	$5.857 \times 10^{-4}$	$7.429 \times 10^{-7}$	7.414	0.00118
30	779.1	2 577	0.1980	$9.862 \times 10^{-8}$	$5.088 \times 10^{-4}$	$6.531 \times 10^{-7}$	6.622	0.00120
40	769.6	2 644	0.1972	$9.690 \times 10^{-8}$	$4.460 \times 10^{-4}$	$5.795 \times 10^{-7}$	5.980	0.00123
50	760.1	2 718	0.1965	$9.509 \times 10^{-8}$	$3.942 \times 10^{-4}$	$5.185 \times 10^{-7}$	5.453	0.00127
60	750.4	2 798	0.1957	$9.320 \times 10^{-8}$	$3.510 \times 10^{-4}$	$4.677 \times 10^{-7}$	5.018	0.00132
70	740.4	2 885	0.1950	$9.128 \times 10^{-8}$	$3.146 \times 10^{-4}$	$4.250 \times 10^{-7}$	4.655	0.00137
<i>Isobutano (R600a)</i>								
-100	683.8	1 881	0.1383	$1.075 \times 10^{-7}$	$9.305 \times 10^{-4}$	$1.360 \times 10^{-6}$	12.65	0.00142
-75	659.3	1 970	0.1357	$1.044 \times 10^{-7}$	$5.624 \times 10^{-4}$	$8.531 \times 10^{-7}$	8.167	0.00150
-50	634.3	2 069	0.1283	$9.773 \times 10^{-8}$	$3.769 \times 10^{-4}$	$5.942 \times 10^{-7}$	6.079	0.00161
-25	608.2	2 180	0.1181	$8.906 \times 10^{-8}$	$2.688 \times 10^{-4}$	$4.420 \times 10^{-7}$	4.963	0.00177
0	580.6	2 306	0.1068	$7.974 \times 10^{-8}$	$1.993 \times 10^{-4}$	$3.432 \times 10^{-7}$	4.304	0.00199

*Nota.* Tomado de (Çengel, 2007). Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico.

A partir de los datos tabulados presentados en la Figura 4, se definió una relación funcional que permitió representar la densidad del fluido como una función continua de la temperatura. Para este propósito, se adoptó una expresión polinómica de tercer grado, la cual facilitó el ajuste de los

valores discretos de densidad y su posterior evaluación durante el proceso de cálculo. La densidad del fluido se expresó de acuerdo con la

Ecuación 13.

### Ecuación 13. Polinomio de tercer grado para la densidad

$$\rho(T) = a \cdot T^3 + b \cdot T^2 + c \cdot T + d$$

Donde

$\rho$ : Densidad del fluido.

$T$ : Temperatura en °C.

$a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  coeficientes característicos de cada fluido.

Estos coeficientes fueron obtenidos a partir del ajuste de los datos tabulados y almacenados como parte de la base de datos, permitiendo el cálculo de la densidad para cualquier temperatura dentro del rango de validez definido. En la Tabla 7 se presentan algunos de los coeficientes polinómicos definidos para distintos fluidos, junto con los rangos de temperatura considerados. La base de datos completa fue estructurada posteriormente en el entorno MATLAB, donde se implementó el cálculo de la densidad en función de la temperatura. Su implementación detallada se describe en la fase siguiente del desarrollo.

**Tabla 7**

*Coefficientes polinómicos para el cálculo de la densidad de fluidos*

Fluido	a	b	c	d	Tmin (°C)	Tmax (°C)
Propano	0	0,0000	-1,2000	530	-40	60,00
n-Butano	0	0,0000	-1,1000	600	-20	60,00

Fluido	a	b	c	d	Tmin (°C)	Tmax (°C)
i-Butano	0	0,0000	-1,0500	590	-20	60,00
Etano	0	0,0000	-0,9500	545	-80	20,00
Amoniaco	0	0,0020	-1,9500	682	-30	50,00

### 6.1.5 Base de datos de tamaños de tubería para boquillas

Se estructuró una base de datos de tamaños de tubería con el fin de definir las dimensiones nominales utilizadas en el diseño de las boquillas del recipiente a presión. Esta base de datos se construyó a partir de información normativa que establece los tamaños comerciales normalizados de tuberías de acero. Un ejemplo de la información utilizada para la definición de los tamaños de tubería se presenta en la Figura 5, donde se muestran las dimensiones correspondientes a un tamaño nominal específico, incluyendo el diámetro exterior y el espesor de pared asociados a diferentes *schedules*. Esta información permitió identificar los tamaños de tubería disponibles para su selección durante el proceso de diseño de las boquillas.

#### Figura 5

*Ejemplo de dimensiones normalizadas de tamaños de tubería*

NPS (DN)	Identification [Note (1)]	Schedule No.	Outside Diameter, in. (mm)	Wall Thickness, in. (mm)	Plain End Weight (Mass), lb/ft (kg/m)
1¼ (32)	STD	40	1.660 (42.2)	0.140 (3.56)	2.27 (3.39)
1¼ (32)	XS	80	1.660 (42.2)	0.191 (4.85)	3.00 (4.47)
1¼ (32)	...	160	1.660 (42.2)	0.250 (6.35)	3.77 (5.61)
1¼ (32)	XXS	...	1.660 (42.2)	0.382 (9.70)	5.22 (7.77)

Nota. Tomado de (ASME, 2018). ASME B36.10M-2018: Welded and Seamless Wrought Steel Pipe.

A partir de esta información, se definió una base de datos que incluyó los tamaños nominales de tubería empleados en el diseño, los cuales fueron utilizados como parámetros de

entrada para la selección de boquillas. La base de datos completa fue estructurada posteriormente en el entorno MATLAB, donde se implementó su uso dentro del flujo de cálculo. Su aplicación detallada se describe en la fase siguiente del desarrollo.

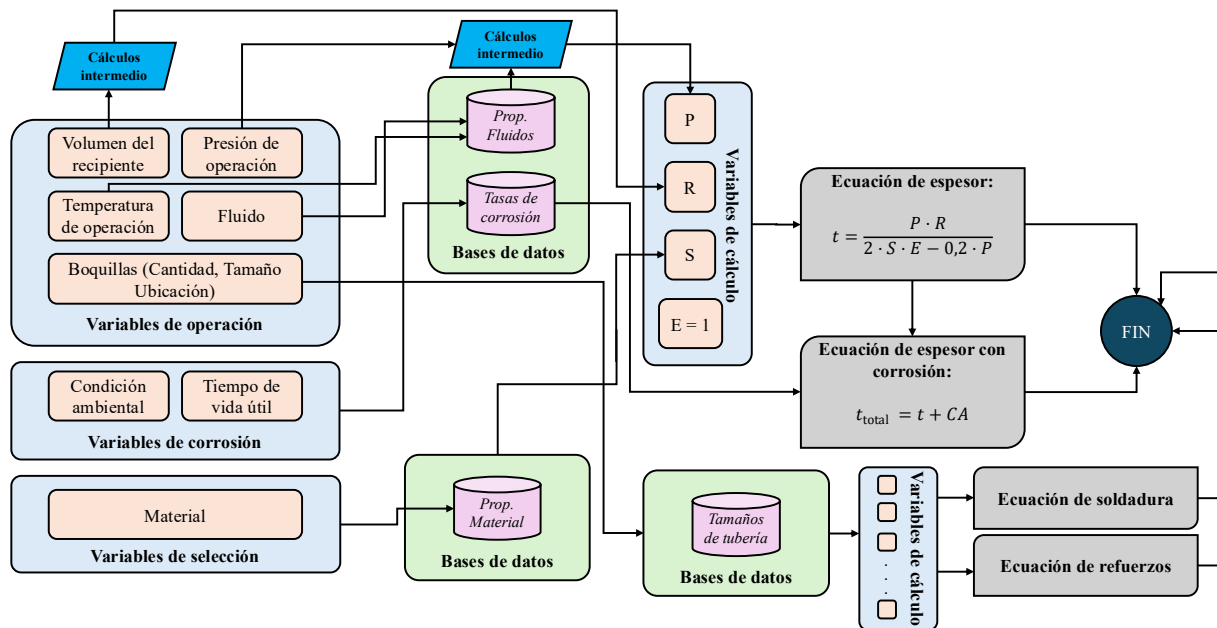
### ***6.1.6 Estructuración del flujo de datos de entrada***

Se estructuró el flujo de datos de entrada requerido para el cálculo del espesor del recipiente a presión, integrando las variables operativas, las bases de datos desarrolladas y las ecuaciones de diseño aplicables. Este flujo permitió organizar de manera sistemática la información necesaria para la ejecución del proceso de cálculo y garantizar la trazabilidad entre las variables de entrada y los resultados obtenidos.

La Figura 6 presenta el diagrama general del flujo de datos, en el cual se muestran las relaciones entre las variables de operación, las variables de corrosión, la selección de materiales y las bases de datos construidas en las secciones anteriores. Asimismo, se incluyen las variables de cálculo requeridas para la aplicación de las ecuaciones de diseño, tales como la presión interna, el radio del recipiente, el esfuerzo admisible y la eficiencia de junta.

Figura 6

Diagrama de flujo de datos para el diseño de recipientes esféricos a presión



El flujo integra las ecuaciones de espesor para recipientes cilíndricos, así como la corrección por corrosión y las ecuaciones asociadas a soldaduras y refuerzos. De esta manera, el diagrama constituye la estructura lógica que guía el proceso de cálculo implementado posteriormente en MATLAB, donde cada bloque del flujo corresponde a una etapa del algoritmo de diseño.

## 6.2 Resultados de la Fase II

### 6.2.1 Implementación de las funciones de cálculo

Durante esta fase se implementaron las funciones responsables de ejecutar las ecuaciones y cálculos intermedios descritos en el diagrama de flujo presentado en la Sección 6.1.6

Estructuración del flujo de datos de entrada. Estas funciones fueron organizadas en módulos secuenciales denominados *item1*, *item2*, *item3*, hasta *item6*, cada uno asociado a un bloque del flujo de cálculo (entradas, propiedades, esfuerzos, espesor, soldaduras y refuerzos). Como resultado, se obtuvo un conjunto de funciones que:

- Procesan las variables de entrada y generan las variables intermedias requeridas por el cálculo.
- Ejecutan las ecuaciones de diseño para espesor, esfuerzos y refuerzos.
- Integran automáticamente las bases de datos de materiales, corrosión, fluidos y tamaños de tubería.
- Generan salidas en formato HTML enriquecido para su visualización en la interfaz del aplicativo.

Como referencia base, la función *item1*, disponible en el Apéndice A, procesa el volumen, la temperatura y el fluido seleccionado, convierte unidades, consulta la base de datos *densidad.mat* y calcula la densidad  $\rho(T)$  mediante el polinomio definido en la Sección 6.1.4. Este módulo produce las primeras variables intermedias del flujo ( $V$  [m<sup>3</sup>],  $T$  [°C],  $\rho$ [kg/ m<sup>3</sup>]) y genera un bloque de salida estructurado para la interfaz. Las funciones restantes siguen la misma estructura modular y pueden consultarse en el Apéndice A. La Figura 7 presenta las primeras líneas de programación de la función *item1.m*.

**Figura 7***Función desarrollada en MATLAB*

```

item1.m
1 function h = item1(app)
2 % ITEM 1 – Entradas (V, T, fluido) + densidad rho(T) desde densidad.mat
3
4
5 % ----- Leer V + unidad
6 Vraw = local_toDouble(local_tryGetValue(app, {'volume'}));
7 uV = local_toChar(local_tryGetValue(app, {'volume_unit','unit_volume','uV'}));
8
9 % ----- Leer T (°C) + fluido
10 T_C = local_toDouble(local_tryGetValue(app, {'temp','temperature','temp_op','temp_oper','T','T_C'}));
11 fluid = local_toChar(local_tryGetValue(app, {'fluid','fluido','fluid_sel','fluido_sel'}));
12
13 % Validaciones básicas
14 warn = {};
15 if ~(isfinite(Vraw) && Vraw>0), warn{end+1} = 'Volumen inválido.'; end
16 if ~(isfinite(T_C)), warn{end+1} = 'Temperatura inválida.'; end
17 if isempty(strtrim(fluid)), warn{end+1} = 'Fluido no seleccionado.'; end
18
19 % ----- Convertir volumen a m^3 (legacy)
20 [V_m3, msgV] = local_volumeToM3(Vraw, uV);
21 if ~isempty(msgV), warn{end+1} = msgV; end
22

```

La implementación completa del conjunto de funciones permitió estructurar el proceso de cálculo en seis módulos consecutivos, cada uno asociado a un bloque del diagrama de flujo y orientado a producir las variables necesarias para el módulo siguiente. Esta organización modular aseguró coherencia entre las ecuaciones aplicadas, las bases de datos consultadas y los resultados generados en cada etapa del diseño. La Tabla 8 resume el alcance de cada módulo item1–item6, con énfasis en los cálculos principales y en las variables que aporta cada uno al flujo general.

**Tabla 8***Resumen de funciones desarrolladas*

<b>Módulo</b>	<b>Alcance principal (cálculo)</b>	<b>Variables claves generadas</b>
item1 – Entradas y densidad	Normalización de volumen y temperatura; validación de unidades; cálculo de $\rho(T)$ mediante polinomio; verificación de rangos.	$V_{m3}$ , $T_C$ , $\rho(T)$
item2 – Ensamblado geométrico y presión	Cálculo del volumen desplazado; radio interno; diámetro; presión hidrostática; presión de diseño ajustada.	$R_i$ , $D$ , $\Delta P$ , $Po_{used}$ , $P_d$
item3 – Espesor del casco	Aplicación de ecuaciones ASME VIII-1 para recipientes esféricos; selección de $S$ y $E$ ; cálculo del espesor requerido.	$S$ , $E$ , $t_{req}$
item4 – Corrosión y espesor final	Consulta de tasas de corrosión; cálculo de $CA$ ; determinación del espesor nominal final.	$CA$ , $t_{nom}$
item5 – Boquillas y refuerzo	Selección de boquillas (NPS/SCH); obtención de dimensiones normalizadas; cálculo de refuerzo UG-37; verificación de soldaduras mediante el procedimiento riguroso incorporado en item5_4.	$Do$ , $t_{nzi}$ , $A_{req}$ , criterios de soldadura
item6 – Soportería y verificación estructural	Cálculo del peso del recipiente; distribución en 12 patas; verificación por esfuerzo axial y pandeo; selección de tubo estándar según ASME B36.10M.	$W_{casco}$ , carga/pata, $A_{min}$ , tubo seleccionado

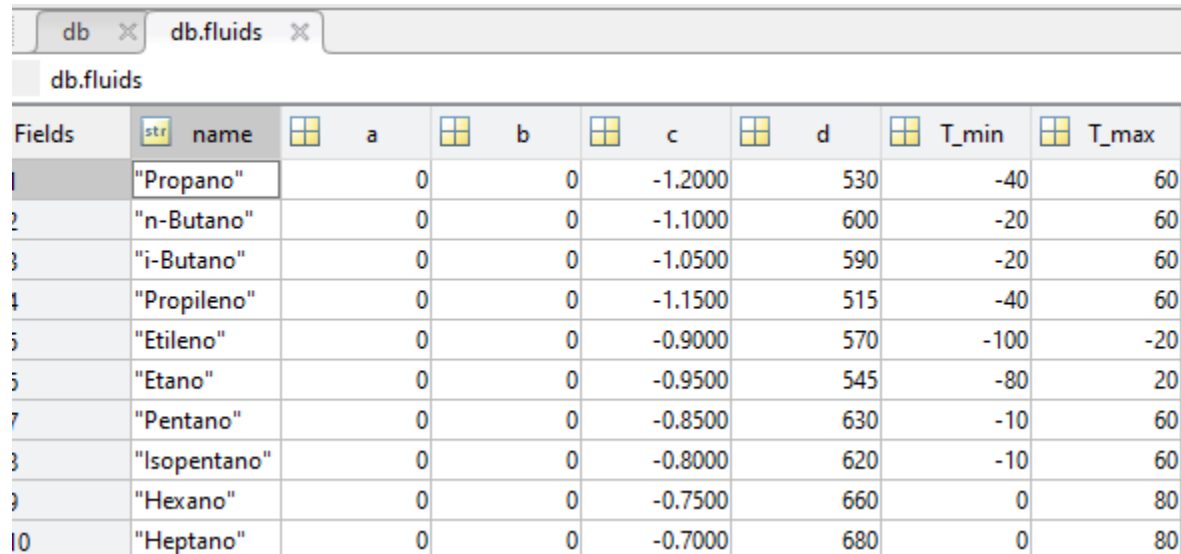
**6.2.2 Generación de los archivos de almacenamiento**

La generación de los archivos de almacenamiento se realizó a partir de las bases de datos definidas previamente en las secciones dedicadas a fluidos, materiales, corrosión y dimensiones normalizadas. Cada conjunto de información fue organizado en tablas o estructuras con los campos establecidos en dichas secciones y posteriormente almacenado en formato MATLAB, lo que permitió consolidar la información en archivos compactos y reutilizables. Este proceso garantiza que el entorno de cálculo acceda directamente a los valores requeridos sin intervención manual y

facilita la ampliación futura de las bases de datos, ya que basta con agregar nuevas filas a la tabla correspondiente y ejecutar nuevamente el procedimiento de guardado.

La construcción de estos archivos se realizó mediante la creación de estructuras que agrupan los datos relevantes y su posterior almacenamiento en un archivo .mat. Un ejemplo representativo corresponde al archivo que contiene los coeficientes polinómicos utilizados para el cálculo de la densidad en función de la temperatura. Para ello, la tabla con los nombres de los fluidos, los coeficientes del polinomio y los rangos de validez se asignó a una estructura principal y se almacenó mediante el comando de guardado correspondiente. Este mismo procedimiento se aplicó a las bases de datos de materiales, corrosión y tuberías, manteniendo un formato uniforme que facilita su consulta durante la ejecución del cálculo.

La Figura 8 muestra la visualización interna de uno de los archivos generados, donde se aprecia la estructura de datos almacenada y los campos disponibles para su uso en las funciones del entorno de cálculo. Esta representación permite verificar la correcta organización de la información y su correspondencia con las bases de datos desarrolladas en las secciones anteriores.

**Figura 8***Archivo de almacenamiento de datos*


Fields	str name	a	b	c	d	T_min	T_max
1	"Propano"	0	0	-1.2000	530	-40	60
2	"n-Butano"	0	0	-1.1000	600	-20	60
3	"i-Butano"	0	0	-1.0500	590	-20	60
4	"Propileno"	0	0	-1.1500	515	-40	60
5	"Etileno"	0	0	-0.9000	570	-100	-20
6	"Etano"	0	0	-0.9500	545	-80	20
7	"Pentano"	0	0	-0.8500	630	-10	60
8	"Isopentano"	0	0	-0.8000	620	-10	60
9	"Hexano"	0	0	-0.7500	660	0	80
10	"Heptano"	0	0	-0.7000	680	0	80

La Tabla 9 resume los archivos generados y la información contenida en cada uno, consolidando las bases de datos que soportan el proceso de cálculo.

**Tabla 9***Resumen de archivos .mat creados*

Archivo .mat	Contenido almacenado	Descripción de la base de datos
densidad.mat	db.fluids	Coefficientes polinómicos, rangos de temperatura y nombres de fluidos.
materiales.mat	db.materials	Esfuerzos admisibles y propiedades mecánicas asociadas a cada material.
corrosion.mat	db.corrosion	Tasas de corrosión según ambiente, condición del material y vida útil.
tuberias.mat	db.pipeDB	Dimensiones normalizadas NPS/SCH, diámetros exteriores, espesores y diámetros internos.

### **6.3 Resultados de la Fase III**

La Fase III permitió materializar el núcleo de cálculo desarrollado en una interfaz gráfica funcional, orientada a guiar el proceso de diseño de manera secuencial y a presentar los resultados de forma estructurada. En esta fase se consolidó la interacción entre el usuario y el motor de cálculo, asegurando coherencia entre los datos ingresados, la ejecución del modelo y la visualización de los resultados.

Los resultados de esta fase se reflejan en la definición del flujo de interacción, la implementación de componentes gráficos, el enlace efectivo con las funciones de cálculo y repositorios de datos, y la presentación organizada de salidas técnicas y memorias de cálculo.

#### ***6.3.1 Estructura de la interfaz***

La estructura de la interfaz se organizó como un flujo secuencial que refleja el orden lógico del proceso de diseño de recipientes a presión esféricos. Esta organización permite que el usuario avance de manera progresiva a través de las distintas etapas del diseño, evitando accesos directos a cálculos o resultados sin que previamente se hayan definido y procesado los datos necesarios.

El flujo inicia con una pantalla de bienvenida que establece el alcance del sistema y define explícitamente la secuencia de trabajo, desde la captura de datos del servicio hasta la generación de resultados. Esta pantalla cumple la función de contextualizar el proceso de diseño y delimitar el carácter preliminar de los resultados obtenidos, reforzando el uso responsable de la herramienta.

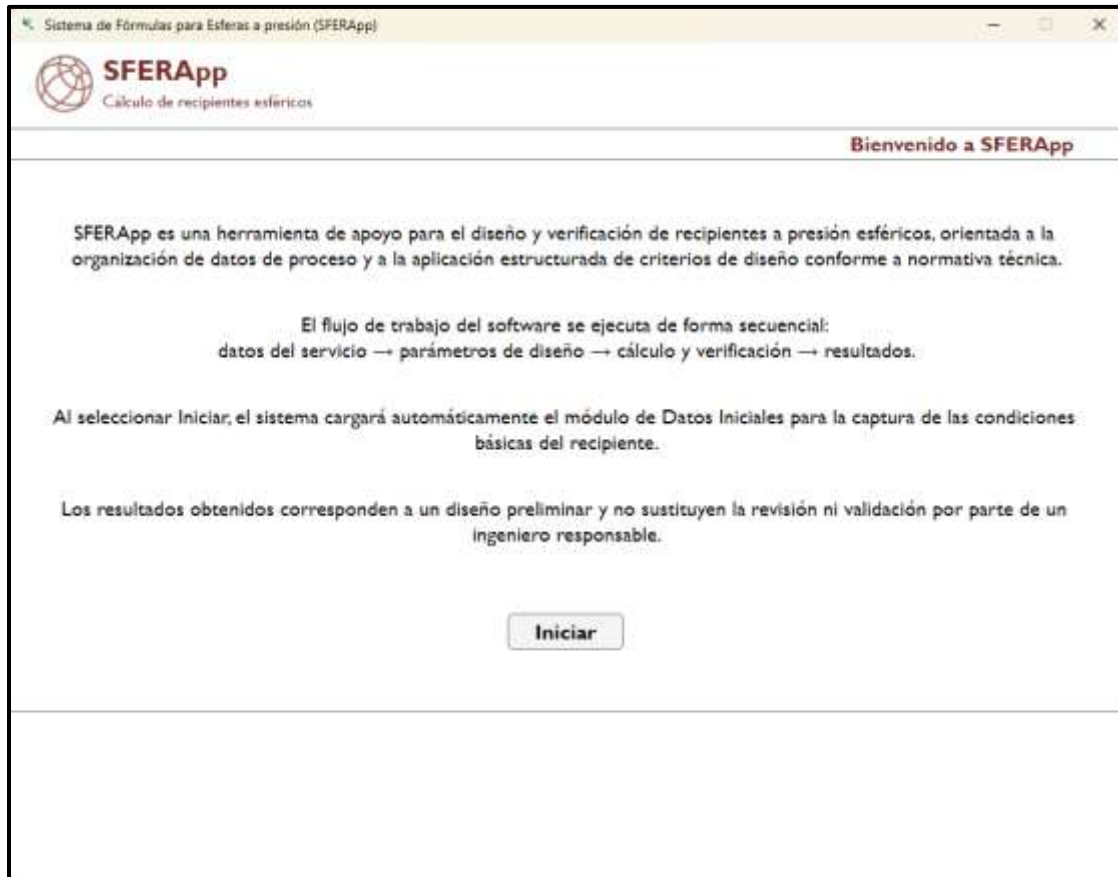
A partir de esta entrada, la estructura conduce al módulo de datos iniciales, donde se definen las condiciones básicas del recipiente, como volumen, presión y temperatura de operación, así como la selección del fluido y del material. Esta disposición asegura que los parámetros fundamentales del diseño queden establecidos antes de ejecutar cualquier cálculo.

La estructura continúa con módulos intermedios destinados al cálculo preliminar y a la evaluación de parámetros derivados, como la determinación del margen por corrosión y la obtención de propiedades del material seleccionado. Estos módulos permiten que el diseño se construya de manera incremental, integrando información adicional conforme se avanza en el proceso.

Finalmente, la estructura culmina en módulos orientados a la selección de boquillas y a la visualización de resultados, donde se consolidan los valores calculados y se presenta la información de diseño de forma organizada. Esta secuencia garantiza continuidad en el flujo de trabajo y coherencia entre las distintas etapas del diseño. La Figura 9 presenta la pantalla inicial del sistema, donde se establece el flujo general de ejecución y se delimita el alcance del diseño realizado.

**Figura 9**

*Pantalla inicial del sistema y definición del flujo general de trabajo*



*Nota.* La interfaz establece la secuencia de ejecución desde la captura de datos hasta la generación de resultados del diseño.

### **6.3.2 Implementación de componentes gráficos**

La implementación de los componentes gráficos permitió materializar la estructura definida en un entorno visual que facilita la interacción con el sistema. Estos componentes se diseñaron para soportar la captura ordenada de información y para reflejar de manera clara el estado del diseño en cada etapa del proceso.

En la pantalla de datos iniciales se integraron campos para el ingreso del volumen, la presión y la temperatura de operación, junto con controles de selección para el fluido y el material. Esta disposición permite concentrar en un solo espacio la información básica del diseño, reduciendo la dispersión de datos y facilitando su revisión.

Adicionalmente, se incorporaron elementos gráficos que permiten definir parámetros asociados a corrosión, como la vida útil esperada y la condición externa del recipiente. Estos componentes se vinculan directamente con las bases de datos internas, de modo que los valores seleccionados se traducen automáticamente en parámetros utilizados durante el cálculo.

Se implementaron componentes gráficos basados en listas desplegables para la selección controlada de material para el casco del recipiente, fluidos y condiciones externas. Estas listas permiten restringir el ingreso de información a valores previamente definidos en los repositorios internos, garantizando coherencia entre las propiedades seleccionadas y las utilizadas durante el cálculo.

La selección del fluido y material se realiza a partir de un conjunto de sustancias y materiales predefinidas, cuyas propiedades dependientes de la temperatura se encuentran estructuradas en la base de datos del sistema. De manera similar, la condición externa del recipiente se define mediante una lista que representa distintos ambientes de exposición, asociados a criterios de corrosión utilizados para la estimación del margen correspondiente.

La Figura 10 muestra el componente de selección de fluido, mientras que la Figura 11 presenta la lista de condiciones externas disponibles, evidenciando el uso de controles gráficos como mecanismo de validación del ingreso de datos.

**Figura 10**

*Selección del fluido de proceso mediante lista desplegable*

Sistema de Fórmulas para Esferas a presión (SFERApp)

**SFERApp**  
Cálculo de recipientes esféricos

**Datos Iniciales de Diseño**

Volumen  | Unidades m<sup>3</sup> ▼

Presión de operación  | Unidades MPa ▼

Temperatura de operación  | Unidades °C ▼

Fluido  ▼

Material  ▼

Corrosión a

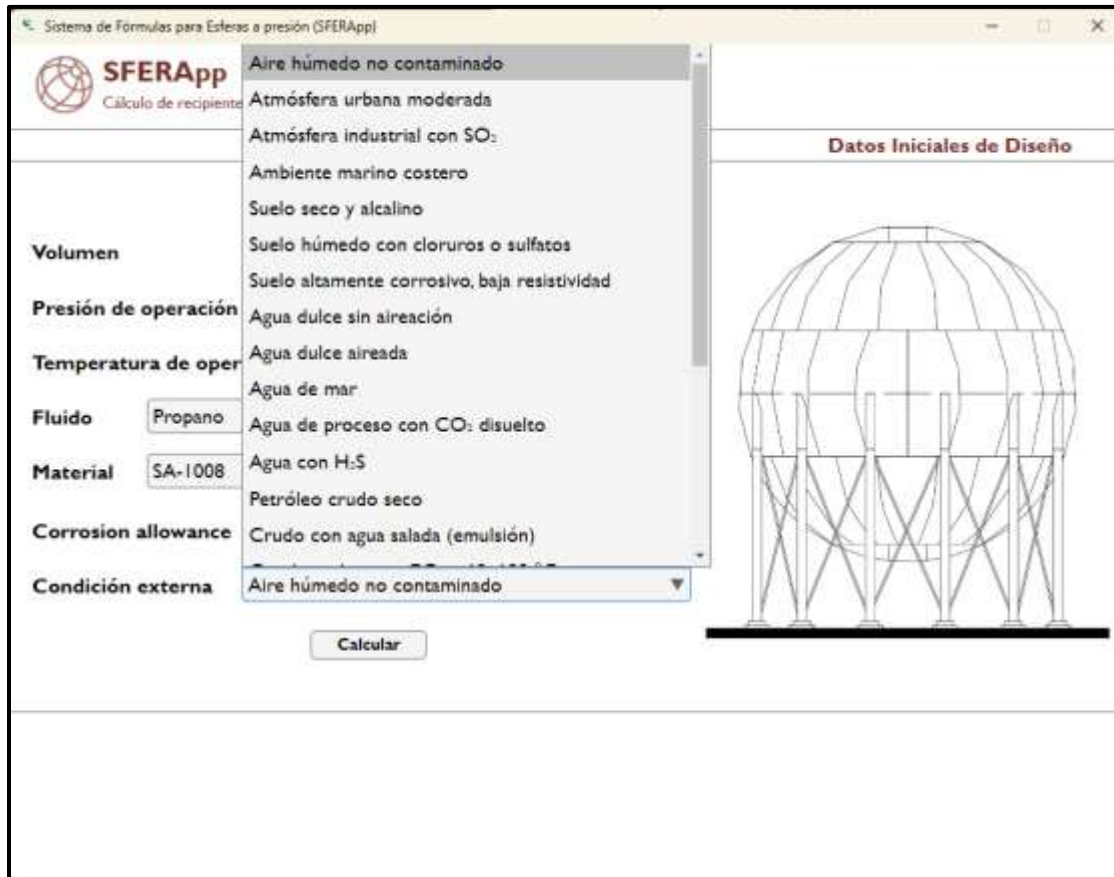
Condición e  ▼

Propano  
n-Butano  
i-Butano  
Propileno  
Pentano  
Isopentano  
Hexano  
Heptano  
Amoniaco  
Cloro  
Dióxido de azufre  
Sulfuro de H<sub>2</sub>

*Nota.* La selección se realiza a partir de un repositorio interno de fluidos con propiedades dependientes de la temperatura

**Figura 11**

*Selección de la condición externa para evaluación de corrosión*



*Nota.* Las condiciones externas representan distintos ambientes de exposición utilizados para la estimación del margen por corrosión.

La inclusión de una representación esquemática del recipiente dentro de la pantalla de datos iniciales permite contextualizar visualmente el diseño, facilitando la comprensión del tipo de equipo analizado y su configuración general. Este elemento refuerza la relación entre los datos ingresados y el objeto físico que se está diseñando.

Los componentes gráficos implementados aseguran uniformidad en el ingreso de información y reducen la posibilidad de inconsistencias, ya que la selección de materiales, fluidos

y condiciones externas se realiza a partir de listas controladas. Esto contribuye a mantener coherencia entre los datos ingresados y los repositorios internos utilizados por el sistema. La Figura 12 muestra la pantalla de datos iniciales de diseño, donde se integran los campos de entrada y la representación esquemática del recipiente.

**Figura 12**

*Pantalla de captura de datos iniciales de diseño*

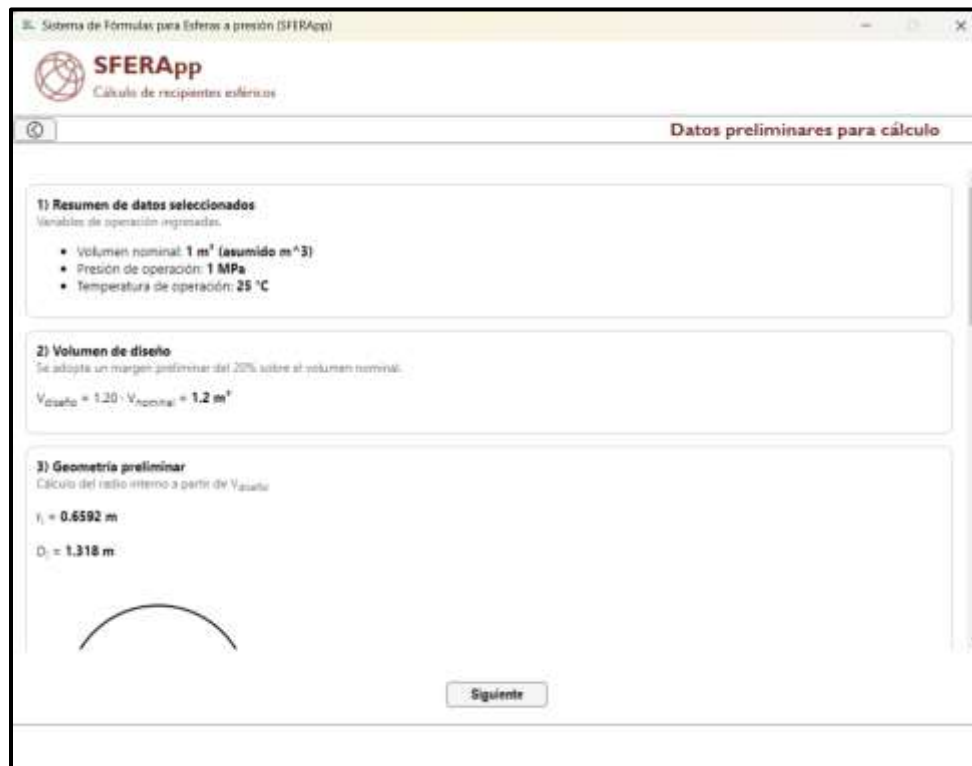
The screenshot shows the 'Sistema de Fórmulas para Esferas a presión (SFERApp)' window. The title bar includes the application name and standard window controls. The main header features the SFERApp logo and the text 'Cálculo de recipientes esféricos'. Below this, the section is titled 'Datos Iniciales de Diseño'. The interface contains several input fields and dropdown menus: 'Volumen' (input: empty, units: m³), 'Presión de operación' (input: empty, units: MPa), 'Temperatura de operación' (input: 25, units: °C), 'Fluido' (dropdown: Propano, button: 'Agregar fluido'), 'Material' (dropdown: SA-1008, button: 'Agregar material'), 'Corrosion allowance' (input: empty), 'Vida útil esperada [años]' (input: 25), and 'Condición externa' (dropdown: Aire húmedo no contaminado). A 'Calcular' button is positioned below the input fields. On the right side, there is a 3D wireframe schematic of a spherical pressure vessel with a support structure.

*Nota.* Se presentan los campos de volumen, presión, temperatura, selección de material y fluido, y parámetros asociados a corrosión.

El sistema presenta una pantalla de datos preliminares donde se consolidan las variables de entrada y los parámetros geométricos derivados, permitiendo al usuario verificar la coherencia de la información antes de continuar con los cálculos normativos. Esta pantalla actúa como un punto de control previo a la ejecución de las evaluaciones estructurales. La Figura 13 presenta la pantalla de datos preliminares para cálculo.

**Figura 13**

*Pantalla de datos preliminares para cálculo*



*Nota.* Se presentan los valores consolidados de volumen, geometría y presión de diseño antes de la evaluación estructural

Se incorporó un módulo específico para la definición y revisión de boquillas del recipiente. Este módulo permite ingresar la cantidad de boquillas y definir sus características geométricas y dimensionales mediante una tabla editable, integrando la información necesaria para evaluaciones posteriores. La tabla de boquillas se actualiza dinámicamente en función de la cantidad definida por el usuario, habilitando la selección del tipo de boquilla, su posición y sus dimensiones normalizadas. Este enfoque facilita la organización de la información y permite verificar de manera estructurada la configuración del recipiente. La Figura 7 muestra el módulo inicial de selección de boquillas, mientras que la Figura 15 presenta la tabla con boquillas definidas.

**Figura 14**

*Módulo de selección de boquillas*



The screenshot shows a web application window titled "Sistema de Fórmulas para Esferas a presión (SFERApp)". The main header includes the SFERApp logo and the text "Cálculo de recipientes esféricos". Below the header, there is a section titled "Selección de boquillas". On the left side of this section, there is a label "Ingrese la cantidad de boquillas" followed by a text input field containing the number "0". Below the input field is a button labeled "Previsualizar". To the right of the input field is a table with four columns labeled "Column 1", "Column 2", "Column 3", and "Column 4". The table is currently empty.

*Nota.* La interfaz permite definir la cantidad de boquillas y habilitar la edición de sus parámetros

Figura 15

Tabla de boquillas con parámetros definidos por el usuario

Sistema de Fórmulas para Esferas a presión (SFERApp)

**SFERApp**  
Cálculo de recipientes esféricos

Selección de boquillas

Ingrese la cantidad de boquillas

ID	Tipo	z0 [m]	phi (°)	NPS [in]	SCH
N1	SUP	NaN	NaN	2	40
N2	LAT	0	90	4	40
N3	LAT	0.3000	180	4	40
N4	(seleccione)	NaN	NaN	(seleccione)	(seleccione)

(seleccione)  
LAT  
SUP  
INF

*Nota.* Se presentan las variables geométricas y dimensionales asociadas a cada boquilla del recipiente

Finalmente, el sistema consolida los resultados del diseño en una memoria de cálculo estructurada, donde se presentan de forma ordenada los datos de entrada, los parámetros derivados y los resultados finales del diseño. Esta memoria constituye la salida técnica principal del software y puede emplearse como soporte documental del proceso de diseño. En la xx ase presenta el

informe preliminar generado dentro del aplicativo, y en la Figura 16 se presenta el informe exportado en el formato final de entrega.

**Figura 16**

*Previsualización de la memoria de cálculo generada por el sistema*

Sistema de Fórmulas para Esferas a presión (SFERApp)

**SFERApp**  
Cálculo de recipientes esféricos

**Selección de boquillas**

Ingrese la cantidad de boquillas

ID	Tipo	z0 [m]	phi (°)	NPS [in]	SCH
N1	SUP	NaN	NaN	2	40
N2	LAT	0	90	4	40
N3	LAT	0.3000	180	4	40
N4	(seleccione)	NaN	NaN	(seleccione)	(seleccione)

**3. Espesor del casco (ASME VIII-1)**

Ecuación para esfera (ASME VIII-1):

$$t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P}$$

Se reporta  $t_{req}$  y el espesor nominal  $t_{nom} = t_{req} + CA$ .

P_diseño (P)	1.26684 MPa
Radio interno (R)	659.221 mm
Eficiencia de junta (E)	1
Esfuerzo admisible (S)	91.9301 MPa
Corrosion Allowance (CA)	0.125 mm

*Nota.* La memoria consolida los datos de entrada, los parámetros derivados y los resultados finales del diseño del recipiente esférico.

Figura 17

Memoria de cálculo generada por el sistema

Memoria de cálculo – Recipiente a presión esférico	
Informe del diseño de recipiente a presión esférico.	
Fecha: 2025-02-09 04:37:48	
<b>1. Datos de entrada (fluido y densidad)</b>	
Volumen nominal (entrada)	1 m <sup>3</sup>
Volumen en base (m <sup>3</sup> )	1 m <sup>3</sup>
Temperatura (°C)	25 °C
Fluido	Propano
Densidad ρ(T)	500 kg/m <sup>3</sup>
<b>2. Volumen de diseño, geometría y presión de diseño</b>	
Se adoptó Vd = 1.20 V y se calculó Ri = (3 Vd/(4 π)) <sup>1/3</sup> . La altura hidrostática se tomó como h = D = 2 Ri. Con ρ(T) del fluido seleccionado, se estimó ΔP = ρ g h y se obtuvo Po_used = Po + ΔP. Finalmente, se definió Pd aplicando la regla en psi (Po_used > 300 psi → 1.1 Po_used; si no → Po_used + 30 psi).	
V (m <sup>3</sup> )	1
Vd = 1.20 V (m <sup>3</sup> )	1.2
Ri (m)	0.658221
D = 2 Ri (m)	1.31844
Fluido	propano
T	25
ρ(T) (kg/m <sup>3</sup> )	500
Po (MPa)	1
ΔP hidrostática (MPa)	0.00646475
Po_used (MPa)	1.00646
Pd (MPa)	1.21331
Pd (psi)	175.975

*Nota.* La memoria consolida los datos de entrada, los parámetros derivados y los resultados finales del diseño del recipiente esférico.

## 6.4 Resultados de la Fase IV

La validación del software se desarrolló mediante la ejecución de casos de prueba documentados en estudios académicos y artículos científicos relacionados con recipientes a presión esféricos. Estos casos proporcionaron parámetros de diseño claramente establecidos y resultados verificables, lo que permitió contrastar el comportamiento del sistema frente a

escenarios representativos y evaluar la correspondencia entre los valores generados y los reportados en la literatura técnica. El análisis de estos resultados permitió identificar la coherencia del cálculo, la correcta aplicación de los criterios normativos y la estabilidad del algoritmo frente a variaciones en las condiciones de diseño.

#### ***6.4.1 Selección de casos de prueba***

La selección de los casos de prueba se orientó a reunir referencias que ofrecieran configuraciones completas de diseño y resultados suficientemente detallados para permitir una verificación precisa del software. Para ello se consideraron proyectos académicos y estudios científicos que abordan recipientes esféricos bajo diferentes condiciones de presión, material y criterios normativos, conformando un conjunto de escenarios que permite evaluar la respuesta del sistema en situaciones diversas y técnicamente contrastadas.

##### **Caso 1**

El primer caso corresponde a un proyecto académico orientado al diseño, cálculo y simulación de un tanque esférico para almacenamiento de fluido a alta presión. Este estudio presenta un conjunto completo de parámetros geométricos, materiales y operativos, lo que permite disponer de un escenario de referencia con condiciones de diseño bien definidas. La claridad en la formulación de los datos de partida y la estructura del proceso de cálculo lo convierten en un caso adecuado para contrastar la respuesta del software frente a un diseño integral desarrollado bajo criterios normativos vigentes (García, 2021).

**Caso 2**

El segundo caso proviene de un estudio científico que modela el espesor variable de membrana en recipientes esféricos destinados al almacenamiento de gas natural licuado. El trabajo se caracteriza por el uso de análisis por elementos finitos y por la definición precisa de las tensiones admisibles del material, lo que permite evaluar la capacidad del software para reproducir resultados asociados a la distribución de esfuerzos y al dimensionamiento del espesor bajo condiciones estrictamente controladas (Adeyefa & Oluwole, 2013).

**Caso 3**

El tercer caso corresponde a un segundo escenario del mismo estudio científico, esta vez enfocado en recipientes esféricos para almacenamiento de gas comprimido. Aunque comparte la metodología general del caso anterior, introduce variaciones en presión interna, propiedades del material y parámetros geométricos, lo que permite verificar la consistencia del software frente a cambios en las condiciones de carga y en la respuesta estructural del recipiente (Adeyefa & Oluwole, 2013).

**Caso 4**

El cuarto caso corresponde a un proyecto de grado dedicado al diseño de un recipiente esférico para almacenamiento de GLP bajo la norma ASME VIII División 1, el cual integra requisitos de presión, temperatura y cargas ambientales que permiten evaluar el desempeño del software en un escenario con múltiples exigencias normativas (Lafuente, 2016).

### 6.4.2 Ejecución del software

La ejecución del software se realizó siguiendo una secuencia estructurada de ingreso de datos y verificación de resultados, con el fin de reproducir las condiciones de diseño establecidas en los casos de prueba seleccionados. Para ilustrar el procedimiento, se presenta el desarrollo correspondiente al **Caso 1**, donde se documenta cada etapa del proceso y se muestran las figuras asociadas a la interfaz y a los cálculos generados por la herramienta.

#### Ingreso de datos iniciales

El proceso comenzó con la incorporación de los parámetros fundamentales del diseño. En la Figura 19 se observa la ventana inicial del software, donde se registraron el volumen nominal del tanque (3591.36 m<sup>3</sup>), la presión de operación (1.4 MPa), la temperatura de operación (40 °C), el fluido almacenado (propano) y el material seleccionado (SA-516 Grado 70). También se ingresó la vida útil prevista de 40 años y la condición externa correspondiente a atmósfera industrial con presencia de SO<sub>2</sub>, lo que permitió determinar una tolerancia por corrosión de 2 mm, como se observa en la Figura 18.

#### Figura 18

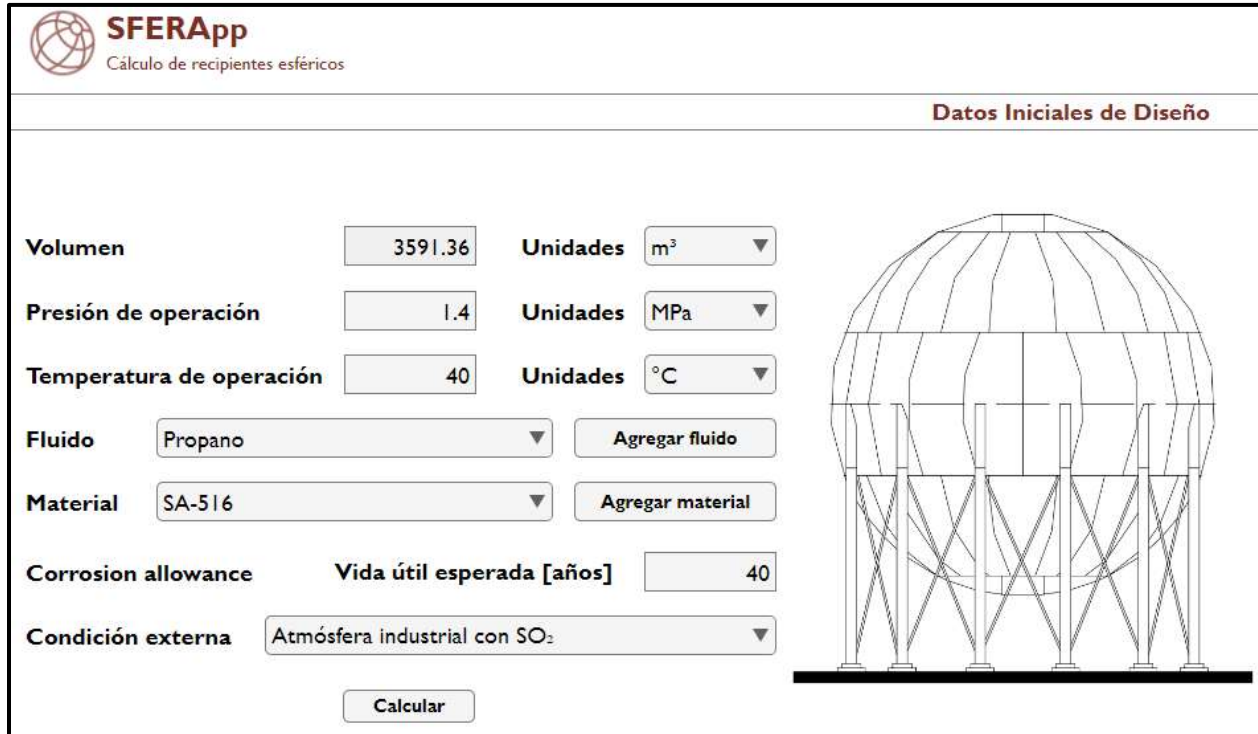
*Valor de CA para el caso 1*

5) Corrosión	
Cálculo del corrosión atmosférico (CA) para la vida útil ingresada.	
Ítem	Valor
Material	Acero al carbono
Condición	Atmósfera industrial con SO <sub>2</sub>
Tasa	0.05 mm/año
Vida útil	40 años
<b>CA</b>	<b>2 mm</b>

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado

Figura 19

Ingreso de datos para el caso 1



The screenshot shows the 'Datos Iniciales de Diseño' (Initial Design Data) screen of the SFERApp software. The interface includes a logo for SFERApp (Cálculo de recipientes esféricos) and a title bar. The main area contains several input fields and buttons:

- Volumen:** Input field with value 3591.36, Units dropdown set to m<sup>3</sup>.
- Presión de operación:** Input field with value 1.4, Units dropdown set to MPa.
- Temperatura de operación:** Input field with value 40, Units dropdown set to °C.
- Fluido:** Dropdown menu set to Propano, with an 'Agregar fluido' button.
- Material:** Dropdown menu set to SA-516, with an 'Agregar material' button.
- Corrosion allowance:** Input field with value 40.
- Vida útil esperada [años]:** Input field with value 40.
- Condición externa:** Dropdown menu set to 'Atmósfera industrial con SO<sub>2</sub>'.
- Calcular:** A button at the bottom center.

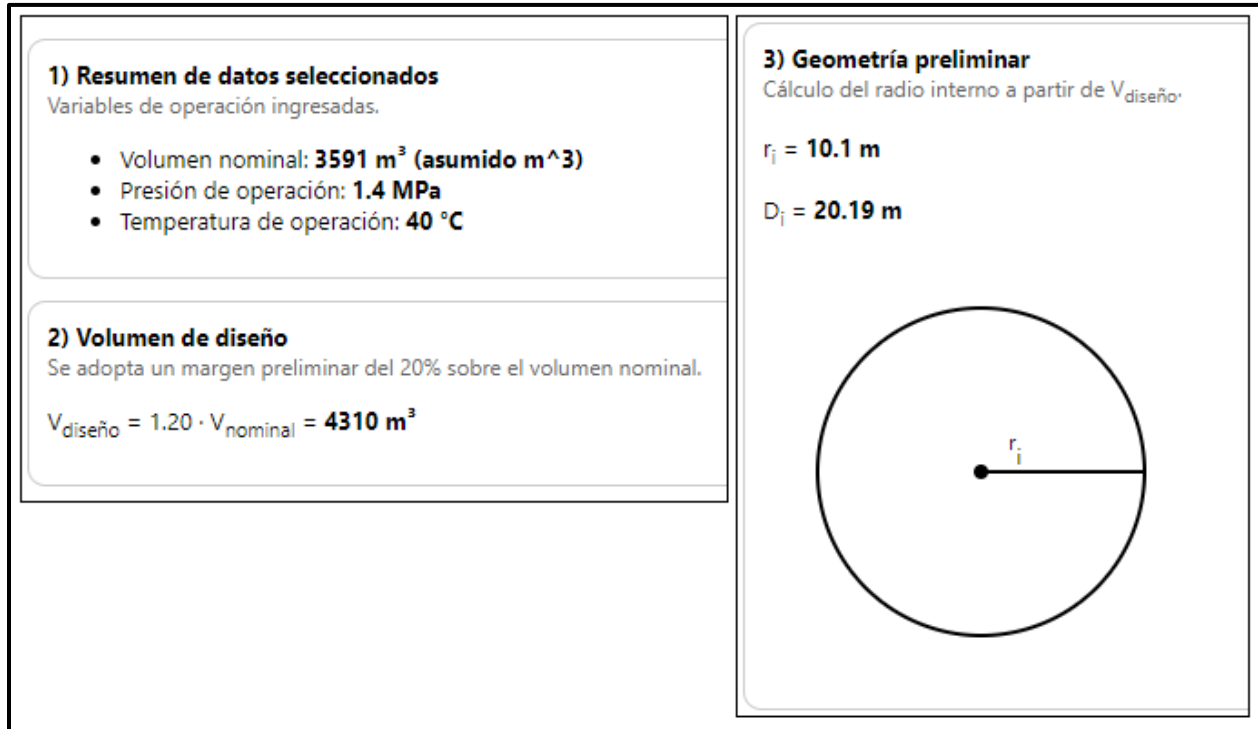
On the right side of the interface, there is a 3D wireframe diagram of a spherical vessel supported by a truss structure.

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

Con los datos iniciales, el software calculó automáticamente el volumen de diseño aplicando un margen del 20 % sobre el volumen nominal. La Figura 20 muestra el valor obtenido (4310 m<sup>3</sup>) y el cálculo del radio interno (10.1 m), a partir del cual se generó la geometría preliminar del recipiente. Esta etapa permitió verificar que la configuración geométrica coincidiera con la establecida en la referencia técnica del caso.

**Figura 20**

*Valores preliminares arrojados por sferapp*



*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

El sistema aplicó el criterio correspondiente para definir la presión de diseño a partir de la presión de operación. En la Figura 21 se presenta el cálculo realizado, donde la presión de diseño resultó en 1.607 MPa, valor coherente con la regla adoptada para recipientes con presiones superiores a 300 psi. Esta verificación aseguró la consistencia entre los parámetros ingresados y los criterios normativos utilizados.

**Figura 21**

*Presión de diseño calculado en sferapp*

**4) Presión de diseño**  
 Conversión a MPa y cálculo de  $P_{\text{diseño}}$  con la regla preliminar adoptada.  
 Criterio:

- Si  $P_{\text{Op}} > 300 \text{ psi}$  →  $P_{\text{diseño}} = 1.10 \cdot P_{\text{Op}}$
- Si  $P_{\text{Op}} \leq 300 \text{ psi}$  →  $P_{\text{diseño}} = P_{\text{Op}} + 30 \text{ psi}$

Aplicación al caso:  $P_{\text{diseño}} = P_{\text{Op}} + 30 \text{ psi}$  (porque  $P_{\text{Op}} \leq 300 \text{ psi}$ ).

$P_{\text{Op}} = 1.4 \text{ MPa}$

**$P_{\text{diseño}} = 1.607 \text{ MPa}$**

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

El software identificó las propiedades mecánicas del material seleccionado y determinó el esfuerzo admisible empleado en el cálculo del espesor. La Figura 22 muestra el resumen del material SA-516 Grado 70, incluyendo el esfuerzo de fluencia mínimo (262 MPa) y el valor adoptado para el esfuerzo admisible (174.667 MPa), calculado como una fracción conservadora del esfuerzo de fluencia.

**Figura 22**

*Valores obtenidos para el material seleccionado*

El Material ASME	
Resumen del material seleccionado desde la base de datos	
Campo	Valor
SpecNo	SA-516
UNS	K02700
Tipo / Grado	70
Forma	Plate
$S_y$ min (ksi)	38
$S_{yt}$ min (ksi)	70

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

Con los parámetros anteriores, el software ejecutó el cálculo del espesor mínimo requerido según ASME VIII-1. En la Figura 23 se presentan los valores obtenidos: un espesor requerido sin corrosión de 49.24 mm y un espesor nominal de 51.24 mm al incorporar la tolerancia por corrosión. Asimismo, se muestran los espesores por zonas para la condición de operación ( $t_0 = 48.3$  mm,  $t_1 = 48.8$  mm,  $t_2 = 50.1$  mm,  $t_3 = 51.3$  mm y  $t_4 = 51.9$  mm), con un error relativo inferior al 5 %, lo que confirma la coherencia del cálculo frente a los valores reportados en la referencia del caso.

### Figura 23

*Resultado de espesor para el caso 1*

P_diseño (P)	1.70228 MPa
Radio interno (R)	10095.3 mm
Material (SpecNo)	SA-516
Esfuerzo admisible (S)	174.667 MPa
Eficiencia de junta adoptada (E)	1
Corrosion Allowance (CA)	2 mm
t requerido (sin CA)	49.2414 mm
t nominal (t_req + CA)	51.2414 mm

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

El procedimiento descrito se aplicó de manera equivalente a los demás casos de prueba. Sin embargo, los resultados específicos de cada uno se presentan en las subsecciones siguientes, donde se comparan los valores generados por el software con los reportados por los correspondientes. En el apéndice E se pueden detallar las memorias de cálculo para las 4 validaciones.

### 6.4.3 Comparación de resultados

La comparación de resultados se realizó tomando como referencia los espesores calculados por los autores en cada caso de prueba y los valores obtenidos mediante la ejecución del software. El análisis se centró en verificar la correspondencia entre los espesores requeridos y nominales para las distintas zonas del casco esférico, evaluando el porcentaje de desviación y la consistencia del cálculo frente a los criterios normativos aplicados. En el Caso 4, además de la comparación de espesores, se incluyó la verificación de los resultados asociados al diseño de boquillas y a la estructura de soporte, dado que este estudio documenta estos elementos de manera explícita. La evaluación conjunta permitió confirmar la coherencia del software frente a configuraciones diversas y asegurar que los valores generados se mantienen dentro de los rangos esperados según las referencias técnicas. Los resultados consolidados de esta comparación se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Comparación de resultados de espesor*

<b>Caso</b>	<b>Espesor del autor</b>	<b>Espesor del software</b>	<b>% error</b>
1	49.2414 mm	51.3000 mm	5%
2	11.7800 mm	12.2776 mm	12%
3	10.8700 mm	13.1660 mm	8%
4	35.1993 mm	37.720 mm	6%

El caso con mayor variación corresponde al Caso 2, donde se registra un error del 12 %. Esta diferencia se explica principalmente porque el estudio original compara el espesor calculado

mediante el método ASME con los resultados obtenidos por análisis por elementos finitos (FEA), lo que introduce una desviación inherente entre ambos enfoques. El software reproduce correctamente el espesor ASME, pero el artículo reporta la diferencia frente al modelo FEA, lo que incrementa el porcentaje de variación.

En los demás casos, las diferencias observadas se mantienen dentro de márgenes reducidos, lo que evidencia la consistencia del cálculo. En particular, el Caso 1 presenta una variación del 5 %, asociada principalmente a la condición interna del software de sobredimensionar el volumen del tanque en un 20 % para garantizar un diseño conservador. Este ajuste influye directamente en el espesor final, generando incrementos moderados que se reflejan en el porcentaje de error, pero que permanecen dentro de rangos aceptables para fines de validación.

Para complementar la verificación del Caso 4, se procedió a evaluar los resultados asociados al diseño de boquillas siguiendo el procedimiento establecido en el marco teórico, el cual define los criterios para la determinación del área requerida y disponible en la zona de refuerzo. Con base en la información suministrada por el autor, se consideraron las conexiones más representativas del recipiente, específicamente la entrada de hombre (MA1), la boquilla de entrada/salida (N1) y la línea de vapor o recirculación (N5). Estas boquillas fueron seleccionadas por su relevancia funcional y por constituir los elementos con mayor influencia en la integridad estructural del casco.

La verificación del *manhole* MA1 se realizó evaluando el área requerida y el área disponible según los aportes del casco, la boquilla y las soldaduras. Los resultados obtenidos mediante el aplicativo son presentados en la Figura 24, permiten confirmar que la abertura cumple con los criterios establecidos para conexiones de gran diámetro y que la diferencia entre los valores del autor y los generados por el software se mantiene dentro del margen esperado.

**Figura 24***Resultados para los refuerzos del MA1*

<u>L_R</u>	<u>A</u>	<u>A1</u>	<u>A2</u>	<u>A41</u>	<u>A42</u>	<u>A5</u>	<u>A_calc</u>
566.79	208.32	7.0607	38.057	1	6.25	166.97	219.34

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

Para las boquillas MA1, N1 y N5, la comparación se realizó siguiendo el mismo procedimiento, verificando el área requerida según UG-37 y contrastándola con el área disponible calculada por el software. Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 11, muestran que las tres conexiones presentan porcentajes de error reducidos entre los valores del autor y los del modelo, manteniéndose dentro de los rangos aceptables. Las variaciones observadas responden principalmente al carácter conservador del cálculo, lo que explica los incrementos moderados en el área disponible sin afectar la validez del diseño.

**Tabla 11***Comparación de resultados para las boquillas*

<b>Parámetro</b>	<b>Autor</b>	<b>Software</b>	<b>% error aprox.</b>
L_R	566.79 mm	566.79 mm	0%
A	208.2953 cm <sup>2</sup>	208.32 cm <sup>2</sup>	0.01 %
A1	7.0848 cm <sup>2</sup>	7.0607 cm <sup>2</sup>	0.34 %
A2	36.41 cm <sup>2</sup>	38.057 cm <sup>2</sup>	4.5 %
A41	1.00 cm <sup>2</sup>	1.00 cm <sup>2</sup>	0%
A42	6.25023 cm <sup>2</sup>	6.25 cm <sup>2</sup>	0.004 %

<b>Parámetro</b>	<b>Autor</b>	<b>Software</b>	<b>% error aprox.</b>
A5	167.31 cm <sup>2</sup>	166.97 cm <sup>2</sup>	0.20 %

La verificación de la estructura se realizó tomando como referencia el valor obtenido por el software para un tubo individual, el cual se considera representativo del comportamiento global del sistema de soporte. Este elemento fue posteriormente modelado en SolidWorks siguiendo la geometría y condiciones de carga definidas en el estudio, con el fin de evaluar su respuesta estructural bajo los esfuerzos inducidos por el peso propio y las cargas transmitidas por el casco. La Figura 25 presenta el resultado entregado por el software para el tubo seleccionado, mientras que la Figura 26 muestra el croquis del tubo modelado en SolidWorks para su validación.

### Figura 25

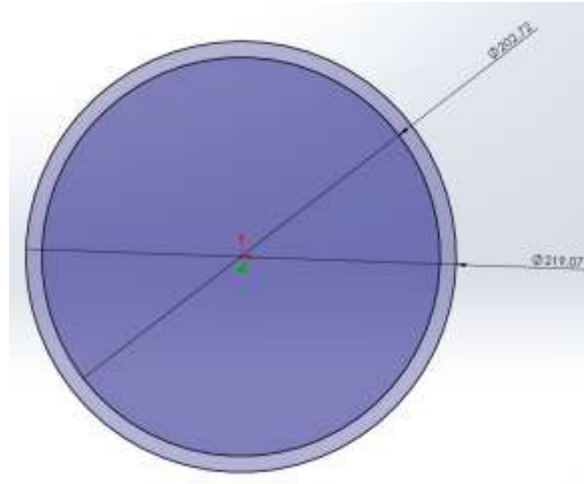
*Resultados de la estructura para el caso 4*

<b>Carga por pata, P</b>	766.014 kN
<b>A requerida (axial), A_{req}</b>	5106.76 mm <sup>2</sup>
<b>Diámetro eq. (solo axial, ref), D_{eq}</b>	80.6358 mm
<b>Tubo seleccionado (pipeDB)</b>	8   SCH 40
<b>Diámetro exterior, D_o</b>	219.075 mm
<b>Espesor tubo, t</b>	8.1788 mm
<b>Diámetro interior, D_i</b>	202.717 mm

*Nota.* Tomado de *sferapp*, software desarrollado.

**Figura 26**

*Sección transversal del tubo en SolidWorks*



*Nota.* Generado con SolidWorks.

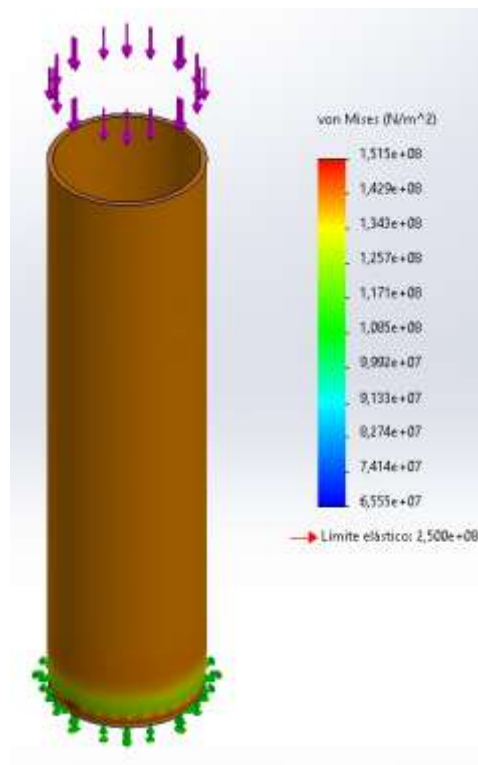
La Figura 27 corresponde al análisis por elementos finitos del tubo estructural modelado en SolidWorks, donde se observa la distribución del esfuerzo de von Mises bajo las condiciones de carga y restricción aplicadas. El resultado muestra que los valores máximos de esfuerzo se concentran en la zona superior del elemento, alcanzando aproximadamente  $1.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , mientras que el límite elástico del material se encuentra en  $2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ . Esta relación evidencia que el esfuerzo máximo está por debajo del límite permisible, lo que indica que el componente trabaja dentro del rango elástico y no presenta riesgo de falla por sobreesfuerzo.

La comparación entre la respuesta del software inicial y la simulación en SolidWorks confirma que el comportamiento estructural del tubo es coherente con las condiciones de diseño. La distribución de esfuerzos es estable, no se observan concentraciones críticas que comprometan la integridad del elemento y el margen de seguridad frente al límite elástico es adecuado. Con ello

se valida que la estructura cumple con los criterios de resistencia establecidos para el soporte del recipiente.

### Figura 27

*Resultado del análisis estático en SolidWorks*



*Nota.* Generado con SolidWorks.

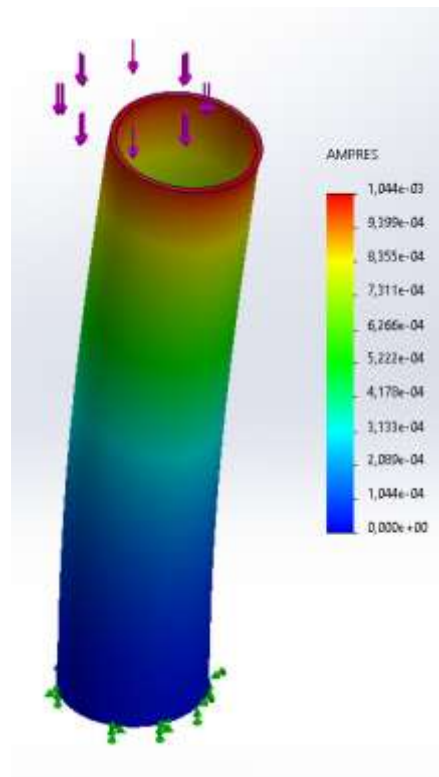
Adicionalmente, se realizó análisis de deformación del tubo estructural bajo las condiciones de carga aplicadas (pandeo), donde se observa la distribución del parámetro AMPRES a lo largo del elemento. El resultado muestra que la deformación máxima se concentra en la zona superior del tubo, mientras que la base permanece prácticamente sin desplazamiento debido a las restricciones aplicadas. Los valores obtenidos se mantienen dentro de un rango muy reducido, con

un máximo cercano a  $1.044 \times 10^{-3}$ , lo cual indica que el elemento trabaja en un régimen completamente elástico y sin riesgo de inestabilidad o falla por deformación excesiva. La Figura 28 evidencia que la magnitud de la deformación es baja y que el comportamiento del tubo es estable frente a la carga aplicada.

La comparación entre este resultado y el análisis previo confirma que la estructura cumple con los criterios de servicio establecidos para el soporte del recipiente. La distribución gradual de la deformación, sin concentraciones abruptas ni zonas críticas, valida que el diseño del tubo es adecuado y que su rigidez es suficiente para garantizar la integridad del sistema.

### Figura 28

*Resultado del análisis de pandeo en SolidWorks*



*Nota.* Generado con SolidWorks.

## 7. Conclusiones

El software desarrollado permitió implementar de manera consistente los procedimientos del ASME BPVC Sección VIII División I para el diseño de recipientes a presión esféricos en un entorno computacional. La herramienta integra cálculo, verificación y generación de resultados de forma estructurada, facilitando la aplicación del código en un contexto académico. La validación frente a referencias técnicas mostró desviaciones relativas del orden del **5%**, lo que confirma la correcta interpretación y aplicación del marco normativo dentro del sistema.

La definición y estructuración de los datos de entrada permitió establecer un conjunto coherente de variables necesarias para el diseño, incluyendo presión, temperatura, geometría, material, fluido y tolerancia por corrosión. Este enfoque aseguró consistencia dimensional y normativa desde las etapas iniciales del cálculo, evitando configuraciones no físicas y garantizando estabilidad en la ejecución del modelo para los casos evaluados.

La implementación computacional de las ecuaciones del código permitió automatizar el cálculo del espesor del casco esférico y la verificación de las condiciones normativas asociadas. Los resultados obtenidos por el software se mantuvieron en concordancia con los valores reportados en manuales técnicos y trabajos académicos, presentando diferencias relativas reducidas y consistentes con un diseño normativo preliminar, lo que confirma la validez del modelo programado.

La interfaz gráfica desarrollada facilitó la interacción con el sistema, permitiendo ingresar los datos de diseño, ejecutar el flujo completo de cálculo y visualizar los resultados de manera estructurada. La integración con repositorios de datos y la generación de reportes consolidaron la

información técnica del diseño, favoreciendo su uso como herramienta de apoyo en procesos de enseñanza y aprendizaje del diseño de recipientes a presión.

La validación del software mediante la comparación con diseños documentados y referencias técnicas evidenció una concordancia adecuada entre los resultados calculados y los valores de referencia. Las diferencias observadas se mantuvieron dentro de márgenes aceptables para un diseño preliminar normativo, lo que confirma la confiabilidad del software como herramienta para la evaluación y el análisis de recipientes a presión esféricos en escenarios de diseño conocidos.

### Referencias

- Adeyefa, O., & Oluwole, O. (2013). Finite Element Modeling of Variable Membrane Thickness for Field Fabricated Spherical (LNG) Pressure Vessels. *Engineering*, 5(5), 445–452. <https://doi.org/10.4236/eng.2013.55056>
- ASME. (2018). ASME B36.10M-2018: Welded and Seamless Wrought Steel Pipe. ASME.
- ASME. (2021). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D: Materials (2021st ed.). The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2023). ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels (2023rd ed.). The American Society of Mechanical Engineers.
- Barrero Ripoll, A., & Pérez García, J. (2015). Diseño y cálculo de recipientes a presión. Editorial Reverté.
- Bickell, C. G., & Ruiz, C. (2009). Manual de recipientes a presión. McGraw-Hill.
- Brownell, L. E., & Young, E. H. (1959). Process equipment design: Vessel design. John Wiley & Sons.
- Çengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico (3rd ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Delgadillo Rendon, A. C. (2026). Diseño, modelado y análisis estructural de un tanque de aire comprimido bajo la norma asme sección viii división 1 utilizando el módulo workbench de ansys. <http://hdl.handle.net/11349/100439>
- García, B. T. (2021). Diseño, cálculo y simulación de un tanque de almacenamiento de fluido a alta presión.

- González Dorta, D. (2020). Diseño mecánico de recipientes a presión conforme al código ASME (Trabajo Fin de Grado). Universidad de La Laguna.
- Harvey, J. F. (1995). Theory and design of pressure vessels. Springer.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2014). Manufacturing engineering and technology. Pearson Education.
- Lanz, J., & Félix, M. (2016). Estudio de la modificación de un recipiente a presión esférico conforme al código ASME (Trabajo Fin de Grado). Universidad Politécnica de Valencia.
- Lafuente, M. P. (2016). Cálculo y diseño de recipiente a presión esférico para almacenamiento de G.L.P. bajo la norma ASME VIII Div. 1.
- MathWorks. (2024). MATLAB Documentation.  
[https://la.mathworks.com/help/matlab/index.html?s\\_tid=hc\\_panel](https://la.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=hc_panel)
- Vargas Olmedo, J. P., & Tortorella Rodríguez, L. S. (2025). Estudio y simulación de resistencia de un tanque sometido a presión interna.  
<https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/10907>