



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Optimización de la carga admisible a
tracción y la hermeticidad en el
diseño de una conexión roscada
API $3\frac{1}{2}$ NU a través de técnicas
metaheurísticas y
análisis de elementos finitos

David Leonardo Díaz León

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería
Bogotá, Colombia
2020

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA:

Optimización de la carga admisible a tracción y la hermeticidad en el diseño de una conexión roscada API 3 $\frac{1}{2}$ NU a través de técnicas metaheurísticas y análisis de elementos finitos

David Leonardo Díaz León
Ing. Mecánico

Trabajo Final presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de:

Magíster en Ingeniería Mecánica

Director:

PhD. María Alejandra Guzmán Pardo

Codirector:

PhD. Carlos Humberto Galeano Urueña

Bogotá, Colombia
Julio de 2020

Trabajo final aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de:

Magíster en ingeniería Mecánica.

David Leonardo Díaz León
Proponente

María Alejandra Guzmán Pardo
Director

Carlos Humberto Galeano Uruña
Codirector

Esta tesis esta dedicada a:

Mi mamá que con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido obtener los más grandes logros de mi vida.

Mi hermana Valentina por estar conmigo y enseñarme cada día a ser una mejor persona a través de las adversidades.

Mi abuela materna porque sus oraciones, consejos y palabras me han acompañado a lo largo de toda mi vida.

Mi familia y amigos por apoyarme en todo momento.

En memoria de mi abuelo materno, mi primer y más grande profesor, quien me enseñó el valor de la nobleza y me inculcó el deseo por el conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a mis dos directores de este trabajo final de maestría, la Dra. María Alejandra Guzmán y el Dr. Carlos Humberto Galeano, por el respaldo y apoyo brindado en este trabajo. Gracias por la paciencia, el conocimiento, la exigencia y la confianza a lo largo de mi maestría. El tiempo que dedicaron a resolver mis dudas fue de gran aporte en la culminación del presente trabajo.

Quiero agradecer también a la Universidad Nacional de Colombia, institución que ha sido mi alma máter desde mi pregrado y ahora en mi maestría, la cual ha exigido mis capacidades al máximo en mi desarrollo como profesional. Gracias por la oportunidad de convertirme en becario durante mi maestría y brindarme así el apoyo económico y la experiencia docente que me han ayudado a desenvolverme de una mejor manera en mis estudios.

Asimismo quiero agradecer a todos mis docentes de maestría, con especial agradecimiento de nuevo a la Dra. María Alejandra Guzmán quien fue la que acobijó y estructuró en primera instancia la propuesta del presente trabajo. También un especial agradecimiento a los docentes del grupo de modelado y métodos numéricos en ingeniería *Gnum*, los doctores Carlos Humberto Galeano, Carlos Alberto Duque y Diego Alexander Garzón, quienes a través de su conocimiento y enseñanzas me han inspirado a seguir mi formación una vez culminada la maestría.

Brindo un agradecimiento a mis amigos y colegas de la universidad, quienes me han ofrecido su apoyo incondicional, en especial a Diego Moreno con quien compartí gran parte de mi tiempo en la maestría y de quien recibí gran apoyo durante mi estancia como becario.

Gracias a mi familia, sin su apoyo no hubiera sido posible haber llegado hasta este punto.

A todos, muchas gracias.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	13
GLOSARIO	15
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS	19
1.2.1. General	19
1.2.2. Específicos	19
1.3. ALCANCE	20
1.4. DESARROLLO	20
2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.1. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS	21
2.2. TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS	25
3. MODELO DE LA CONEXIÓN ROSCADA	31
3.1. DESCRIPCIÓN	31
3.1.1. Geometría	32
3.1.2. Mejora del desempeño de la conexión estándar	33
4. RECURSOS Y METODOLOGÍA	35
5. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS	37
5.1. PREPROCESAMIENTO	37
5.1.1. Modelo de estudio	37
5.1.2. Definición de los elementos	39
5.1.3. Material	39
5.1.4. Discretización dimensional	42
5.1.5. Condiciones de frontera	43
5.2. SOLUCIÓN	44
5.2.1. Opciones de análisis	44
5.2.2. Etapas de procesamiento	45
5.3. POSPROCESAMIENTO	46
5.3.1. Métricas de carga admisible a tracción	46
5.3.2. Evaluación de Obj_1	47
5.3.3. Métricas de hermeticidad	48

CONTENIDO

5.3.4. Evaluación de Obj_2	48
5.3.5. Escritura de resultados	50
5.4. AJUSTE DEL MODELO	50
5.5. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA CONEXIÓN $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$	52
6. OPTIMIZACIÓN	53
6.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	53
6.2. TÉCNICAS	54
6.3. PARÁMETROS DEL ALGORITMO	55
6.4. OPERADORES GENÉTICOS	55
6.4.1. Selección	55
6.4.2. Cruce	55
6.4.3. Mutación	56
7. RESULTADOS	57
7.1. ANÁLISIS DE INDIVIDUOS NO DOMINADOS	59
7.1.1. Variables	59
7.1.2. Restricciones	60
7.1.3. Comparación con la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$	61
7.1.4. Geometría y estado de esfuerzos	63
7.2. DESEMPEÑO DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	65
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	69

LISTA DE FIGURAS

1.	Intensidad del esfuerzo producido por el ajuste de las superficies de contacto	23
2.	Geometrías de contacto alternativas en la zona de sello	23
3.	Diferencias en la malla del perfil de rosca simplificado	24
4.	Superficies analizadas en la penetración del fluido	24
5.	Dominancia en población de seis soluciones	26
6.	Diagrama de dispersión de individuos evaluados	27
7.	Diagrama de flujo de la optimización automática del diseño estructural de un vehículo	28
8.	Cálculo de hipervolumen	29
9.	Posiciones del componente <i>pin</i> respecto al componente <i>box</i>	31
10.	Perfil de rosca NU. TPI=10, P=2.54 mm, H=1.81 mm	32
11.	Dimensiones generales de conexión roscada NU. Posición de apriete a mano	32
12.	Implementación de características que mejoran el desempeño. Posición de apriete a mano	33
13.	Diagrama de flujo de la integración del software <i>FEM</i> y la técnica de optimización	36
14.	Perfil de rosca simplificado. Posición de apriete a mano	37
15.	Hilos de rosca omitidos	37
16.	Conexión roscada completa. Posición de apriete de potencia	38
17.	Geometría simplificada. Posición de apriete a mano	38
18.	Curvas esfuerzo-deformación	41
19.	Regiones de mallado	42
20.	Definición de elementos. Posición de apriete de potencia	42
21.	Mallado estructurado. Posición de apriete de potencia	42
22.	Interferencia inicial. Posición de apriete de potencia	43
23.	Condiciones de frontera tipo Dirichlet	43
24.	Condiciones de frontera tipo Neumann	44
25.	Diagrama de flujo de las etapas de procesamiento	45
26.	Evaluación de deformaciones en cada zona de análisis. Posición de apriete a mano	46
27.	Ejemplos de estados de deformaciones de conexiones que no fallan	46
28.	Ejemplo de estados de deformaciones de conexiones que fallan	47
29.	Evaluación de Obj_1	47
30.	Presión de contacto sobre la zona de sello	48
31.	Evaluación de Obj_2	49

LISTA DE FIGURAS

32.	Funciones objetivo con diferentes números de elementos de malla	50
33.	Estado de esfuerzos de von Mises	52
34.	Variabes geométricas en la tubería y el acople. Posición de apriete a mano	54
35.	Diagrama de dispersión Obj_1 vs Obj_2 de todos los individuos evaluados	57
36.	Diagrama de dispersión FF_1 vs FF_2 de resultados de cada una de las corridas	58
37.	Geometría usada en el modelo FEM	63
38.	Estado de esfuerzos de von Mises $F = Obj_1$ $P = P_{max}$	64
39.	Diagrama de dispersión Obj_1 vs Obj_2 , primeras 3 corridas de ambos algoritmos	65

LISTA DE TABLAS

1.	Aplicación de las conexiones API y Premium	18
2.	Dimensiones generales de conexión roscada $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$	32
3.	Propiedades mecánicas	40
4.	Material utilizado para el modelo	41
5.	Resultados del análisis de convergencia de malla	51
6.	Error relativo del análisis de convergencia de malla	51
7.	Variables geométricas de la optimización	53
8.	Parámetros geométricos	54
9.	Datos comparativos de acuerdo a la métrica de hipervolumen	58
10.	Variables y funciones objetivo del frente de individuos no dominados . .	59
11.	Variación de las variables y funciones objetivo en individuos no dominados	59
12.	Variación de las restricciones en individuos no dominados	61
13.	Valor de las variables y funciones objetivo en la junta $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$. .	62
14.	Diferencia entre resultados obtenidos y la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$	62

GLOSARIO

SIGLAS

<i>API</i>	American petroleum institute
<i>APDL</i>	ANSYS parametric design language
<i>FEM</i>	Finite element method
<i>NU</i>	Non upset
<i>SBX</i>	Simulated binary crossover
<i>TPI</i>	Threads per inch

SÍMBOLOS DE DIMENSIONES

<i>D</i>	Diámetro mayor de la tubería
<i>H</i>	Altura de hilo de rosca
<i>L₂</i>	Longitud efectiva de rosca
<i>NL</i>	Longitud del acople
<i>P</i>	Paso de rosca
<i>q</i>	Profundidad del receso del acople
<i>Q</i>	Diámetro del receso del acople
<i>t</i>	Espesor de tubería
<i>W</i>	Diámetro exterior del acople

SÍMBOLOS DE CARGAS

<i>CP</i>	Valor medio de la presión de contacto
<i>F</i>	Tracción
<i>P</i>	Presión normal

OTROS SÍMBOLOS

ϵ	Deformación
η	Índice de operador genético
σ	Esfuerzo
ν	Coefficiente de Poisson
\bar{a}	Valor medio de una variable <i>a</i>
<i>E</i>	Módulo de Young
<i>FF₁</i>	Función de aptitud asociada a la función objetivo 1
<i>FF₂</i>	Función de aptitud asociada a la función objetivo 2
<i>h</i>	Tamaño global de malla
<i>HVR</i>	Métrica de hipervolumen
<i>HVP</i>	Hipervolumen del Frente Óptimo de Pareto

GLOSARIO

<i>HVQ</i>	Hipervolumen de los individuos no dominados hallados
<i>k</i>	Generación
<i>n</i>	Número de variables de entrada
<i>Obj₁</i>	Función objetivo 1, carga máxima a tracción que soporta la junta
<i>Obj₂</i>	Función objetivo 2, presión interna máxima que soporta la junta sujeta a carga máxima a tracción
<i>p</i>	probabilidad
<i>S</i>	Desviación estándar
<i>t</i>	Tiempo
<i>x</i>	Individuo
<i>X</i>	Variable de entrada

SUBÍNDICES

<i>c</i>	Cruce
<i>e</i>	Ingenieril
<i>m</i>	Mutación
<i>n</i>	Etapas de carga arbitraria
<i>min</i>	Mínimo
<i>max</i>	Máximo
<i>real</i>	Real
<i>s</i>	Zona de sello
<i>SF</i>	Flancos frontales de rosca
<i>u</i>	Último
<i>y</i>	Fluencia

DEFINICIONES Y ABREVIACIONES

<i>Apriete a mano</i>	Posición de la conexión donde coinciden los conos de paso del <i>pin</i> y el <i>box</i> sin que exista precarga
<i>Apriete de potencia</i>	Posición en la cual la conexión está precargada
<i>Box</i>	Componente hembra de una conexión roscada
<i>et al.</i>	Expresión latina que se utiliza para indicar “y otros” colaboradores
<i>Pin</i>	Componente macho de una conexión roscada
<i>Premium</i>	Tipo de conexión roscada que no es definida bajo ningún estándar
<i>StandOff</i>	Avance medido en hilos de rosca desde la cara del acople hasta el punto de desvanecimiento de la rosca <i>pin</i>
<i>Taper</i>	Relación entre el cambio diametral y el avance axial
<i>Threads per inch</i>	Hilos de rosca por pulgada

1. INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Es un hecho que la mayor parte de recursos o fuentes energéticas utilizadas por el hombre son las provenientes de combustibles fósiles. Hoy en día, a causa de la naturaleza finita y a los daños ambientales derivados de la obtención de estos, se están adoptando e implementando nuevas políticas y tecnologías que reemplazarán en un futuro este tipo de fuentes de energía. Sin embargo, según proyecciones recientes de la producción de combustibles fósiles se estima que en el mejor escenario existirá aún una dependencia de estos hasta comienzos del siglo XXII [1].

Una de las grandes industrias que extrae estos combustibles fósiles en la actualidad es la industria *Oil & Gas*, la cual mediante maniobras de perforación, ya sea sobre tierra (*onshore*) o sobre el lecho marino (*offshore*), extrae el combustible. El procedimiento de extracción mencionado se sintetiza en las siguientes etapas:

1. Evaluación sísmica.
2. Preparación del terreno.
3. Perforación.
4. Completamiento.
5. Producción.
6. Restauración o cierre.

Una etapa de interés en particular es la etapa de completamiento (*completion*), la cual convierte la perforación de un pozo en un conducto de producción o inyección seguro y eficiente [2]. Debido a las operaciones realizadas esta etapa de instalación es categorizada, al igual que la etapa de producción, como una etapa de alto riesgo debido a que históricamente se han evidenciado muertes humanas y desastres ambientales (que en ocasiones se consideran irreparables) consecuentes de malos procedimientos, errores humanos, diseños defectuosos, entre otros. Dentro de las operaciones realizadas en esta etapa, una de las más importantes es la instalación de la tubería.

En general y debido a la extensión dimensional de las perforaciones, la instalación de la tubería se debe realizar por medio de sartas (acoples en serie). Los acoples de las sartas de tubería se pueden realizar a través de conexiones roscadas, conexiones soldadas, conexiones bridadas, entre otros métodos; siendo las conexiones roscadas el

mecanismo de acople más utilizado. La API es la asociación que rige los estándares en la industria *Oil & Gas*, incluidos los de las conexiones roscadas. Además de las conexiones roscadas estándar, existen las conexiones Premium, las cuales son todas aquellas conexiones roscadas que no están dentro de ningún estándar, y se caracterizan por ser conexiones patentadas y de alto desempeño y/o para aplicaciones especiales.

La Tabla 1 muestra la aplicación de las conexiones roscadas API y Premium. Allí se observa que las conexiones estándar API están limitadas en el tipo de aplicación, la profundidad del pozo (principalmente debida a la capacidad de carga a tracción) y la presión en el fondo del pozo (principalmente debida a la capacidad de sello).

Tabla 1. Aplicación de las conexiones API y Premium

Pozos de gas	Costa afuera	API	Conexiones Premium
	En tierra		
Pozos de petróleo			
Profundidades de pozo [km]		3.0	6.0
Presión de fondo [bar]		275	550

Fuente: elaboración propia con base en [3, Tab. 1]

Tenaris, ¹ una de las empresas más grandes en soluciones para conexiones de tuberías, explica en su folleto **la importancia de los tubos en la industria energética de hoy** [4] que “más del 90 % de las fallas en los tubos ocurren en la conexión, la cual ocupa apenas el 3 % del largo del tubo y representa entre el 10 % y 50 % de los costos de la tubería. Cualquier falla en la conexión es un problema grave en un contexto en el cual los costos de inversión en pozos son cada vez más altos”.

Desde que las capacidades y métodos en los sistemas de perforación en el sector de hidrocarburos han aumentado, las empresas nacionales han tenido que recurrir a diseños de componentes roscados Premium, debido a que las conexiones estándar no son adecuadas para ciertas condiciones de desempeño (ver Tabla 1). Parra Contreras en [5] muestra que para el 2016 existían en Colombia menos de 8 empresas formalmente constituidas en el mercado colombiano que prestan el servicio de manufactura de conexiones Premium, necesitando licencias de manufactura para la producción de estos componentes debido a la falta de diseños propios. Esto se sustenta en un estudio acerca de la prefactibilidad para la creación de una empresa de fabricación de conexiones API y Premium en tuberías de producción para el sector *Oil & Gas*.

¹Página oficial: <http://www.tenaris.com>

La necesidad de conseguir conexiones Premium es de interés no solo para empresas operadoras sino también para empresas metalmecánicas en el sector de hidrocarburos, el cual es un sector económicamente activo en Colombia. Dos puntos de mejora importantes que se han identificado, además de otros, y que diferencian una conexión API de una Premium son la máxima carga a tracción y la máxima presión interna que soporta la junta de manera hermética sin presentar falla mecánica. Una de las formas posibles de conseguir estas mejoras es a partir de la implementación de técnicas de optimización en conjunto con métodos adecuados que permitan simular el comportamiento mecánico de las juntas. Las principales ventajas de aplicar esta metodología conjunta son la posibilidad de abordar el problema tratado con menos recursos económicos (en comparación a los requeridos en diseños desarrollados a base de prueba y error) y así mismo la posibilidad de reducir los tiempos de diseño.

El mejoramiento de las conexiones API es una temática poco tratada por investigadores nacionales y su estudio en conjunto con la implementación de técnicas metaheurísticas no ha sido abordado en literatura científica nacional e internacional.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

Optimizar la carga admisible a tracción y la hermeticidad en el diseño de una conexión roscada $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$, aplicando técnicas metaheurísticas y análisis de elementos finitos.

1.2.2 Específicos

- Definir un modelo básico de unión roscada junto con los parámetros geométricos necesarios.
- Desarrollar y evaluar un modelo por elementos finitos que permita replicar el comportamiento mecánico relevante de la conexión roscada, teniendo una adecuada razón de exactitud y costo computacional.
- Implementar dos algoritmos de optimización metaheurísticos multiobjetivo que permitan el acople con el modelo de elementos finitos.
- Evaluar y comparar resultados obtenidos con las dos técnicas de optimización implementadas.

1.3 ALCANCE

El enfoque del presente trabajo se limita a la obtención de los valores geométricos nominales de conexiones roscadas, optimizados a partir de las características geométricas de la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$. El estudio de las métricas que definen el comportamiento mecánico de la conexión y el estudio de los métodos de optimización utilizados están más allá del alcance del presente documento. También está fuera del alcance el análisis cuantitativo de la relación entre las variables geométricas de las conexiones roscadas y el comportamiento mecánico de las mismas.

1.4 DESARROLLO

En el presente trabajo se optimiza la resistencia de carga a tracción y hermeticidad de una conexión roscada $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$, adaptando su geometría inicial y realizando cambios dimensionales de la conexión a través de una rutina de optimización con algoritmos metaheurísticos, evaluando el desempeño mediante el método de elementos finitos. El contenido del Trabajo final de Maestría se desarrolla de la siguiente manera:

- Capítulo 1: se hace una descripción del problema a tratar y su importancia en la industria, los objetivos propuestos en el trabajo presente, el alcance y la metodología de desarrollo.
- Capítulo 2: se realiza un marco conceptual referente al desarrollo del trabajo.
- Capítulo 3: se describe la geometría de la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$ y las características geométricas de forma que mejoran su desempeño.
- Capítulo 4: se describen las características y los criterios de selección de los programas computacionales utilizados, la metodología de acople entre ellos y la descripción de los recursos físicos utilizados.
- Capítulo 5: se describen las etapas del análisis por elementos finitos de la conexión roscada, el preprocesamiento, procesamiento, posprocesamiento y el análisis de convergencia del modelo en base a las funciones objetivo definidas.
- Capítulo 6: se describe el problema de optimización, las técnicas usadas y los parámetros de los algoritmos implementados.
- Capítulo 7: se muestran los resultados obtenidos con cada técnica de optimización y se realiza un análisis cualitativo de los mismos.
- Capítulo 8: se plantean las conclusiones y se discuten recomendaciones y puntos de mejora en implementaciones futuras del trabajo realizado.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

A mediados de la década de los ochenta varios autores habían comenzado ya a investigar el desarrollo de conexiones roscadas Premium a partir de conexiones estándar API. Hirano *et al.* en [6] describen el desarrollo de una conexión roscada Premium “FOX” basándose en la implementación de la geometría del diente de rosca API Buttress y un sello metal-metal. El diseño de la conexión roscada fue desarrollado con base en el análisis de elementos finitos en el software MARC. El análisis realizado fue asumiendo un problema no lineal de un elemento mecánico con comportamiento elasto-plástico.

Assanelli y Dvorkin en [7] modelan el comportamiento de diferentes tipos de conexiones de tubería a través del método de los elementos finitos y del software ADINA. Conforme al estudio determinaron que existen tres aspectos a mejorar en el comportamiento de las conexiones estándar:

1. La distribución de carga implementando un perfil de rosca tipo Buttress.
2. La capacidad de sello añadiendo una zona de sello metal-metal.
3. La limitación del torque añadiendo un hombro de carga.

Macdonald y Deans en [8] realizan un análisis de esfuerzos en una conexión para tubería de perforación usando el método de los elementos finitos con una representación bidimensional del modelo. En el estudio concluyen que:

- Los esfuerzos máximos se observan en los puntos de barrido de los perfiles de rosca.
- El modelo bidimensional da una buena aproximación del comportamiento mecánico de la conexión.
- En un modelo bidimensional no es posible estudiar el efecto de los concentradores de esfuerzo debidos a la hélice y el desvanecimiento de la rosca.

Váradi y Elinger en [9] realizan la optimización de forma de la rosca de una tapa plástica mediante un modelo bidimensional y el método de los elementos finitos. Concluyen que el modelo bidimensional da una buena aproximación del comportamiento mecánico del componente y que además para problemas de optimización es adecuado una simplificación del modelo real debido al costo computacional del análisis.

Chen y Chin en [10] comparan la distribución de carga de tres conexiones roscadas con

el mismo tamaño nominal y diferente paso: 1-8UNC, 1-12UNF y 1-16UNF, mediante tres métodos diferentes. El primer método usado es el modelo matemático de Yamamoto [11], el segundo mediante el método de elementos finitos en un modelo bidimensional y el tercero mediante el método de elementos finitos en un modelo tridimensional. Finalmente llegaron a las siguientes conclusiones:

- La distribución de carga sobre el primer hilo mejora significativamente conforme el paso de la rosca disminuye.
- El efecto del coeficiente de fricción sobre la distribución de carga no es evidente.
- La desviación de la distribución de carga sobre los hilos de rosca entre los 3 métodos empleados no supera el 12%.

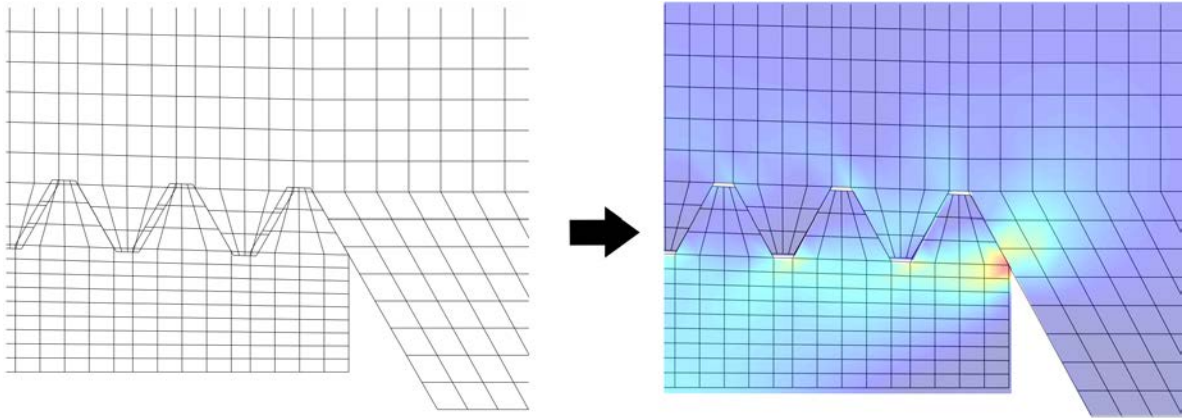
Guangjie *et al.* en [12] estudian otros factores que afectan o son significativos en el análisis mecánico de conexiones roscadas a través del método de elementos finitos, mediante un análisis numérico y experimental de la distribución de temperatura y esfuerzos en una conexión roscada API round. El análisis numérico fue desarrollado mediante el método de elementos finitos y el software MARC, en un análisis no lineal de un modelo bidimensional. Los parámetros de la geometría fueron obtenidos de las normas API 5B y API 5CT. En el estudio determinaron las principales no linealidades que se deben tener en cuenta en un modelo de elementos finitos de una conexión roscada:

- Los contactos debidos al deslizamiento entre las superficies de los hilos de rosca.
- La plasticidad del material.
- Las grandes deformaciones presentes.

Van Wittenbergue *et al.* en [13] estudian el comportamiento a fatiga de una conexión roscada de tubería. Se centran en la influencia de los concentradores de esfuerzo en la vida a fatiga de la conexión y justifican el estudio de esos componentes argumentando que generalmente son los puntos más débiles de las sartas de tubería y por eso requieren el uso de diseños mejores a los estándar. Simplifican el estudio en un modelo bidimensional axisimétrico, donde modelan la etapa de precarga en dos pasos:

1. Se realiza un traslape inicial de las geometrías de la rosca hembra y la rosca macho, correspondiente al número de vueltas del apriete de potencia (*Standoff*).
2. Se realiza la contracción en los hilos de la rosca hembra y macho hasta que no haya interferencia entre las superficies de contacto (ver Fig. 1).

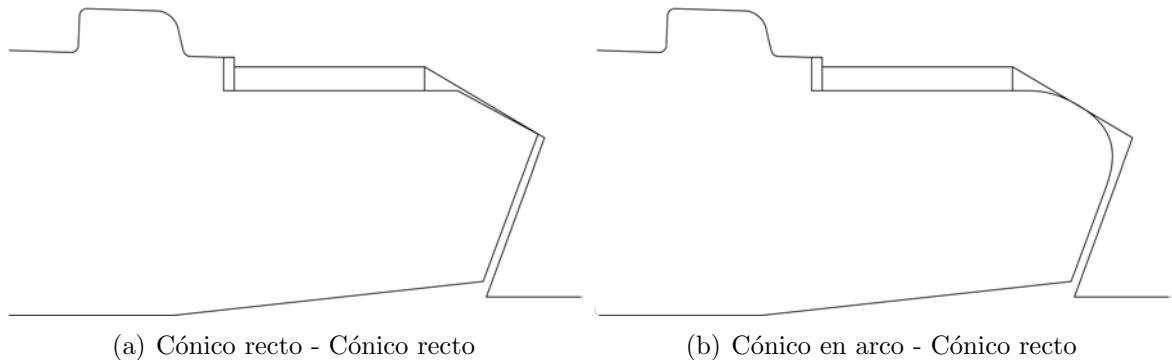
Figura 1. Intensidad del esfuerzo producido por el ajuste de las superficies de contacto



Fuente: elaboración propia

Cui *et al.* en [14] describieron el diseño y análisis de dos conexiones Premium a través del método de elementos finitos utilizando modelos tridimensionales para establecer los esfuerzos en el proceso de precarga. Realizaron un análisis estático no lineal utilizando ANSYS Workbench y posteriormente realizaron un análisis comparativo entre dos geometrías diferentes en la zona de sello (ver Fig. 2). Determinaron que la geometría en la zona de sello definida por contactos cónicos rectos, a pesar de permitir una menor deformación en la precarga, presenta un mejor comportamiento mecánico a gran escala en la zona de sello que la geometría definida por un contacto cónico en arco y línea recta.

Figura 2. Geometrías de contacto alternativas en la zona de sello

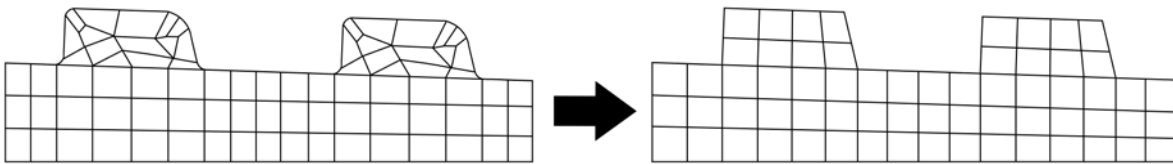


Fuente: elaboración propia con base en [14, Fig. 7]

Rangel *et al.* en [15] evaluaron las conexiones para tubería de revestimiento API y realizaron una mejora en la distribución de esfuerzos de la conexión *API Buttress* mediante un estudio paramétrico y análisis por elementos finitos. Identifican una característica importante presente cuando se presentan cargas axiales tensoras, y es la tendencia a la separación de los hilos de rosca y por tanto la tendencia a generar fugas al no implementar zonas de sello independientes a las superficies de contacto en los hilos de la rosca.

En dos trabajos similares Ahsan en [16] y Yan en [17] proponen simular una conexión tubular Premium con un modelo paramétrico tridimensional usando el método de los elementos finitos. En ambos trabajos el modelo realiza una representación completa de la forma helicoidal de la rosca tubular. En el modelo físico se simplifican los redondeos del perfil de la rosca obteniendo facilidades en la generación de la geometría y el mallado sin perder mucha precisión (ver Fig. 3).

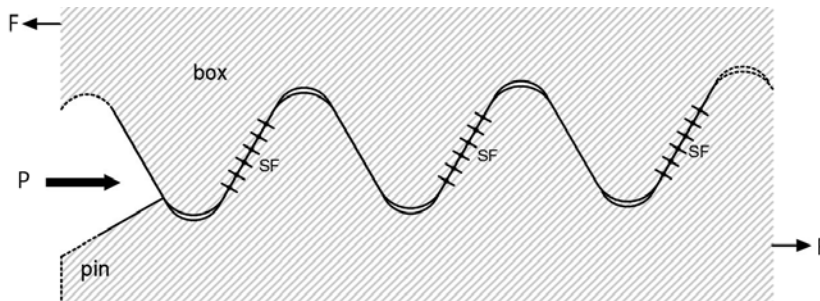
Figura 3. Diferencias en la malla del perfil de rosca simplificado



Fuente: elaboración propia con base en [16, Fig. 3-37]

En un reciente estudio Uribe *et al.* en [18] estudian la hermeticidad de una conexión estándar API y sugieren que el valor medio de las presiones de contacto en los flancos frontales de la rosca es un buen parámetro para definir la hermeticidad de la misma. En el estudio se utiliza como criterio que la conexión presentará fuga si $CP_{SF} \leq P$, siendo CP_{SF} el valor medio de presión de contacto en los flancos frontales de rosca y P la presión del fluido (ver Fig. 4).

Figura 4. Superficies analizadas en la penetración del fluido



Fuente: adaptación con base en [18, Fig. 4]

2.2 TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS

Las técnicas metaheurísticas de optimización, al igual que las heurísticas, son técnicas de optimización desarrolladas mediante algoritmos de aproximación. Son utilizadas con el propósito de poder encontrar una suficientemente “buena” solución a problemas complejos en un tiempo razonable. La principal diferencia entre las metaheurísticas y heurísticas es que estas últimas son más dependientes del problema aplicado mientras las metaheurísticas son algoritmos más genéricos que pueden ser aplicados a casi cualquier problema de optimización [19, Sec. 10.1].

Las técnicas metaheurísticas pueden ser clasificadas de acuerdo con los principios en los cuales están basadas. La mayoría de estas técnicas son basadas en principios biológicos, dentro de los cuales se pueden enumerar tres principales paradigmas: evolución, enjambre y sistemas inmunes. Dentro del paradigma evolutivo se destacan los algoritmos genéticos de optimización, los cuales al ser algoritmos evolutivos mantienen el principio de la “supervivencia del más apto” y emulan los cromosomas en el proceso de evolución a partir de operadores de selección, cruce y mutación [19, Sec. 10.3.1.1] .

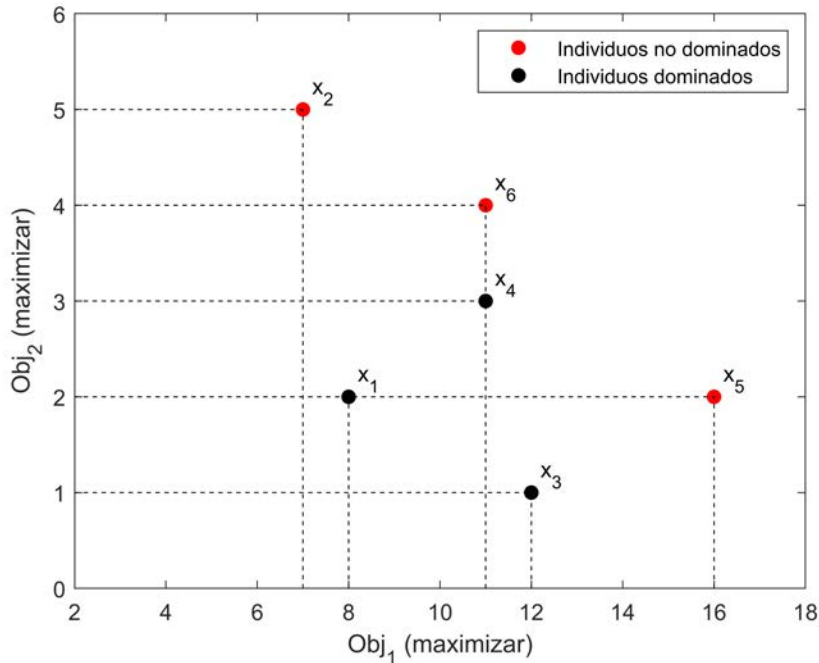
En problemas reales donde se tienen múltiples objetivos que entran en conflicto, las técnicas metaheurísticas de optimización de un solo objetivo pueden ser inadecuadas. Es de ahí la aparición de técnicas de optimización multiobjetivo las cuales en vez de obtener una única mejor solución, juntan un grupo de soluciones en un frente de Pareto. La mayoría de estas técnicas usan el concepto de dominancia, donde varias soluciones son comparadas entre sí para determinar si una domina o no a la otra (ver Fig. 5). Se dirá que una solución x_i domina a otra solución x_j , si se cumplen las siguientes condiciones [20, Sec. 2.4.2]:

1. La solución x_i no es peor que la solución x_j en todos los objetivos.
2. La solución x_i es mejor que la solución x_j en al menos un objetivo.

Entre los algoritmos de optimización metaheurísticos multiobjetivo más utilizados se encuentran el NSGAIII propuesto por Deb *et al.* en [21] y el SPEA2 propuesto por Zitzler *et al.* en [22]. Ambos caen dentro de la categoría de algoritmos genéticos multiobjetivo basados en el criterio de dominancia de Pareto. Una importante característica de ellos en contraste a sus predecesores es que introducen el concepto de elitismo en sus propuestas, especificando que los individuos en cada generación se generan a partir de los individuos más aptos. Las principales diferencias entre los dos algoritmos se observan en:

- La actualización de la población elitista.
- La evaluación de la aptitud en el conjunto élite y la población.
- La estrategia de reproducción de los individuos del conjunto de élite.

Figura 5. Dominancia en población de seis soluciones



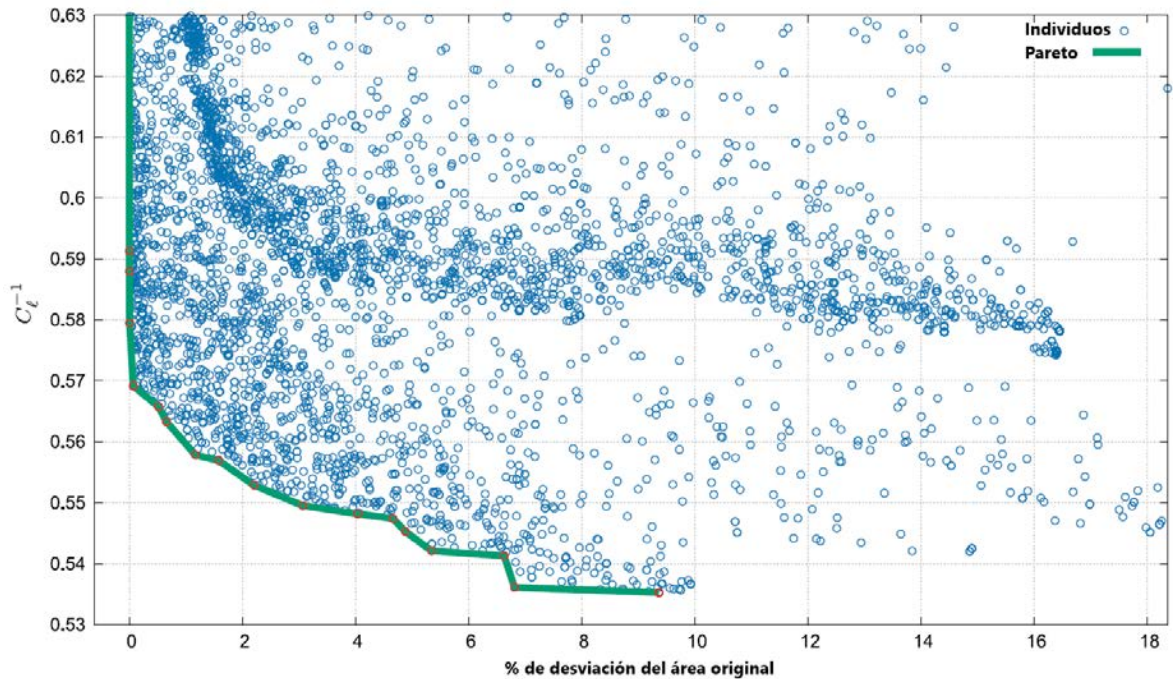
Fuente: elaboración propia con base en [20, Fig. 14]

En complemento a sus propuestas de algoritmos de optimización, Deb en [23, 24] publicó ciertas estrategias para la implementación de operadores genéticos en el tratamiento de variables continuas y discretas restringidas a límites. Los dos operadores que propone son el SBX (cruce binario simulado) y un operador de mutación polinómico. La principal ventaja en la implementación de los operadores propuestos es la posibilidad de controlar que los resultados de los operadores estén dentro de los límites de las variables de entrada, además de la posibilidad de controlar el índice de distribución de cruce (η_c) y el índice de perturbación de mutación (η_m). Un valor pequeño en η_c permite cromosomas hijo muy alejados de los cromosomas padre. Deb describe que un valor moderado en η_c (2 a 5) concuerda cercanamente a resultados obtenidos en algoritmos genéticos que utilizan el cruce binario de punto simple y un valor de η_m define el porcentaje de perturbación de la mutación como $1/\eta_m$.

Al ser la optimización metaheurística multiobjetivo una técnica que maneja una gran cantidad de información, es pertinente representar los resultados de una manera adecuada. Una de las estrategias de representación gráfica de resultados es a través de un gráfico de dispersión [20, Sec. 8.1.1]. Un ejemplo claro se muestra en el estudio de Kostas *et al.* [25], donde desarrollan la optimización de forma de una hidroala bidimensional usando análisis isogeométrico y el método de elementos de frontera. Utilizan una variante del algoritmo genético original *NSGAI* para maximizar el coeficiente de

sustentación de la hidroala minimizando la variación del área del perfil original. Los resultados obtenidos fueron publicados a través de un diagrama de dispersión que muestra el valor de las funciones objetivo de los individuos evaluados y el frente de Pareto de los individuos no dominados (ver Fig. 6). Para este caso los autores muestran el eje vertical como el inverso del coeficiente de sustentación con el propósito de mostrar los individuos no dominados en un frente de Pareto de dos funciones objetivo a minimizar.

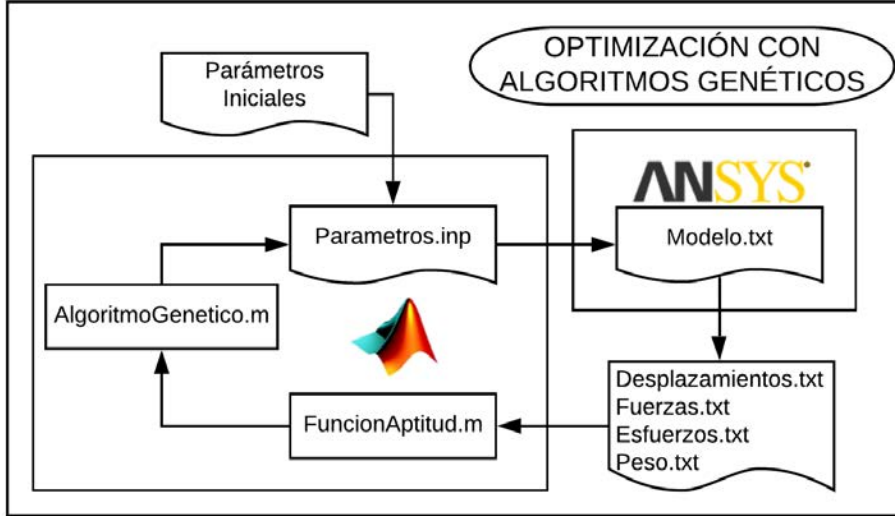
Figura 6. Diagrama de dispersión de individuos evaluados



Fuente: adaptación con base en [25, Fig. 10]

Otra de las ventajas no mencionadas de los algoritmos metaheurísticos de optimización es la posibilidad de abordar problemas donde la evaluación de los objetivos es tan compleja que se debe realizar mediante métodos especiales. Un ejemplo de estos casos es el diseño estructural estudiado por Gauchía *et al.* en [26], donde se involucran muchas variables de entrada y la evaluación de los objetivos se debe realizar mediante el método de los elementos finitos. En el estudio realizan la integración de una técnica de optimización mediante algoritmos genéticos y el método de elementos finitos para optimizar el diseño de la estructura de un vehículo. La integración fue desarrollada a través de ANSYS APDL y MATLAB. Propusieron una metodología en la cual la optimización se desarrollaba automáticamente sin requerir intervención del usuario hasta que se hallen los resultados (ver Fig. 7). Resaltan que la metodología usada resultó ser una herramienta exitosa para el análisis estructural de estudio.

Figura 7. Diagrama de flujo de la optimización automática del diseño estructural de un vehículo



Fuente: elaboración propia con base en [26, Fig. 2]

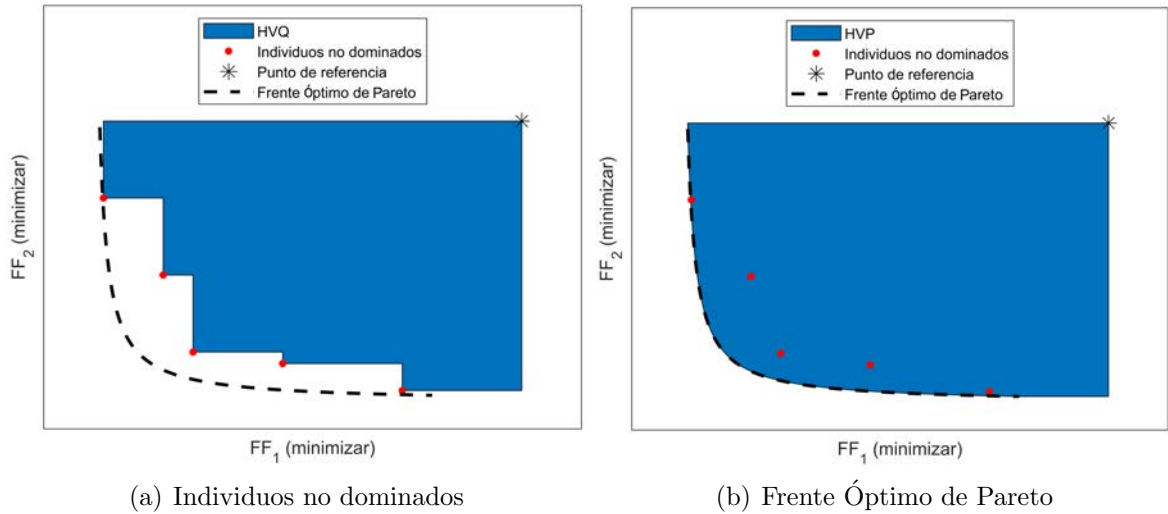
A pesar de ser algoritmos bien adaptados a muchos problemas, los algoritmos metaheurísticos de optimización resultan en la práctica ser dependientes del problema a tratar. No es posible asegurar que un algoritmo es mejor que otro en un problema en específico si no se realiza un estudio previo del desempeño de los mismos. El desempeño de los algoritmos de optimización suele evaluarse conforme a dos criterios: la cercanía de las soluciones no dominadas obtenidas al conjunto de soluciones “óptimas” y la diversidad del conjunto de soluciones [20, Sec. 8.2]. Una de las métricas que permite evaluar tanto proximidad como diversidad es la métrica de hipervolumen. Esta métrica calcula el “volumen” cubierto por los individuos no dominados obtenidos en relación con los individuos del Frente Óptimo de Pareto en problemas donde todos los objetivos deben ser minimizados [20, Sec. 8.2.3] (ver Fig. 8). El “volumen” calculado se construye a partir de un punto de referencia que puede ser derivado de la peor solución posible. La métrica de hipervolumen (HVR) será definida como:

$$HVR = \frac{HVQ}{HVP} \quad (2.1)$$

donde:

HVP es el “volumen” cubierto por el Frente Óptimo de Pareto
 HVQ es el “volumen” cubierto por los individuos no dominados

Figura 8. Cálculo de hipervolumen



Fuente: elaboración propia con base en [20, Fig. 191]

El valor de la métrica es dependiente tanto del punto de referencia utilizado como de la escala de las funciones objetivo. Para eliminar el problema de la escala es posible normalizar los valores de las funciones objetivo. Esta normalización también se hace pertinente en la implementación de las técnicas de optimización debido a que influye en el operador de selección cuando se evalúa el parámetro de densidad asociado al algoritmo. Para el presente estudio se normaliza cada una de las funciones objetivo Obj_i en funciones de aptitud FF_i donde $i = 1, 2$.

3. MODELO DE LA CONEXIÓN ROSCADA

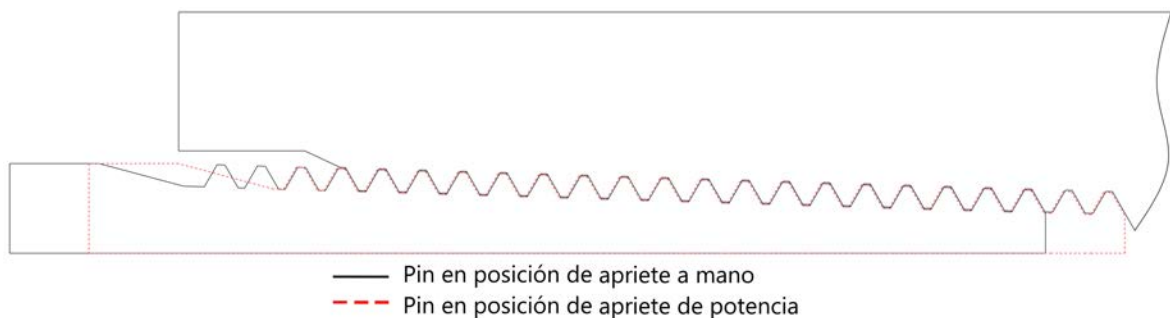
3.1 DESCRIPCIÓN

La conexión *API 3 $\frac{1}{2}$ NU* es una conexión roscada tipo acople usada en tubería de producción y definida bajo el estándar API 5B [27]. El número $3\frac{1}{2}$ define el tamaño nominal de la tubería y las siglas “NU” definen que es para tubería manufacturada sin resaltes. La selección del material utilizado en la manufactura de la tubería está definido por el estándar API 5CT [28] y puede tener diferentes calibres lo cual influye en el comportamiento mecánico de la conexión.

En la instalación de la conexión es importante identificar dos posiciones del componente macho *pin* respecto al componente hembra *box* (ver Fig. 9):

1. Posición de apriete a mano: posición de la conexión donde coinciden los conos de paso del *pin* y el *box*. Al ser una conexión cónica cualquier avance axial a partir de esta posición generará una deformación de la junta.
2. Posición de apriete de potencia: posición en la cual la conexión está precargada para uso en operación. Es la posición en la cual la junta está diseñada para soportar cargas y dar sello.

Figura 9. Posiciones del componente *pin* respecto al componente *box*



Fuente: elaboración propia

3.1.1 Geometría

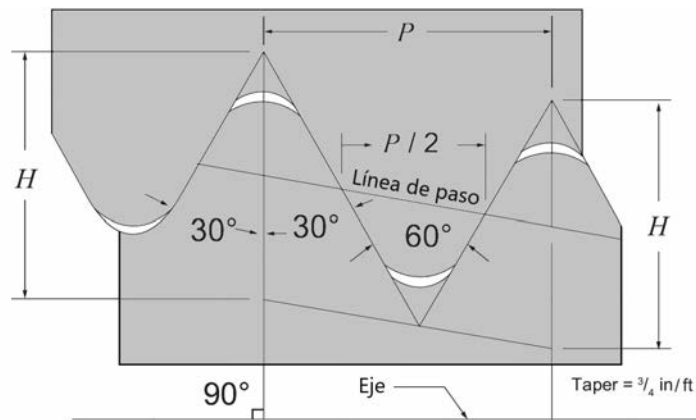
Las dimensiones necesarias para la definición de la geometría de la junta están especificadas en la normas API 5B y API 5CT. Para una tubería de 9.2 lb/ft se define la geometría de la junta de acuerdo al perfil de rosca (ver Fig. 10) y las dimensiones generales del cuerpo (ver Fig. 11) con base a los datos de la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones generales de conexión roscada $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$

D (in)	TPI (hilos/in)	L_2 (in)	Q (in)	q (in)	A (hilos)	t_{max} (mm)	t_{min} (mm)	W (mm)	NL_{min} (mm)
3,500	10	2,144	3,563	5/16	2	6,45	5,64	107,95	142,88

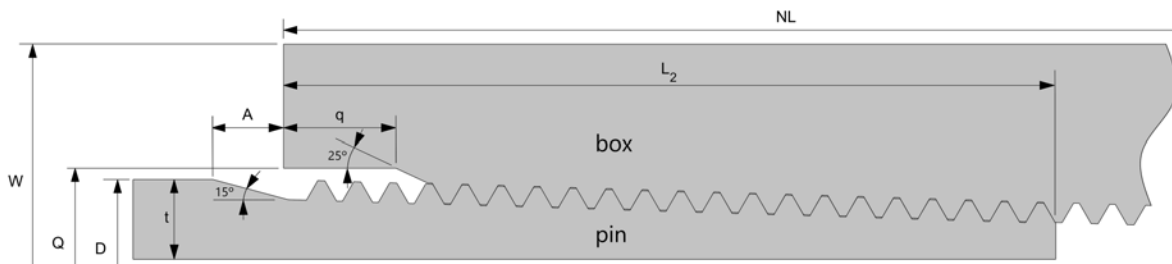
Fuente: elaboración propia con base en [27,28]

Figura 10. Perfil de rosca NU. TPI=10, P=2.54 mm, H=1.81 mm



Fuente: adaptación con base en [27, Fig. 11]

Figura 11. Dimensiones generales de conexión roscada NU. Posición de apriete a mano

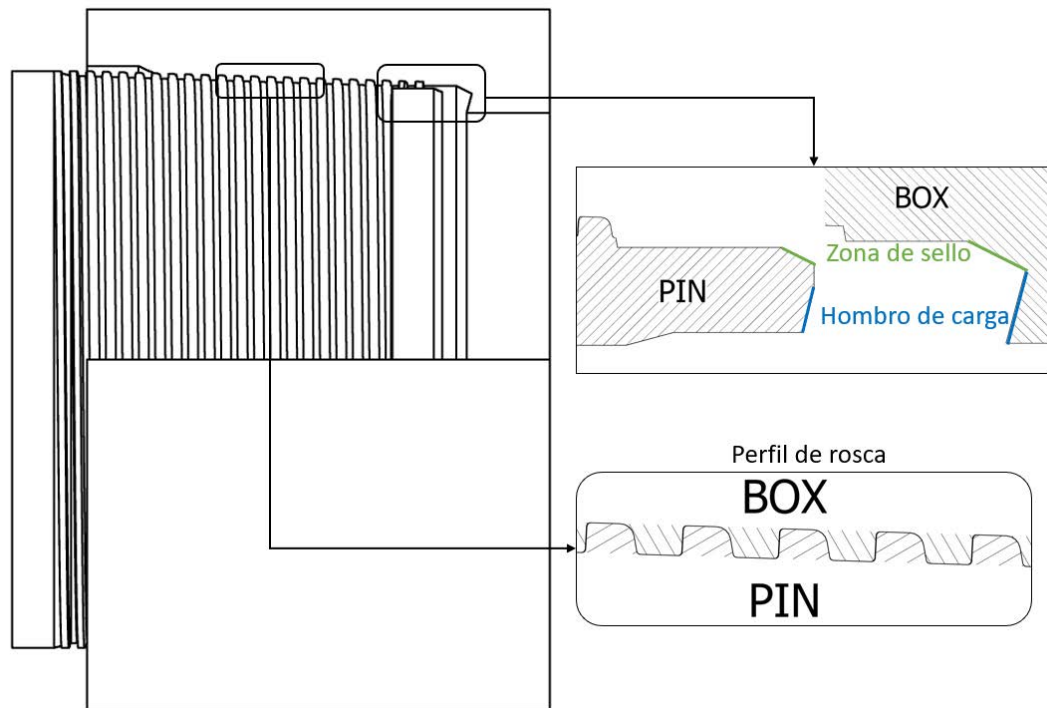


Fuente: elaboración propia con base en [27, Fig. 8]

3.1.2 Mejora del desempeño de la conexión estándar

Para mejorar el desempeño de la conexión se pueden implementar cambios en las dimensiones geométricas (incluyendo dimensiones del perfil de rosca) un hombro de carga y una zona de sello de contacto cónico recto (ver Fig. 12). El cambio de estos aspectos de mejora convierten la definición de la junta de conexión estándar a conexión Premium.

Figura 12. Implementación de características que mejoran el desempeño. Posición de apriete a mano



Fuente: elaboración propia

4. RECURSOS Y METODOLOGÍA

Para la optimización de la rosca $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$ dos software son escogidos con el propósito de desarrollar la implementación conjunta de las técnicas metaheurísticas y el análisis de elementos finitos, MATLAB y ANSYS APDL versión estudiantil.

MATLAB se selecciona por ser un software de cómputo numérico que ofrece la posibilidad de desarrollar las siguientes tareas:

- Generación de la geometría de la conexión roscada.
- Escritura del código de elementos finitos.
- Ejecución del comando que permita la ejecución en segundo plano del modelo *FEM*.
- Lectura de los archivos de salida del software de elementos finitos.
- Implementación del algoritmo metaheurístico de optimización.

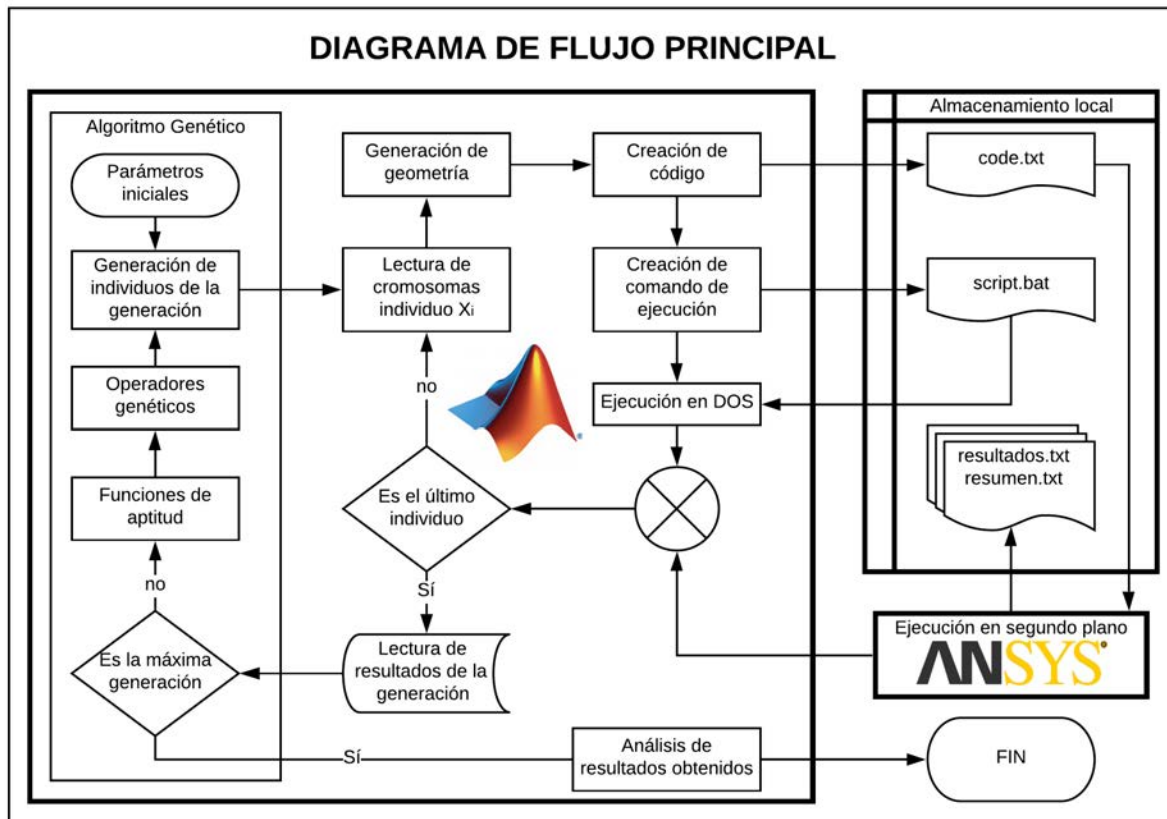
ANSYS APDL se selecciona por ser un software de elementos finitos capaz de evaluar el modelo deseado sin necesidad de una interfaz de usuario, sino a través de códigos o líneas de comandos. Esto permite la parametrización de la escritura del código. La Fig. 13 muestra la metodología en conjunto adoptada para la implementación del modelo *FEM* con la técnica de optimización metaheurística. Una de las limitantes en el uso de ANSYS APDL versión estudiantil es la limitación del número de nodos y elementos en el mallado. Modelos con mallas que superen los 32000 nodos o elementos no son posibles de realizar en este estudio.

La descripción general del equipo de cómputo y software utilizado es:

1. Sistema operativo Windows 10 pro 64 bits.
2. Procesador Intel core i7-9700k, 8 núcleos físicos con frecuencia máxima de procesamiento de 4.9 GHz.
3. Almacenamiento en disco duro de estado sólido M.2, tasa de escritura/lectura de 3500/3300 MB/s.
4. Memoria RAM física DIMM DDR4 de 32 GB a 3200 MHz.
5. MATLAB R2019b, licencia para uso académico otorgada a través de la Universidad Nacional de Colombia.
6. ANSYS APDL 2019 R3, licencia estudiantil otorgada de manera gratuita por parte del desarrollador del software.

CAPÍTULO 4. RECURSOS Y METODOLOGÍA

Figura 13. Diagrama de flujo de la integración del software *FEM* y la técnica de optimización



Fuente: elaboración propia

5. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

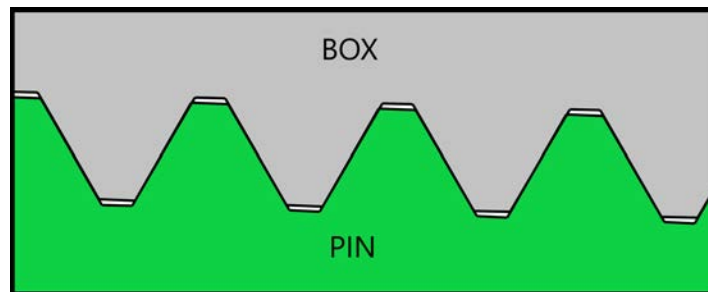
5.1 PREPROCESAMIENTO

5.1.1 Modelo de estudio

Se opta por un modelo bidimensional axisimétrico con las modificaciones definidas en la geometría de la Fig. 12 y teniendo en cuenta las siguientes simplificaciones:

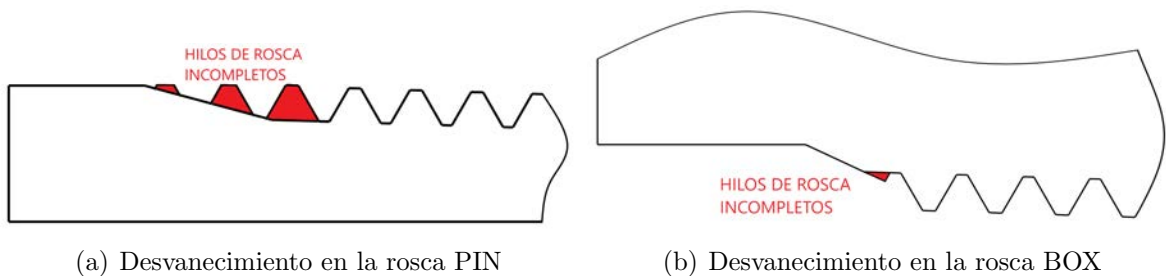
- Los redondeos definidos en el perfil de rosca requieren un mayor refinamiento en la discretización dimensional debido a que son superficies curvas. Se simplifican de manera que el perfil de rosca pueda ser definido mediante líneas rectas (ver Fig. 14).

Figura 14. Perfil de rosca simplificado. Posición de apriete a mano



Fuente: elaboración propia

Figura 15. Hilos de rosca omitidos



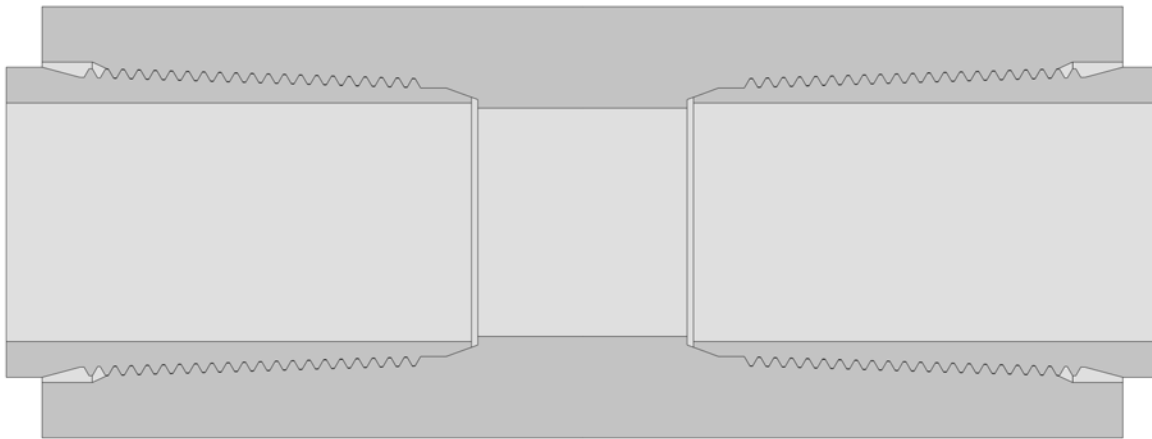
(a) Desvanecimiento en la rosca PIN

(b) Desvanecimiento en la rosca BOX

Fuente: elaboración propia

- En los desvanecimientos se generan geometrías teniendo en cuenta únicamente hilos de rosca completos (ver Fig. 15) con el propósito de no generar problemas en el mallado de la geometría.
- Se evaluará la mitad de la geometría de la conexión debido a que posee simetría axial (ver Fig. 16). El modelo simplificado estará en su totalidad definido mediante líneas rectas como se muestra en la Fig. 17.

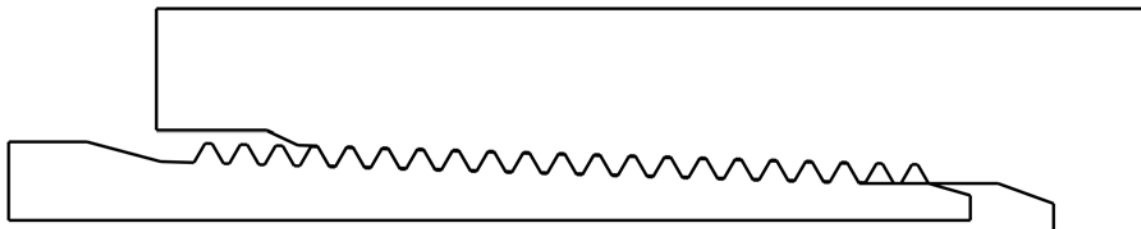
Figura 16. Conexión roscada completa. Posición de apriete de potencia



Fuente: elaboración propia

- Se tendrá en cuenta el efecto de la zona de sello asumiendo que el hombro de carga no actuará (ver Fig. 12 y Fig. 17).

Figura 17. Geometría simplificada. Posición de apriete a mano



Fuente: elaboración propia

5.1.2 Definición de los elementos

La selección de los elementos que componen la malla tienen una gran influencia en los tiempos de cómputo y la precisión de los resultados. Se seleccionan 3 tipos de elementos con diferentes propósitos de acuerdo a sus características [29, Sec. 4.4]:

1. PLANE183: es un elemento bidimensional de alto orden de 8 y 6 nodos. Es adecuado para modelos con mallas irregulares, posee dos grados de libertad en cada nodo (U_x y U_y). Puede ser utilizado en problemas axisimétricos con plasticidad y grandes deformaciones.
2. CONTA172: es un elemento unidimensional usado para representar contacto y deslizamiento entre dos superficies. Consta de 3 nodos y puede ser utilizado junto con el elemento TARGE169 para generar un par de contacto, ajustar las superficies del par de contacto y obtener las presiones de contacto del mismo.
3. TARGE169: es un elemento unidimensional que representa las superficies de contacto en forma de parábola asociadas al elemento CONTA172. Al igual que el elemento CONTA172 consta de 3 nodos.

5.1.3 Material

Es vital contar con datos precisos del material para realizar la validación de los modelos FEM. Debido a que el modelo estará sujeto a cargas más allá del límite elástico es necesario utilizar un modelo adecuado al comportamiento no lineal de los esfuerzos y deformaciones. ANSYS provee una familia de modelos para materiales de comportamiento no lineal; en particular el modelo de endurecimiento isotrópico puede modelar el comportamiento de los materiales bajo carga monotónica y descarga elástica [29, Sec. 5.3]. Dentro de la familia de modelos de endurecimiento isotrópico está el modelo *Multilinear Isotropic Hardening* que permite describir el comportamiento no lineal del material mediante una serie de puntos.

Los puntos necesarios para generar el modelo del material se pueden obtener mediante la ecuación de Ramberg-Osgood [30] (ver Ec. 5.1) y la norma API 5CT (ver Tabla 3).

$$\epsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (5.1)$$

donde:

σ es la tensión

ϵ es la deformación

E es el módulo de Young

α y n son constantes que dependen del material.

Tabla 3. Propiedades mecánicas

Grado	E (MPa)	ϵ_y (%)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
L80	207 000	0,5	552	655	20

Fuente: elaboración propia con base en [28, Tab. C.6]

De la Ec. 5.1 con los datos de la Tabla 3 se tiene:

$$\begin{aligned} \epsilon(552) = 0,005 &= \frac{552}{207000} + \alpha \left(\frac{552}{207000} \right)^n \\ \epsilon(655) = 0,2 &= \frac{655}{207000} + \alpha \left(\frac{655}{207000} \right)^n \end{aligned} \quad (5.2)$$

Solucionando para α y n :

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,875 \\ n &= 24,923 \end{aligned}$$

ANSYS requiere datos de deformación y tensión convertidos a valores de deformación y tensión reales. Las siguientes ecuaciones se utilizan para calcular la deformación real y la tensión real:

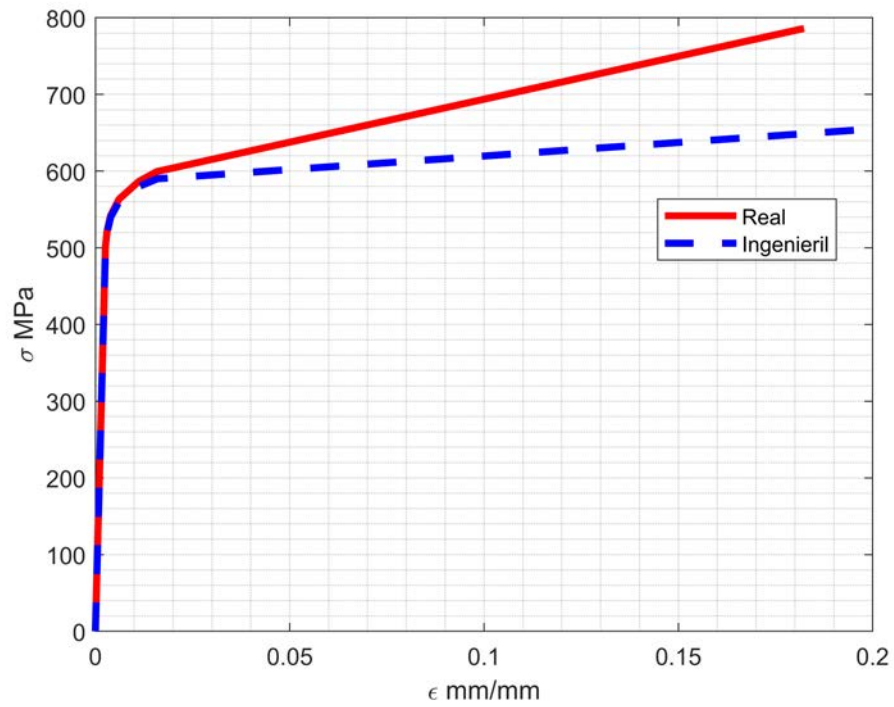
$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \ln(1 + \epsilon_e) \\ \sigma_r &= \sigma_e(1 + \epsilon_e) \end{aligned} \quad (5.3)$$

donde:

σ_r es la tensión real
 σ_e es la tensión ingenieril
 ϵ_r es la deformación real
 ϵ_e es la deformación ingenieril

Usando este modelo se deben vigilar de cerca los resultados durante el análisis para asegurar que los valores de esfuerzo permanezcan dentro de los límites proporcionados. En la Fig. 18 se muestran los gráficos de esfuerzo-deformación real e ingenieril. Los valores tomados para el modelo del material real se enumeran en la Tabla 4.

Figura 18. Curvas esfuerzo-deformación



Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Material utilizado para el modelo

Propiedades elásticas	E (MPa)	ν (mm/mm)
	207000	0.3
Propiedades plásticas	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
	0	0
	0,00259161	501,29749
	0,003003752	521,5643
	0,00392088	542,12143
	0,006075012	563,41236
	0,011154051	586,50556
	0,015830665	599,41441
0,182321557	786	

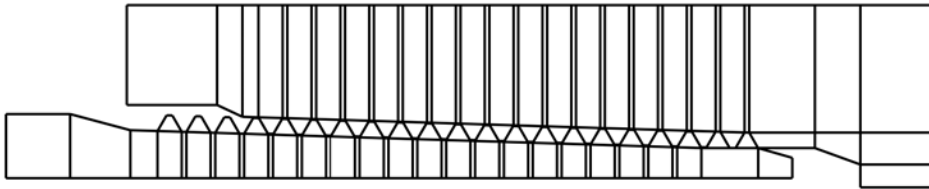
Fuente: elaboración propia

5.1.4 Discretización dimensional

Técnica de mallado

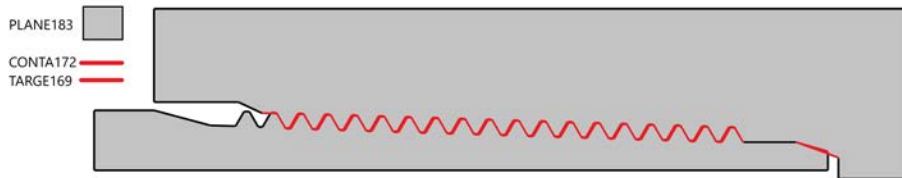
Se divide la geometría de manera que todas las regiones de malla sean cuadrilaterales con el propósito de realizar un mallado estructurado (ver Fig. 19 y Fig. 21). El elemento PLANE183 se implementa en la geometría interna utilizando solo elementos cuadriláteros, mientras que los elementos CONTA172 y TARGE169 son implementados en las posibles superficies de contacto como un par de contacto (ver Fig. 20). Una vez esté en posición de apriete de potencia tendrá superposición de elementos en las superficies de contacto (ver Fig. 22).

Figura 19. Regiones de mallado. Posición de apriete a mano



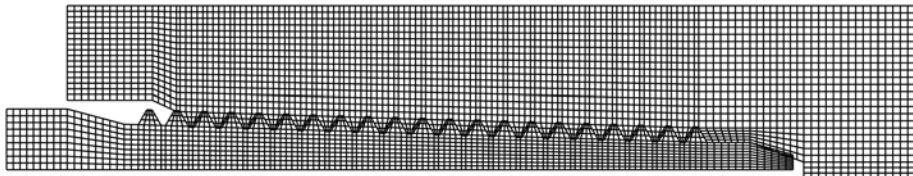
Fuente: elaboración propia

Figura 20. Definición de elementos. Posición de apriete de potencia



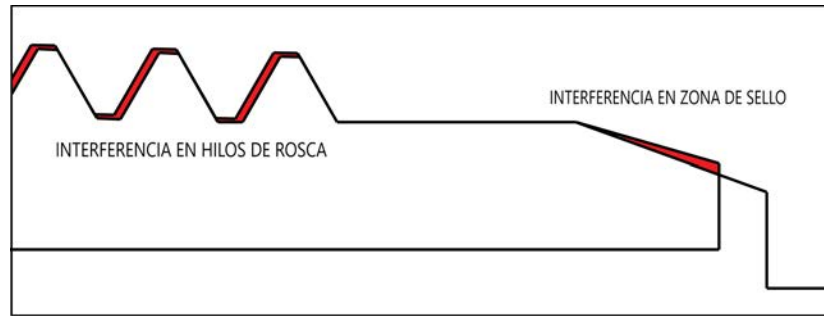
Fuente: elaboración propia

Figura 21. Mallado estructurado. Posición de apriete de potencia



Fuente: elaboración propia

Figura 22. Interferencia inicial. Posición de apriete de potencia



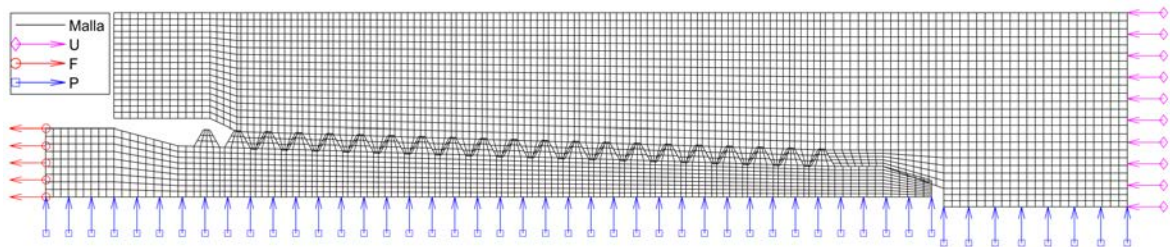
Fuente: elaboración propia

5.1.5 Condiciones de frontera

La solución del sistema de elementos finitos se realiza a través de 3 etapas las cuales se evalúan desde $t = 0$ hasta $t = 3$:

1. Precarga de la conexión roscada ($0 \leq t \leq 1$): se realiza la precarga de la conexión a través del ajuste de las superficies de contacto. En esta etapa y las siguientes se aplica la condición de frontera de Dirichlet U . (ver Fig. 23).
2. Carga a tracción.
 - 2.1. Primera carga ($1 \leq t \leq 2$): se aplica una carga a tracción F sobre la conexión roscada mediante una condición de presión tipo Neumann (ver Fig. 23). La carga F varía de 0 – 552 MPa (ver Fig. 24), donde el valor de 552 MPa es el valor del límite de fluencia del material evaluado (ver Tabla 3).
 - 2.2. Carga a tracción ajustada ($1 \leq t \leq t_{Obj_1}$): se halla el valor de la carga máxima a tracción que soporta la junta (Obj_1) y se ajustan los valores de las condiciones de frontera iniciales para la etapa 3 (ver Fig. 24).

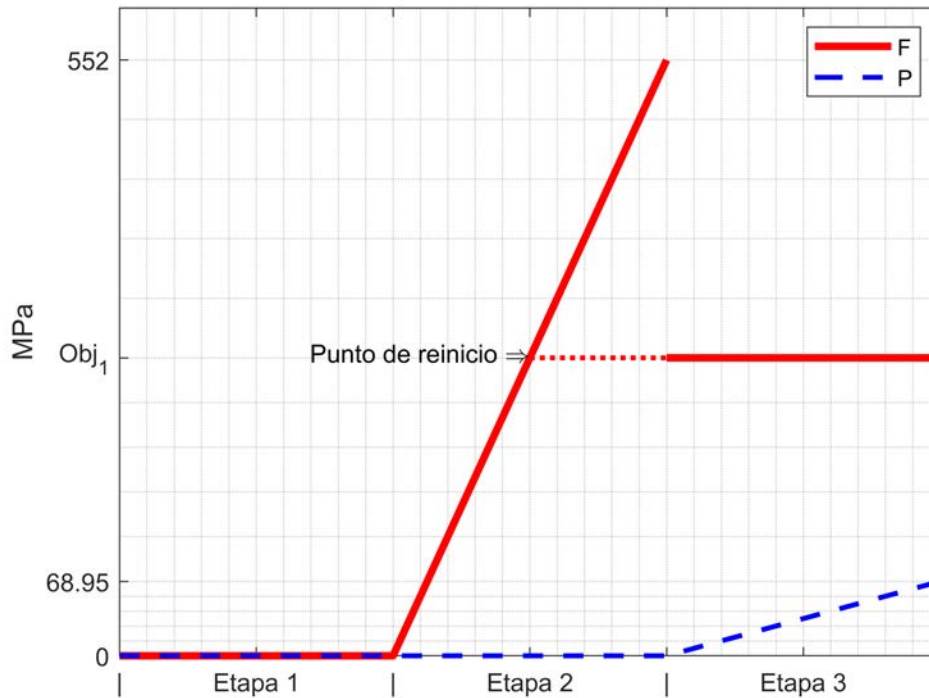
Figura 23. Condiciones de frontera tipo Dirichlet



Fuente: elaboración propia

3. Carga de presión de fluido ($t_{Obj_1} \leq t \leq 3$): se aplica una carga P al interior de la tubería y la cupla mediante una condición de presión tipo Neumann (ver Fig. 23). La carga P varía de 0 – 68,95 MPa (ver Fig. 24), donde el valor de 68,95 MPa es un valor aproximado del límite de colapso por presión interna de la tubería calculado conforme a [31].

Figura 24. Condiciones de frontera tipo Neumann



Fuente: elaboración propia

5.2 SOLUCIÓN

5.2.1 Opciones de análisis

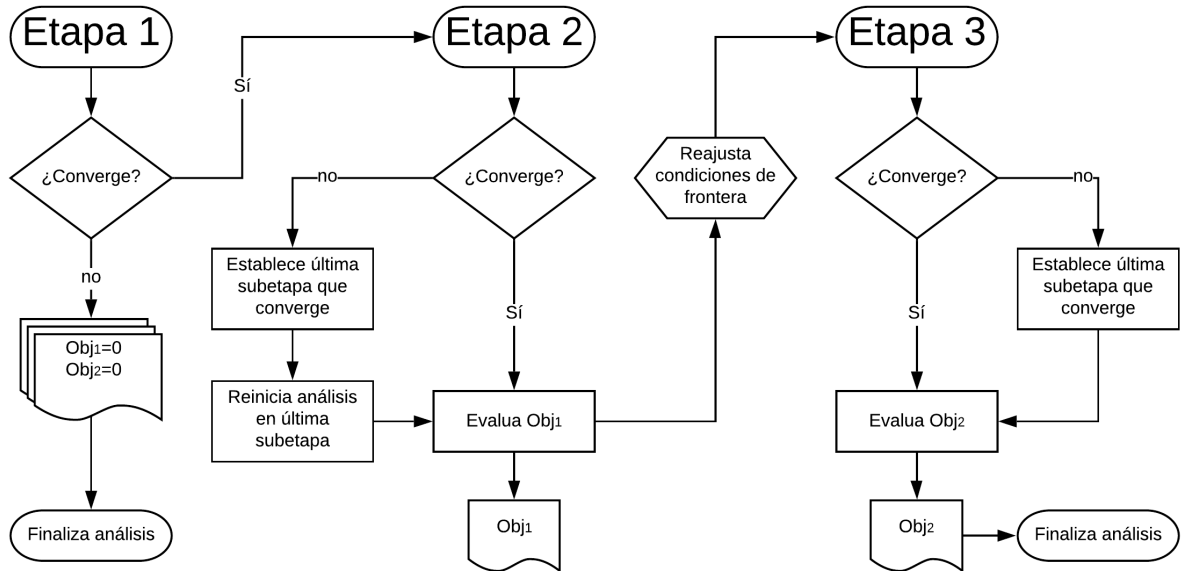
Se utilizan las siguientes opciones para el análisis estructural no lineal en ANSYS APDL:

1. Método de solución: Newton-Raphson en cada iteración de equilibrio.
2. Iteraciones de equilibrio: 15 iteraciones máximas para alcanzar la condición de equilibrio en cada subetapa.
3. Criterios de convergencia: error en norma $L_2 < 0,5\%$ de todas las fuerzas y momentos. Error en norma $L_\infty < 0,5\%$ de todos los desplazamientos nodales.

5.2.2 Etapas de procesamiento

La Fig. 25 muestra las acciones que toma el programa en cada una de las etapas de procesamiento.

Figura 25. Diagrama de flujo de las etapas de procesamiento



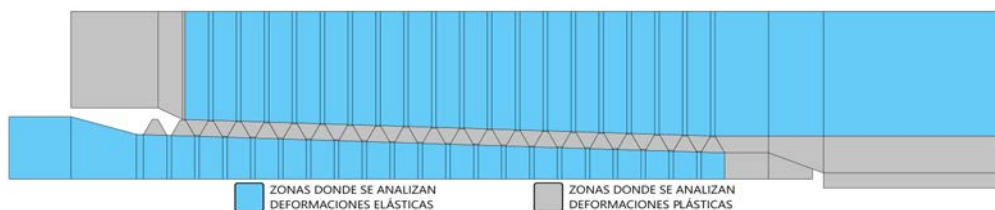
Fuente: elaboración propia

5.3 POSPROCESAMIENTO

5.3.1 Métricas de carga admisible a tracción

Las métricas de falla por tracción de la conexión roscada se evalúan en la etapa de procesamiento 2 (ver Fig. 25). Se analiza la conexión entre cada uno de los hilos de rosca, para esto se establecen zonas donde se admiten deformaciones plásticas y zonas donde se esperan deformaciones elásticas (ver Fig. 26).

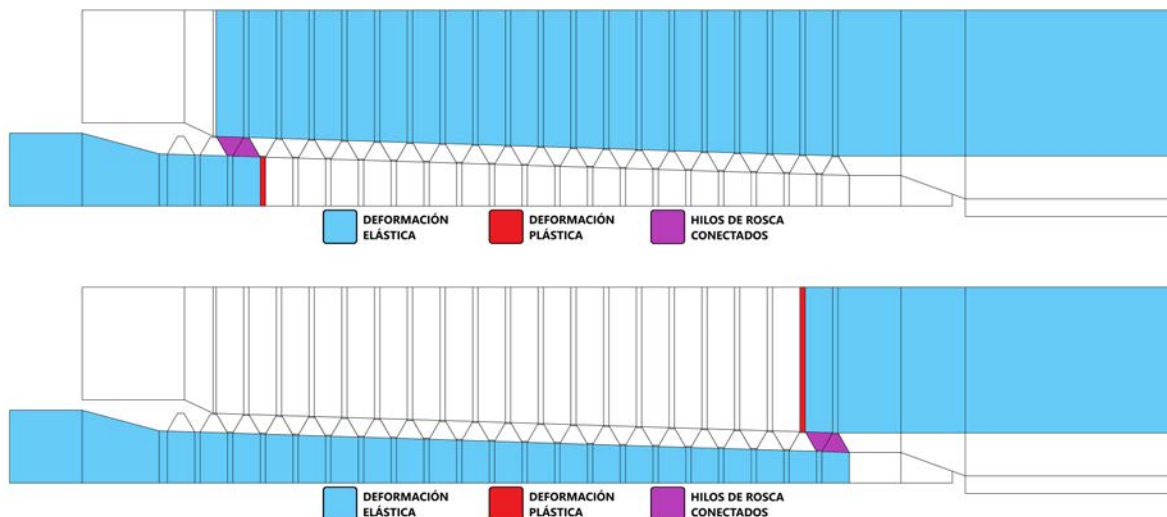
Figura 26. Evaluación de deformaciones en cada zona de análisis. Posición de apriete a mano



Fuente: elaboración propia

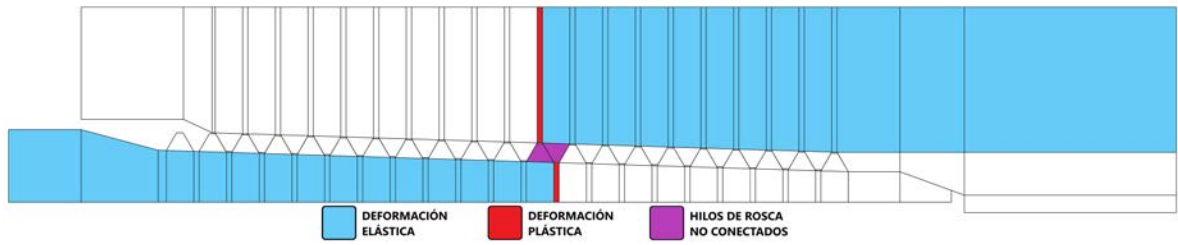
Se toma como criterio de falla de la conexión el estado de esfuerzos donde ningún hilo de la rosca *box* conecta de manera íntegra con algún hilo de la rosca *pin*. Algunos casos de ejemplo se muestran en la Fig. 27 y Fig. 28.

Figura 27. Ejemplos de estados de deformaciones de conexiones que no fallan



Fuente: elaboración propia

Figura 28. Ejemplo de estados de deformaciones de conexiones que fallan

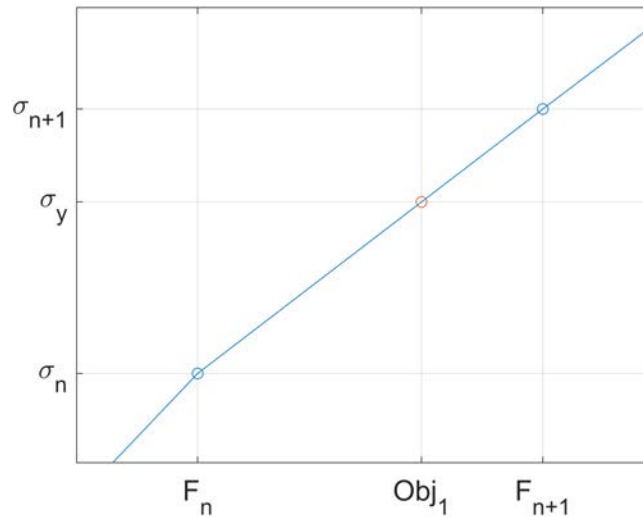


Fuente: elaboración propia

5.3.2 Evaluación de Obj_1

Uno de los comportamientos mecánicos que se quieren mejorar en la junta es la máxima carga a tracción que soporta la misma, el cual se nombrará Obj_1 . La evaluación de Obj_1 se realiza después de la etapa de procesamiento 2 (ver Fig. 25) conforme a los criterios de la Sec. 5.3.1. En cada subetapa del proceso se evalúan los esfuerzos de von Mises máximos en las áreas de deformación elástica en cada hilo de rosca. La conexión roscada fallará por tracción en la subetapa donde los esfuerzos de von Mises en todos los hilos de rosca superen el esfuerzo de fluencia. En la subetapa anterior a la falla se toma como referencia el hilo de rosca que tenga el esfuerzo de von Mises máximo que esté por debajo del esfuerzo de fluencia para hallar mediante interpolación la carga máxima que soportaría la junta (ver Fig. 29).

Figura 29. Evaluación de Obj_1



Fuente: elaboración propia

La función objetivo estará definida como:

$$Obj_1 = F_n + \frac{F_{n+1} - F_n}{\sigma_{n+1} - \sigma_n}(\sigma_y - \sigma_n) \quad (5.4)$$

Donde:

n es la última etapa donde la conexión no presenta falla.

F_n es la carga F en la subetapa n .

F_{n+1} es la carga F en la subetapa $n + 1$.

σ_n es el máximo esfuerzo de von Mises en la subetapa n .

σ_{n+1} es el máximo esfuerzo de von Mises en la subetapa $n + 1$.

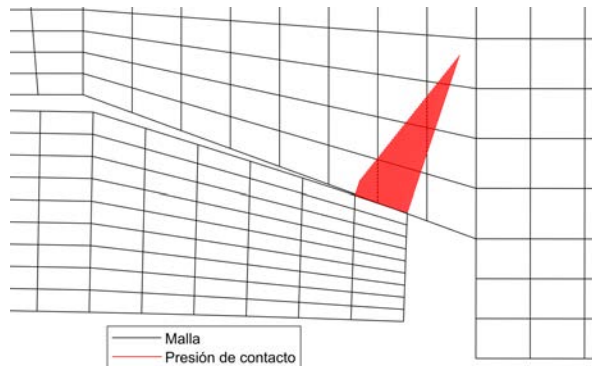
σ_y es el esfuerzo de fluencia del material.

En caso de no presentar falla en ninguna subetapa de la etapa 2, $Obj_1 = F_n$.

5.3.3 Métricas de hermeticidad

Se toma como criterio de hermeticidad el valor medio de las presiones de contacto sobre la zona de sello (ver Fig. 30). Conexiones con $CP_s \leq P$ presentarán falla por hermeticidad.

Figura 30. Presión de contacto sobre la zona de sello



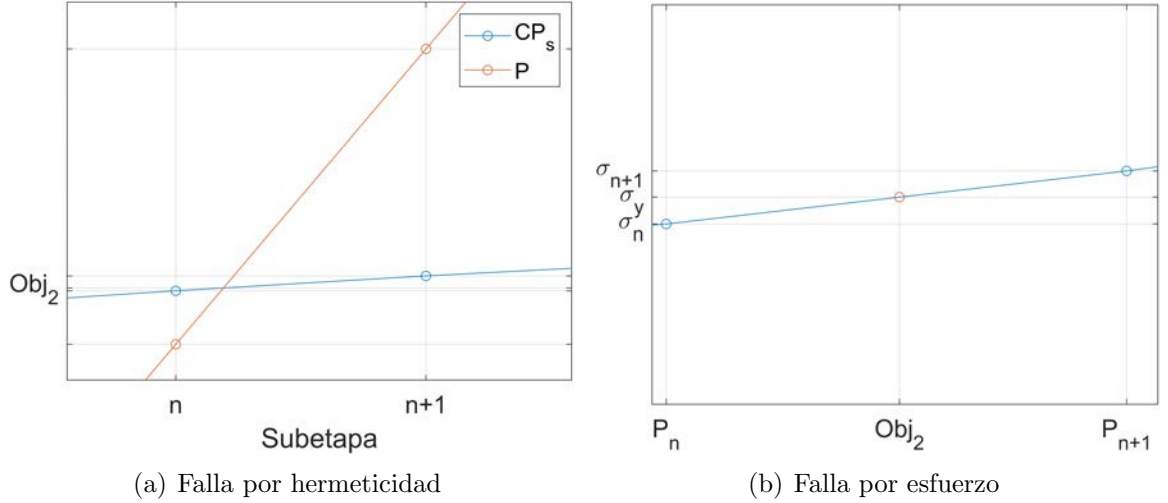
Fuente: elaboración propia

5.3.4 Evaluación de Obj_2

El otro comportamiento a mejorar en la junta es la máxima presión interna que puede soportar la junta sujeta a la máxima carga a tracción (Obj_1), el cual se nombrará Obj_2 . La evaluación de Obj_2 se realiza después de la etapa de procesamiento 3 (ver Fig. 25). Se evalúan los criterios conjuntos de la Sec. 5.3.1 y la Sec. 5.3.3. La conexión

roscada puede presentar falla por hermeticidad en la subetapa donde $CP_s \leq P$ o por carga en la subetapa donde $\sigma_{max} > \sigma_y$, análogo a la Sec. 5.3.2. En el caso de falla por hermeticidad se halla el punto donde $CP_s = P$, interpolando los valores de CP y P (ver Fig. 5.32(a)). En el caso de falla por carga se interpola para hallar el valor de P que genera un esfuerzo σ_y (ver Fig. 5.32(b)).

Figura 31. Evaluación de Obj_2



En falla por hermeticidad la función objetivo estará definida como:

$$Obj_2 = P_n + \frac{P_{n+1} - P_n}{(CP_{n+1} - P_{n+1}) - (CP_n - P_n)} (P_n - CP_n) \quad (5.5)$$

En falla por carga la función objetivo estará definida como:

$$Obj_2 = P_n + \frac{P_{n+1} - P_n}{\sigma_{n+1} - \sigma_n} (\sigma_y - \sigma_n) \quad (5.6)$$

Donde:

n es la última etapa donde la conexión no presenta falla.

P_n es la presión P en la subetapa n .

P_{n+1} es la presión P en la subetapa $n + 1$.

CP_n es la presión de contacto promedio en la subetapa n .

CP_{n+1} es el presión de contacto promedio en la en la subetapa $n + 1$.

σ_n es el máximo esfuerzo de von Mises en la subetapa n .

σ_{n+1} es el máximo esfuerzo de von Mises en la subetapa $n + 1$.

σ_y es el esfuerzo de fluencia del material.

En caso de no presentar falla en ninguna subetapa de la etapa 3, $Obj_2 = CP_n$.

5.3.5 Escritura de resultados

En modelos que convergen a una solución la escritura de resultados se realiza en la etapa 2 y 3 del procesamiento (ver Fig. 25). Para un individuo x hay 2 archivos de texto plano con la siguiente información:

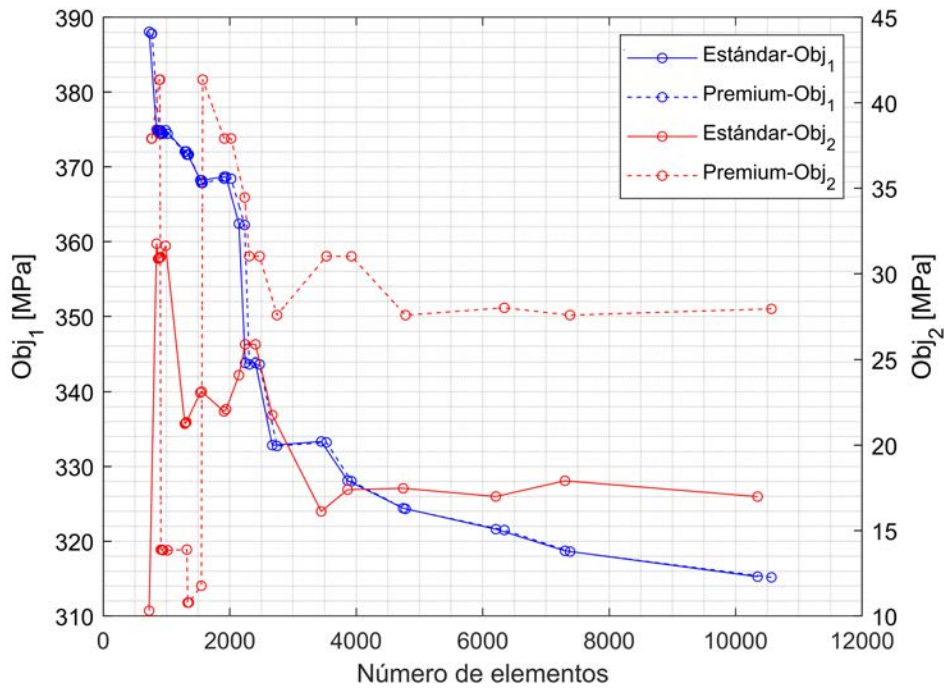
1. Nombre del archivo: x *OBJ1.txt*. Contiene el valor de la función objetivo 1.
2. Nombre del archivo: x *OBJ2.txt*. Contiene el valor de la función objetivo 2.

5.4 AJUSTE DEL MODELO

Se realiza un análisis de convergencia de malla para la conexión *API 3½ NU* y una conexión *Premium* de prueba, tomando como criterio el cambio en las funciones objetivo. La evaluación de las presiones de contacto en la conexión estándar será sobre los flancos frontales de los hilos de rosca (ver Fig. 4). Se cambia el tamaño global del elemento h entre 3,0 y 0,5 *mm*. Los resultados se observan en la Tabla 5.

Geometrías con $h \leq 0,4$ exceden el número de nodos permitidos en la versión estudiantil de ANSYS APDL. Los datos de forma gráfica se observan en la figura Fig. 32.

Figura 32. Funciones objetivo con diferentes números de elementos de malla



Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Resultados del análisis de convergencia de malla

h (mm)	ESTÁNDAR					PREMIUM				
	t (s)	Elementos	Nodos	Obj1 (MPa)	Obj2 (MPa)	t (s)	Elementos	Nodos	Obj1 (MPa)	Obj2 (MPa)
3	18,7	726	1548	388,068	10,309	8,5	762	1624	387,811	37,907
2,9	17,2	726	1548	388,068	10,309	7,1	769	1647	387,811	37,907
2,8	13,1	843	1907	374,970	31,755	7,6	886	1998	374,521	41,355
2,7	13,1	867	1977	374,888	30,872	7,5	897	2035	374,440	41,352
2,6	12,0	880	2020	374,888	30,898	7,1	911	2075	374,429	13,882
2,5	12,0	888	2046	374,887	30,924	7,2	919	2101	374,429	13,879
2,4	13,0	901	2089	374,886	30,949	7,6	932	2144	374,428	13,877
2,3	13,0	909	2115	374,886	30,974	7,8	947	2193	374,427	13,850
2,2	13,2	986	2350	374,896	31,623	7,9	1017	2405	374,438	13,848
2,1	14,1	1290	3110	372,063	21,250	8,5	1321	3165	371,631	13,885
2	14,1	1299	3139	372,062	21,296	8,8	1335	3205	371,636	10,783
1,9	14,0	1314	3188	372,062	21,342	8,6	1353	3265	371,636	10,788
1,8	15,2	1534	3856	368,217	23,073	10,2	1551	3865	367,850	11,769
1,7	16,2	1556	3926	368,217	23,132	10,1	1572	3926	367,851	41,357
1,6	17,6	1910	4612	368,664	21,970	11,5	1914	4574	368,406	37,910
1,5	17,8	1942	4714	368,664	22,097	13,0	2022	4898	368,413	37,910
1,4	19,2	2145	5333	362,395	24,095	13,2	2236	5544	362,216	34,460
1,3	19,3	2245	5641	343,840	25,861	15,3	2309	5767	343,658	31,019
1,2	20,0	2407	6137	343,841	25,860	13,9	2472	6266	343,659	31,019
1,1	20,8	2673	6951	332,848	21,760	16,2	2747	7101	332,740	27,573
1	22,7	3446	9126	333,341	16,119	19,1	3530	9296	333,226	31,017
0,9	25,8	3864	10396	328,120	17,394	20,0	3925	10499	328,029	31,015
0,8	31,3	4743	12679	324,418	17,474	25,8	4780	12690	324,325	27,571
0,7	39,0	6209	16951	321,610	16,993	34,3	6343	17241	321,496	28,000
0,6	45,0	7301	20263	318,720	17,914	37,7	7382	20384	318,616	27,572
0,5	61,3	10348	28920	315,253	16,986	58,3	10566	29418	315,170	27,938

Fuente: elaboración propia

Se selecciona un tamaño global de elemento $h = 0,7 \text{ mm}$ para todos los análisis. El error relativo de las funciones objetivo comparando los valores de h_{min} con el h escogido y la diferencia del costo computacional en tiempo se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Error relativo del análisis de convergencia de malla

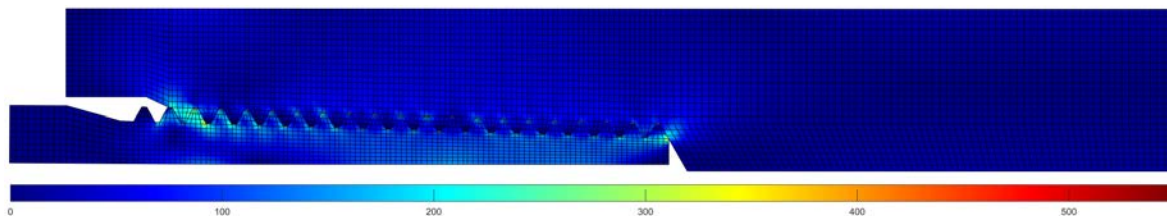
Error de h=0,7 respecto a h=0,5					
Estándar			Premium		
Obj_1	Obj_2	Δt	Obj_1	Obj_2	Δt
2,02 %	0,04 %	22,3	2,01 %	0,22 %	24,0

Fuente: elaboración propia

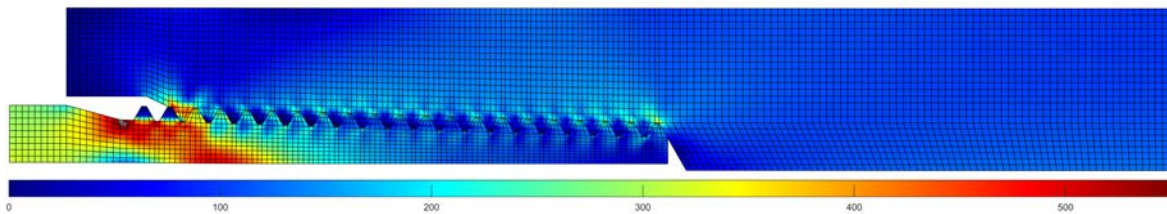
5.5 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA CONEXIÓN $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$

Utilizando el tamaño global de malla de la Sec. 5.4 se realiza la evaluación preliminar del comportamiento mecánico de la conexión estándar. La Fig. 33 muestra la distribución de esfuerzos de von Mises sobre la conexión en la etapa de precarga y en el momento de falla de la junta en la etapa de carga a tracción.

Figura 33. Estado de esfuerzos de von Mises



(a) Etapa de precarga $F = 0$ $P = 0$



(b) Etapa de carga a tracción $F \approx Obj_1$ $P = 0$

Fuente: elaboración propia

La zona de más altos esfuerzos se encuentra en el último hilo de rosca conectado y en la zona de desvanecimiento de rosca del *pin*. Esto concuerda con el análisis hecho por Wittenbergue *et al.* en [3] donde explica que la zona en el último hilo de rosca conectado es la zona donde las grietas a fatiga tienden a iniciar.

6. OPTIMIZACIÓN

6.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El propósito del estudio es maximizar los valores Obj_1 y Obj_2 descritos en la Sec. 5.3.2 y Sec. 5.3.4. Se normalizan estos valores conforme a los valores máximos de la carga F y la presión P definiendo el problema de la siguiente manera:

$$\text{Conexión Premium} \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar } FF_1(X) = -\frac{Obj_1}{552} \\ \text{Minimizar } FF_2(X) = -\frac{Obj_2}{68,95} \\ \text{Sujeto a: } g_1(X) \equiv X_1 \leq X_2 \\ g_2(X) \equiv X_8 \leq X_{11} \\ g_3(X) \equiv X_9 \leq X_{12} \\ g_4^*(X) \equiv X_{10} \leq X_{13} \\ g_5^*(X) \equiv X_{11} - X_{12} \leq X_8 - X_9 \\ X = (X_1, X_2, \dots, X_{13}) \text{ ver Tabla 7} \end{array} \right. \quad (6.1)$$

* Solo para individuos obtenidos de manera aleatoria

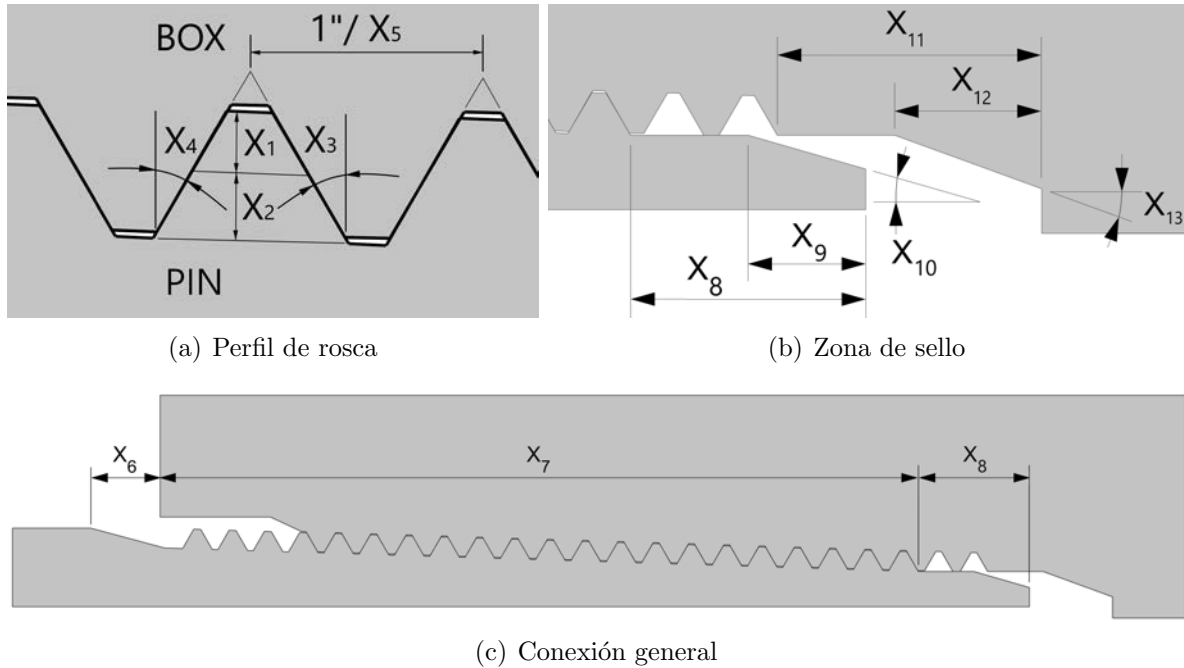
Las variables utilizadas se describen en la Tabla 7 y se observan en la Fig. 34.

Tabla 7. Variables geométricas de la optimización

Variable	Descripción	Tipo	Mín	Máx	Unidad
X_1	Altura de cresta	Continúa	0,40	0,75	mm
X_2	Altura de raíz	Continúa	0,40	0,75	mm
X_3	Ángulo frontal de rosca	Discreta	2	35	°
X_4	Ángulo posterior de rosca	Discreta	2	35	°
X_5	Hilos de rosca por pulgada	Discreta	6	12	hilos/in
X_6	Longitud de apriete de potencia	Continúa	3,0	13,0	mm
X_7	Longitud efectiva de rosca	Continúa	40,0	65,0	mm
X_8	Longitud de punta de la tubería	Continúa	7,0	19,0	mm
X_9	Longitud de zona de sello de la tubería	Continúa	3,0	5,0	mm
X_{10}	Ángulo de sello de la tubería	Discreta	12	22	°
X_{11}	Longitud de receso del acople	Continúa	8,0	20,0	mm
X_{12}	Longitud de zona de sello del acople	Continúa	4,0	6,0	mm
X_{13}	Ángulo de sello del acople	Discreta	14	24	°

Fuente: elaboración propia

Figura 34. Variables geométricas en la tubería y el acople. Posición de apriete a mano



Fuente: elaboración propia

Los parámetros geométricos necesarios para definir completamente la conexión se muestran en la Tabla 8 y son tomados de la Tabla 2, Fig. 10 y Fig. 11.

Tabla 8. Parámetros geométricos

D	Q	q	t_{min}	W	NL
88,9 mm	90,5 mm	7,94 mm	5,64 mm	107,95 mm	220 mm

Fuente: elaboración propia

6.2 TÉCNICAS

Las técnicas de optimización implementadas se basan en los algoritmos genéticos de optimización NSGAI [21] y SPEA2 [22]. Se toma como condición adicional en el criterio de dominancia de Pareto que todo individuo factible dominará un individuo que no lo es. En caso de comparar dos individuos no factibles el criterio de dominancia se evaluará conforme a la suma de las violaciones a las restricciones descritas (ver Ec. 6.1).

La ejecución de cada algoritmo se realiza diez veces partiendo de una población aleatoria. Después de realizadas las diez corridas se ejecuta por última vez cada algoritmo

seleccionando la población inicial a partir de los mejores individuos hallados, conforme a los criterios de selección de cada algoritmo.

6.3 PARÁMETROS DEL ALGORITMO

No existe una fórmula explícita para determinar de manera correcta el tamaño de la población y el número de generaciones. Algunos autores recomiendan establecer una población inicial y número de generaciones igual al cuadrado del número de variables involucradas. Para el presente trabajo se mantiene una población fija de 50 individuos por cada generación, siendo el número de individuos en la población igual al número de individuos élite en el algoritmo SPEA2. El criterio de parada de cada algoritmo de optimización se definió con un valor máximo de 50 generaciones. Se definen los valores de estos parámetros con el propósito de mantener los tiempos computacionales acordes a la planeación del trabajo final.

Las restricciones $g_4(X)$ y $g_5(X)$ no definen la factibilidad de los individuos obtenidos en los resultados (ver Ec. 6.1), sin embargo, son aplicadas en la generación aleatoria de la población inicial con los siguientes propósitos:

1. Garantizar que la parte frontal de la zona de sello del *pin* es la que tiene mayor contacto.
2. Garantizar la existencia de presiones de contacto en la zona de sello.

6.4 OPERADORES GENÉTICOS

Se implementan los mismos operadores de selección, cruce y mutación para cada algoritmo. Estos parámetros serán iguales en cada una de las corridas.

6.4.1 Selección

La selección se realiza mediante torneo binario. El criterio de selección se define de manera diferente conforme a cada algoritmo. Para el caso del NSGAI el criterio primario es la clasificación en frentes de Pareto y para el SPEA2 es la asignación de una única función *fitness*. En caso de evaluar dos individuos que tengan el mismo *ranking* (NSGAI) o el mismo *fitness* (SPEA2) se realizará el desempate mediante el parámetro de densidad propio de cada algoritmo.

6.4.2 Cruce

El cruce se realiza mediante el operador SBX (operador de cruce binario simulado) el cual está definido en [23, A-1]. Para el presente trabajo se estableció un valor $\eta_c = 3$,

siendo este un valor moderado de acuerdo al autor [24].

6.4.3 Mutación

La mutación se realiza mediante una distribución de probabilidad polinomial la cual está definida en [23, A-2]. Para el presente trabajo se tomó $\eta_m = 10 + k$. Donde k es la generación.

Se define la probabilidad de mutación de la siguiente manera:

$$p_m = \frac{1}{n} + \frac{k}{k_{max}} \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

Donde:

p_m es la probabilidad de mutación del cromosoma.

k es la generación actual.

k_{max} es el máximo número de generaciones.

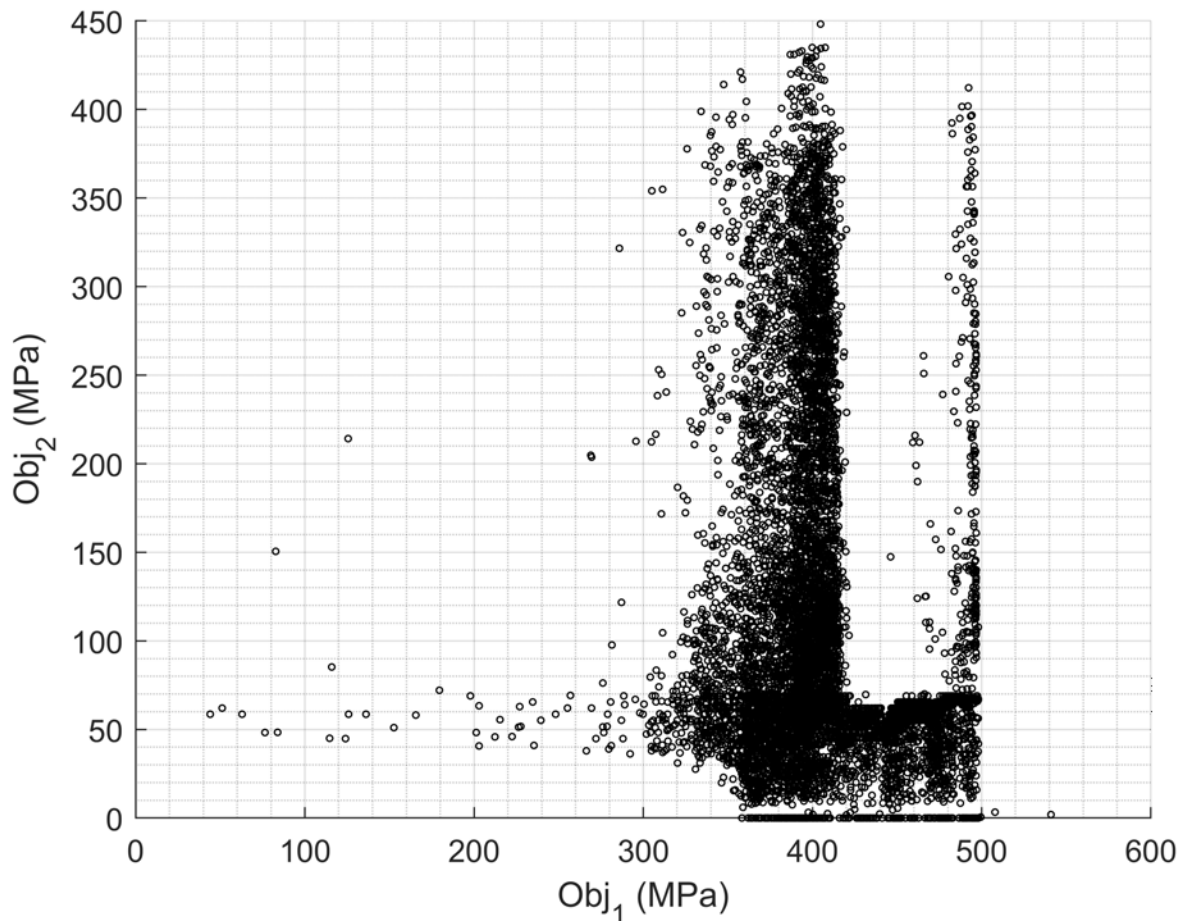
n es el número de genes de cada individuo.

Este enfoque, sugerido en [23], permite en las últimas generaciones una mayor probabilidad de mutación con una menor perturbación.

7. RESULTADOS

La Fig. 35 muestra en un diagrama de dispersión el valor de las funciones objetivo de los individuos evaluados en todas las corridas de los algoritmos. El total de individuos evaluados es de 56100 en un tiempo total de cómputo aproximado de 23 días.

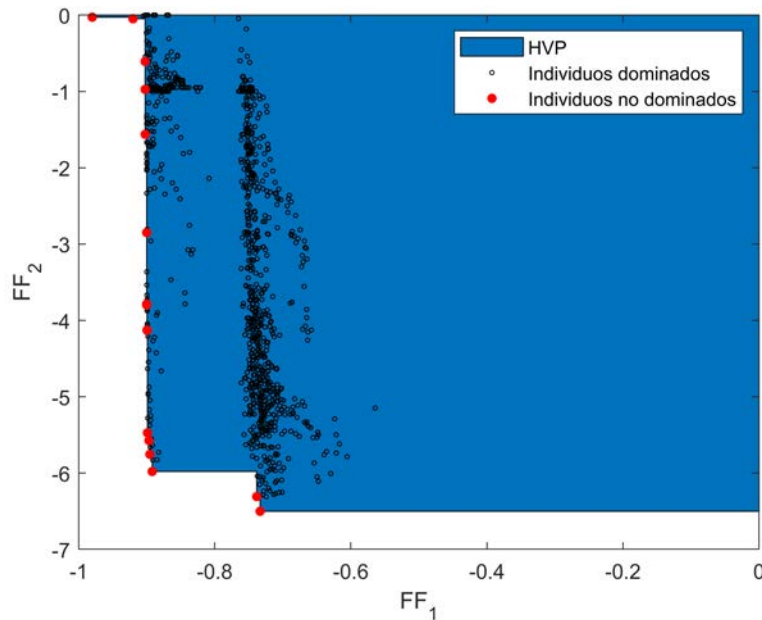
Figura 35. Diagrama de dispersión Obj_1 vs Obj_2 de todos los individuos evaluados



Fuente: elaboración propia

Se comparan los resultados obtenidos en cada algoritmo mediante la métrica de hipervolumen. El punto de referencia tomado en la métrica fue el punto de origen. Debido a que se desconoce el Frente Óptimo de Pareto se halla *HVP* considerando el frente de individuos no dominados final (ver Fig. 36).

Figura 36. Diagrama de dispersión FF_1 vs FF_2 de resultados de cada una de las corridas



Fuente: elaboración propia

Los datos comparativos de los algoritmos se observan en la Tabla 9. Las variables de cada uno de los individuos del frente no dominado y el valor de sus funciones objetivo se muestran en la Tabla 10.

Tabla 9. Datos comparativos de acuerdo a la métrica de hipervolumen

Corrida	HVR	
	NSGAI	SPEA2
1	0,8534	0,7840
2	0,7592	0,7600
3	0,7171	0,5233
4	0,7126	0,6532
5	0,7888	0,7097
6	0,7554	0,7895
7	0,6246	0,6909
8	0,7252	0,9260
9	0,8004	0,5518
10	0,7495	0,7536
11	0,9701	0,9995

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Variables y funciones objetivo del frente de individuos no dominados

	VARIABLES													Obj ₁	Obj ₂
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃		
x ₁	0,41	0,48	22	23	10	12,0	52,1	12,2	3,0	22	12,5	6,0	22	540,972	1,922
x ₂	0,40	0,41	18	21	9	12,9	45,8	12,7	3,2	19	12,7	5,5	22	507,894	3,282
x ₃	0,40	0,40	19	19	10	12,9	45,9	10,7	3,5	19	12,2	5,2	24	498,057	41,958
x ₄	0,40	0,40	19	19	10	12,9	45,9	10,2	3,5	19	12,2	5,2	24	498,045	67,048
x ₅	0,40	0,40	23	19	10	12,8	46,0	12,1	3,2	20	12,2	5,5	22	498,025	67,145
x ₆	0,40	0,40	32	21	11	13,0	48,6	13,4	3,5	21	13,8	5,9	24	498,019	67,183
x ₇	0,40	0,40	18	20	9	12,9	48,6	10,3	3,0	22	11,8	5,6	21	498,008	107,726
x ₈	0,40	0,40	32	22	10	13,0	49,1	13,2	3,5	21	13,8	5,9	24	496,798	196,462
x ₉	0,40	0,40	32	22	10	13,0	49,1	13,4	3,5	21	13,8	5,9	24	496,795	260,934
x ₁₀	0,40	0,40	32	21	10	13,0	49,4	13,4	3,5	21	13,8	5,9	24	496,754	261,952
x ₁₁	0,40	0,40	25	21	9	13,0	49,4	12,6	3,2	21	13,1	5,7	23	496,509	284,494
x ₁₂	0,40	0,41	27	21	10	13,0	51,1	13,5	3,5	22	13,6	5,6	24	496,455	284,764
x ₁₃	0,40	0,41	23	21	10	12,9	51,6	12,1	3,2	21	12,4	5,9	22	496,159	377,302
x ₁₄	0,40	0,41	23	22	10	12,8	48,9	12,2	3,2	21	12,5	5,9	22	494,932	384,359
x ₁₅	0,40	0,41	23	22	9	12,8	52,0	11,5	3,0	21	12,0	5,9	22	494,228	396,737
x ₁₆	0,40	0,41	24	21	10	12,0	49,4	12,3	3,0	21	12,5	5,9	23	492,293	412,245
x ₁₇	0,41	0,51	10	4	9	10,4	57,3	9,1	3,0	20	9,1	5,8	22	407,511	434,938
x ₁₈	0,40	0,48	21	18	9	8,7	46,4	11,5	3,0	20	11,5	5,8	20	404,775	448,217

Fuente: elaboración propia

7.1 ANÁLISIS DE INDIVIDUOS NO DOMINADOS

7.1.1 Variables

De la Tabla 10 no se tiene una relación clara de la variación de los objetivos en función de cada variable. Se analizan las variables con los datos de la Tabla 11 donde se muestra la variación de las variables y funciones objetivo en los individuos no dominados mediante el valor mínimo, máximo, medio y la desviación estándar.

Tabla 11. Variación de las variables y funciones objetivo en individuos no dominados

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	Obj ₁	Obj ₂
mín	0,4	0,4	10	4	9	8,7	45,8	9,1	3	19	9,1	5,2	20	404,775	1,922
máx	0,41	0,51	32	23	11	13	57,3	13,5	3,5	22	13,8	6	24	540,972	448,217
\bar{X}_i	0,401	0,418	23,500	19,833	9,722	12,444	49,256	12,022	3,250	20,667	12,528	5,728	22,722	489,568	227,704
S	0,0032	0,0338	5,9235	4,1622	0,5745	1,1341	2,9058	1,2680	0,2203	0,9701	1,1359	0,2445	1,2274	32,1875	160,5962

Fuente: elaboración propia

De la Tabla 11 se puede analizar de manera individual en las funciones objetivo y en cada variable que:

- Las variables del tamaño de cresta y raíz del perfil de rosca (X_1 y X_2) tuvieron la menor variación entre sí. Se obtuvieron los mejores resultados con valores cercanos al límite inferior de las variables.
- Las variables con mayor variación entre sí fueron los ángulos del perfil de rosca (X_3 y X_4). La media del ángulo frontal (X_3) está dentro de la desviación estándar del ángulo posterior (X_4) y viceversa. En la mayoría de los individuos el ángulo frontal es mayor al ángulo posterior.
- Se obtuvo una desviación inferior a la unidad en el número de hilos de rosca por pulgada (X_5). Los mejores resultados se obtuvieron con valores cercanos a 10.
- En la longitud de apriete de potencia (X_6) se obtuvieron los mejores resultados con valores entre 8,7 y 13. El valor medio de la longitud de apriete de potencia es aproximadamente equivalente a 5 vueltas de rosca en la etapa de precarga.
- Se obtuvieron los mejores resultados con valores de longitud efectiva de rosca (X_7) entre 45,8 y 57,3. La desviación estándar entre individuos en esta variable es inferior a dos veces el valor promedio del paso de rosca.
- En las variables que definen la geometría de la zona de sello ($X_8 - X_{11}$) se obtuvieron desviaciones entre sí inferiores a 1,3 alcanzando los mejores resultados con:
 - Valores cercanos a 12 en la longitud de la punta de la tubería y la longitud del receso del acople (X_8 y X_{11}).
 - Valores cercanos al límite inferior en la longitud de la zona de sello de la tubería (X_9) y valores cercanos al límite superior en la longitud de la zona de sello del acople (X_{12}).
 - Valores cercanos al límite superior en los ángulos de sello de la tubería y el acople (X_{10} y X_{13}).
- La función objetivo 2 presenta mayor variación que la función objetivo 1.

7.1.2 Restricciones

En la Tabla 12 se muestran los valores numéricos que representan el cumplimiento o violación de las restricciones en cada individuo no dominado. De la Tabla 12 se puede analizar que:

- Las restricciones aplicables a los individuos no dominados se cumplen ($g_1(X) - g_3(X)$) (ver * de la Ec. 6.1), por tanto todos los individuos no dominados son factibles.

- Las relaciones entre variables donde se obtienen los mejores resultados son:
 $X_1 \approx X_2$, $X_{11} - X_8 \approx 0,51$ y $X_{12} - X_9 \approx 2,48$.
- Las restricciones $g_4(X)$ y $g_5(X)$ no definen la factibilidad de los individuos no dominados, sin embargo, se cumplen en la mayoría de ellos.

Tabla 12. Variación de las restricciones en individuos no dominados

Individuo	$g_1(X)$	$g_2(X)$	$g_3(X)$	$g_4(X)$	$g_5(X)$
x ₁	0,07	0,3	3,0	0,0	2,7
x ₂	0,01	0,0	2,3	3,0	2,3
x ₃	0,00	1,5	1,7	5,0	0,2
x ₄	0,00	2,0	1,7	5,0	-0,3
x ₅	0,00	0,1	2,3	2,0	2,2
x ₆	0,00	0,4	2,4	3,0	2,0
x ₇	0,00	1,5	2,6	-1,0	1,1
x ₈	0,00	0,6	2,4	3,0	1,8
x ₉	0,00	0,4	2,4	3,0	2,0
x ₁₀	0,00	0,4	2,4	3,0	2,0
x ₁₁	0,00	0,5	2,5	2,0	2,0
x ₁₂	0,01	0,1	2,1	2,0	2,0
x ₁₃	0,01	0,3	2,7	1,0	2,4
x ₁₄	0,01	0,3	2,7	1,0	2,4
x ₁₅	0,01	0,5	2,9	1,0	2,4
x ₁₆	0,01	0,2	2,9	2,0	2,7
x ₁₇	0,10	0,0	2,8	2,0	2,8
x ₁₈	0,08	0,0	2,8	0,0	2,8
\bar{g}_i	0,017	0,506	2,478	2,056	1,972
S	0,0312	0,5724	0,3750	1,5894	0,8484

Valores positivos cumplen la restricción

Valores negativos presentan una violación en la restricción

Fuente: elaboración propia

7.1.3 Comparación con la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$

La Tabla 13 muestra el valor de las variables y funciones objetivo en la conexión estándar $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$. Las variables $X_8 - X_{13}$ no existen en esta conexión debido a que son las que definen la zona de sello.

Se comparan las variables y funciones objetivo de la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$ (x_{NU}) y los individuos no dominados obtenidos (x_i). Los datos se observan en la Tabla 14.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS

Tabla 13. Valor de las variables y funciones objetivo en la junta $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	Obj ₁	Obj ₂
x_{NU}	0,67	0,74	30	30	10	5,08	54,46	321,610	16,993

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Diferencia entre resultados obtenidos y la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$

	$e_i = x_i - x_{NU} /x_{NU}$							x_i/x_{NU}	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	Obj ₁	Obj ₂
x ₁	0,39	0,36	0,27	0,23	0,00	1,36	0,04	1,68207	0,11311
x ₂	0,40	0,45	0,40	0,30	0,10	1,54	0,16	1,57922	0,19314
x ₃	0,40	0,46	0,37	0,37	0,00	1,54	0,16	1,54864	2,46913
x ₄	0,40	0,46	0,37	0,37	0,00	1,54	0,16	1,54860	3,94562
x ₅	0,40	0,46	0,23	0,37	0,00	1,52	0,16	1,54854	3,95133
x ₆	0,40	0,46	0,07	0,30	0,10	1,56	0,11	1,54852	3,95357
x ₇	0,40	0,46	0,40	0,33	0,10	1,54	0,11	1,54848	6,33943
x ₈	0,40	0,46	0,07	0,27	0,00	1,56	0,10	1,54472	11,56135
x ₉	0,40	0,46	0,07	0,27	0,00	1,56	0,10	1,54471	15,35538
x ₁₀	0,40	0,46	0,07	0,30	0,00	1,56	0,09	1,54459	15,41529
x ₁₁	0,40	0,46	0,17	0,30	0,10	1,56	0,09	1,54382	16,74183
x ₁₂	0,40	0,45	0,10	0,30	0,00	1,56	0,06	1,54366	16,75772
x ₁₃	0,40	0,45	0,23	0,30	0,00	1,54	0,05	1,54273	22,20338
x ₁₄	0,40	0,45	0,23	0,27	0,00	1,52	0,10	1,53892	22,61867
x ₁₅	0,40	0,45	0,23	0,27	0,10	1,52	0,05	1,53673	23,34708
x ₁₆	0,40	0,45	0,20	0,30	0,00	1,36	0,09	1,53071	24,25970
x ₁₇	0,39	0,31	0,67	0,87	0,10	1,05	0,05	1,26710	25,59513
x ₁₈	0,40	0,36	0,30	0,40	0,10	0,71	0,15	1,25859	26,37657
\bar{e}	0,400	0,438	0,246	0,339	0,039	1,450	0,101		

Fuente: elaboración propia

De la Tabla 14 se puede analizar que:

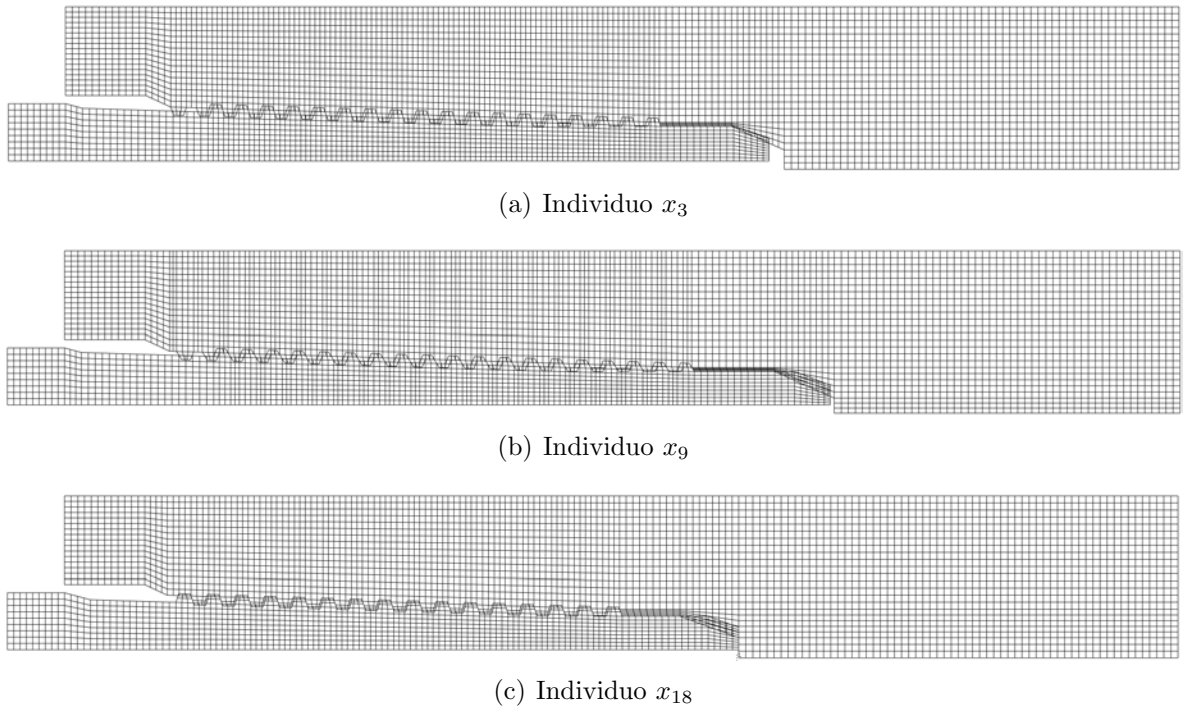
- Los individuos x_3 - x_{18} dominan a la conexión estándar x_{NU} .
- La variable que tiene menos variación en la optimización es el número de hilos de rosca por pulgada (X_5) con una variación promedio inferior al 4%.
- La variable que tiene más variación en la optimización es la longitud del apriete de potencia (X_6) con una variación promedio igual a 145%.

- Se ven variaciones promedio similares en la cresta y raíz de rosca (X_1 y X_2), de 40 % y 43,8 % respectivamente.

7.1.4 Geometría y estado de esfuerzos

Se evalúan 3 individuos característicos del frente de Pareto que dominan la conexión x_{NU} ; los individuos de los extremos (x_3 y x_{18}) y un individuo dentro del frente (x_9). La geometría de los individuos utilizada en el análisis mediante el método de elementos finitos se observa en la Fig. 37.

Figura 37. Geometría usada en el modelo FEM



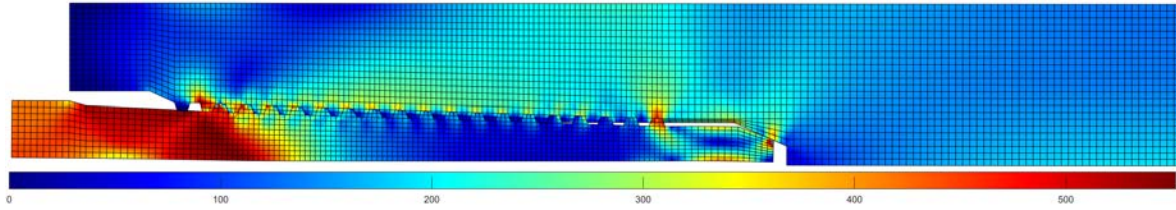
Fuente: elaboración propia

Comparando la Fig. 37 con los datos de la Tabla 10 se observa que entre mayor es el traslape en la zona de sello, mayor es el valor de Obj_2 .

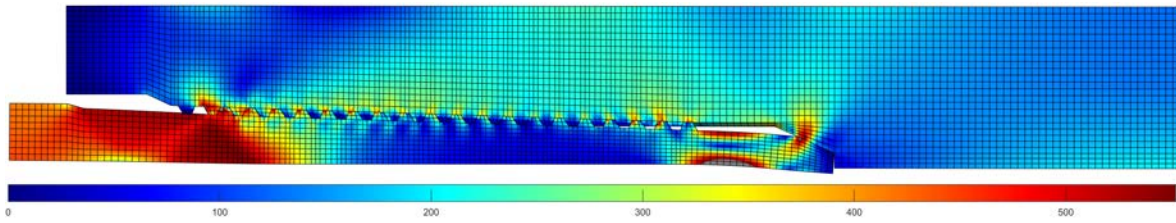
El estado de esfuerzos de von Mises de los individuos x_3 , x_9 y x_{18} se muestra en la Fig. 38. Al igual que en el análisis del comportamiento mecánico de la conexión $API\ 3\frac{1}{2}\ NU$ en la Sec. 5.5 se observa que la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en la zona del último hilo de rosca conectado, sin embargo, se pueden apreciar en la zona de sello estados de esfuerzo por encima del esfuerzo de fluencia, generando en la

geometría deformada del *pin* puntos por debajo del diámetro interno de la tubería (ver Fig. 7.39(b) y Fig. 7.39(c)).

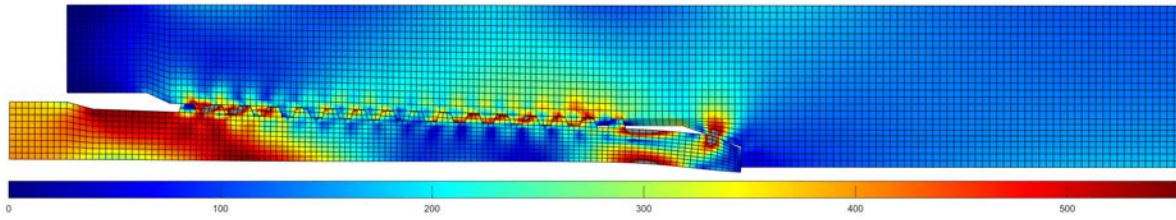
Figura 38. Estado de esfuerzos de von Mises $F = Obj_1 \quad P = P_{max}$



(a) Individuo x_3



(b) Individuo x_9



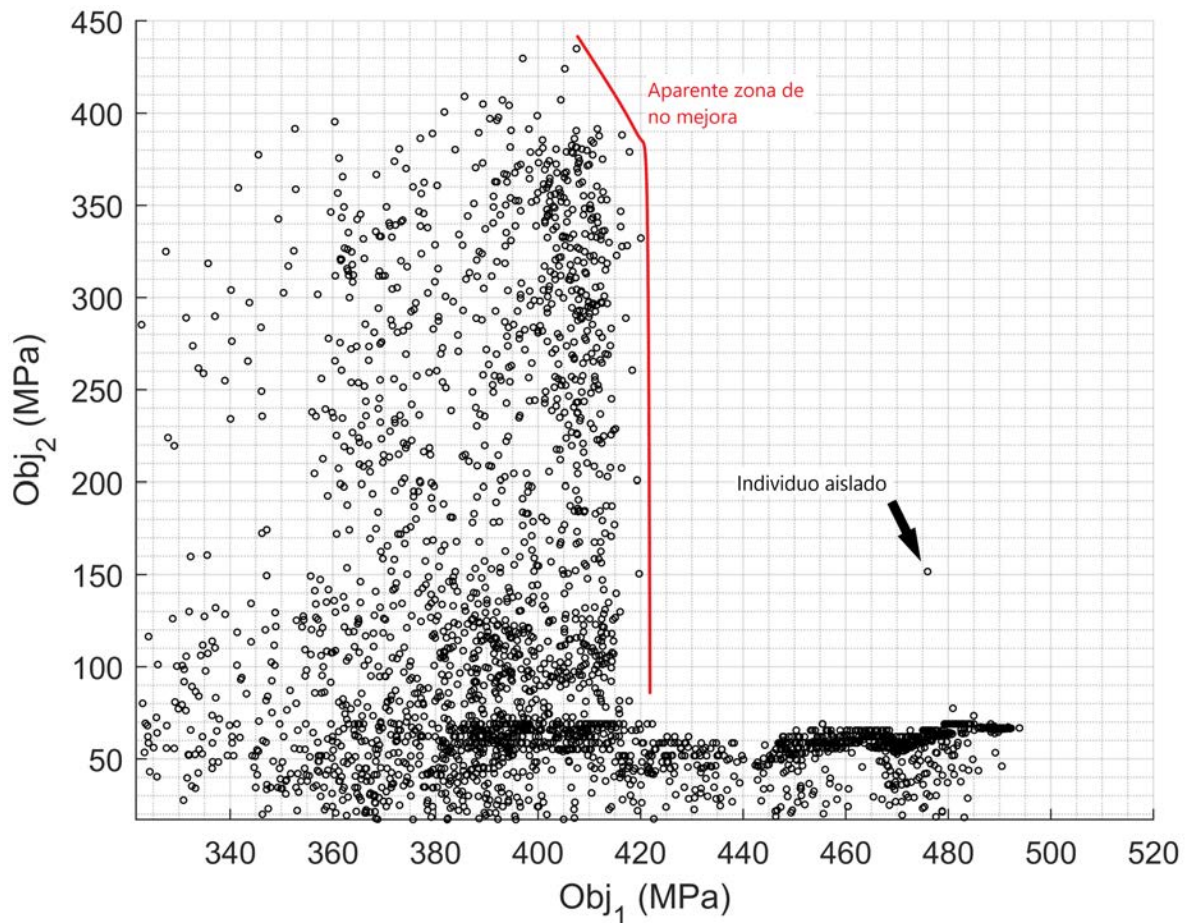
(c) Individuo x_{18}

Fuente: elaboración propia

7.2 DESEMPEÑO DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

El algoritmo que presentó mejor desempeño en el problema tratado fue el SPEA2, obteniendo los mejores resultados en las primeras 10 corridas con individuos iniciales aleatorios, además de obtener los mejores resultados en la última corrida con los mejores individuos iniciales seleccionados (ver Tabla 9). Un factor determinante en el desempeño de los algoritmos es la capacidad de salir de un mínimo local. En el presente estudio se identifica una zona en las primeras corridas donde al parecer Obj_1 no mejora, sin embargo, se empiezan a observar individuos aislados que salen de esa zona como se observa en la Fig. 39. La posibilidad de salir de esta zona mejora a Obj_1 al final de las corridas en aproximadamente un 20% (ver Fig. 35).

Figura 39. Diagrama de dispersión Obj_1 vs Obj_2 , primeras 3 corridas de ambos algoritmos



Fuente: elaboración propia

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el propósito de optimizar la carga admisible a tracción y la hermeticidad en el diseño de una conexión roscada *API 3 $\frac{1}{2}$ NU* se ha aplicado una metodología de optimización conjunta usando algoritmos metaheurísticos y el análisis de elementos finitos. El modelo básico de la unión roscada se definió implementando todos los parámetros geométricos necesarios para la definición de la geometría nominal. Se desarrolló y evaluó un modelo mediante el método de los elementos finitos el cual es capaz de replicar el comportamiento mecánico y así mediante métricas analizar la carga admisible a tracción y la hermeticidad del modelo geométrico. La métrica para evaluar la máxima carga que soporta la conexión fue definida en base al conocimiento y experiencia propia y puede ser complementada o mejorada, al igual que la métrica de hermeticidad, teniendo en cuenta las zonas de deformación plástica y haciendo uso de normativa existente para la evaluación del desempeño de conexiones roscadas como lo es la norma *ISO 13679* [32]. Debido a los tiempos de cómputo requeridos en cada simulación se analizó la exactitud y el costo computacional del modelo por elementos finitos y así se determinó que, debido al tiempo de ejecución planeado en el presente trabajo, un tamaño global de malla igual a 0,7 era adecuado para la implementación conjunta con las técnicas de optimización.

Se implementaron las técnicas metaheurísticas NSGAI y SPEA2. En cada técnica se definió un problema de optimización donde se maximizan la carga a tracción que soporta la tubería y la presión interna que puede soportar la junta sujeta a la máxima carga a tracción. Las técnicas se implementaron tomando como variables de entrada 13 parámetros geométricos del modelo de la conexión en un entorno de programación, haciendo posible la evaluación de las funciones objetivo a través del método de los elementos finitos sin necesidad de la intervención del usuario. Las variables de entrada y las funciones objetivo de los resultados obtenidos se analizaron para compararlos con la conexión *API 3 $\frac{1}{2}$ NU*, así se definió que, de los resultados obtenidos en el grupo de individuos no dominados, 16 de ellos presentan un mejor desempeño que la conexión estándar. Dentro del análisis realizado se pudo observar que dentro de los diseños obtenidos la carga máxima a tracción es la característica mecánica evaluada que tiene menor variación, llegando a suponer que existen mayores limitantes en la mejora de este aspecto; a pesar de esto se obtuvieron buenos resultados logrando mejorar la resistencia de carga a tracción en al menos un 25 % soportando en todos una carga de presión interna mínima equivalente al 59 % de la carga de colapso de la tubería. Otros aspectos importantes encontrados en el análisis fueron:

- El paso de rosca fue la variable que tuvo menor variación en los resultados de la optimización. Un estudio con otros valores nominales de conexión de tubería

podría determinar su relevancia en el comportamiento mecánico de la junta.

- La variable que define el *StandOff* es la que tuvo mayor variación en los resultados estableciendo un valor medio aproximado equivalente a 5 vueltas de rosca en el procedimiento de precarga. Es necesario para estudios futuros tener consideraciones adicionales en esta variable, como lo son el procedimiento de manufactura y los tiempos de instalación, debido a que tiene una gran influencia en ellos y son importantes en el diseño de la conexión.
- Se obtuvieron los mejores resultados con los menores valores establecidos en la altura del hilo de rosca, lo cual puede significar posibles mejoras en la conexión si se contemplan límites de diseño inferiores en estas variables.
- Al considerar en las métricas zonas permisibles con deformaciones plásticas se obtuvieron resultados donde se presentaban zonas críticas con estados de esfuerzo por encima del esfuerzo de fluencia. Este mismo aspecto permitió que en algunos de los diseños obtenidos no se cumpla el diámetro interno mínimo de la tubería. Para futuros trabajos es posible tener en cuenta estas deformaciones finales dentro de las restricciones debido a que en la práctica estas deformaciones pueden presentar violaciones en la operación de las juntas.

Para evaluar la eficiencia de las técnicas de optimización se analizó el desempeño de los dos algoritmos mediante la métrica de hipervolumen, donde se identificó que el SPEA2 presentó el mejor desempeño tanto con una población inicial aleatoria como con una población inicial seleccionada. Un estudio de sensibilidad del algoritmo de optimización aplicado a ese problema puede establecer valores más adecuados en los parámetros iniciales y así llegar a menores tiempos en la convergencia a soluciones suficientemente “buenas”.

Con la implementación desarrollada en el presente documento es posible en futuros trabajos evaluar el desempeño de conexiones con diferentes tamaños nominales, diferentes materiales y diferentes técnicas de manufactura, así como establecer y analizar más variables de entrada que fueron establecidas como parámetros en el presente trabajo. Las técnicas de optimización implementadas también pueden ser adaptadas para realizar no solo la optimización dimensional de la conexión roscada sino también la optimización de forma de la misma. Otro uso posible de la metodología implementada, y que puede también ser objeto de estudio en futuros trabajos, es analizar el diseño en detalle de conexiones roscadas, identificando puntos críticos de operación cuando se tienen en cuenta las variaciones de la geometría debidas a tolerancias geométricas y dimensionales en el proceso de manufactura.

Por último, cabe resaltar que esta metodología desarrollada puede ser adoptada en el diseño de muchos otros componentes mecánicos. Es decisión del diseñador determinar cuándo es adecuada la implementación de esta metodología conforme a la complejidad y la necesidad en su problema de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Mohr, J. Wang, G. Ellem, J. Ward, and D. Giurco, “Projection of world fossil fuels by country,” *Fuel*, vol. 141, pp. 120–135, 2015.
- [2] J. Bellarby, ed., *Well Completion Design*, vol. 56 of *Developments in Petroleum Science*. Elsevier, 2009.
- [3] J. Van Wittenberghe, J. De Pauw, P. De Baets, W. De Waele, W. Ost, G. De Roeck, and T. Bui, “Fatigue investigation of threaded pipe connections,” *Sustainable Construction and Design*, vol. 1, no. 1, p. 182, 2010.
- [4] Tenaris, “La importancia de los tubos en la industria energética.” [Online]. Disponible en: http://www.tenaris.com/~media/Files/ProductLiterature/Institutional/WPM_ESPNew.ashx?sc_lang=es-ES, Abril 2013. Accedido 06-05-2018.
- [5] D. A. Parra Contreras and O. J. Maldonado Torrado, *Estudio de prefactibilidad para la creación de una empresa de fabricación de conexiones API y PREMIUM en tuberías de producción para el sector de OIL & GAS*. Pgdip project, Universidad Nacional de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.
- [6] Y. Hirano, T. Maguchi, K. Kobayashi, K. Yamamoto, K. Ueno, and J. Duxbury, “Development of premium threaded connection “FOX”,” Tech. Rep. 19, Kawasaki Steel, 1988.
- [7] A. Assanelli and E. Dvorkin, “Finite element models of octg threaded connections,” *Computers & Structures*, vol. 47, no. 4, pp. 725–734, 1993.
- [8] K. Macdonald and W. Deans, “Stress analysis of drillstring threaded connections using the finite element method,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 2, no. 1, pp. 1–30, 1995.
- [9] I. Elinger and K. Váradi, “Shape optimization of threaded plastic caps by FEM,” *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, vol. 39, no. 3-4, pp. 211–224, 1995.
- [10] J.-J. Chen and Y.-S. Shih, “A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 191, no. 2, pp. 109–116, 1999.
- [11] A. Yamamoto, “The theory and computation of thread connection,” *Youkendo, Tokyo*, 1980.
- [12] Y. Guangjie, Y. Zhenqiang, W. Qinghua, and T. Zhentong, “Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 8, pp. 1275–1284, 2006.
- [13] J. Van Wittenberghe, P. de baets, J. Degrieck, and W. De Waele, “Fatigue behaviour of threaded pipe connections.” No publicado, 2007.

- [14] F. Cui, W. Li, G. Wang, Z. Gu, and Z. Wang, “Design and study of gas-tight premium threads for tubing and casing,” *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 133, pp. 208–217, 2015.
- [15] R. R. Porcaro, L. C. Cândido, V. B. Trindade, G. L. d. Faria, and L. B. Godefroid, “Evaluation of Standard API Casing Connections and Parametric API Buttress Improvement by Finite Element Analysis,” *Materials Research*, vol. 20, pp. 130–137, 2017.
- [16] N. Ahsan, *OCTG Premium Threaded Connection 3D Parametric Finite Element Model*. Ms thesis, Virginia Tech, Blacksburg, Estados Unidos, 2016.
- [17] K. Yan, *The Abaqus/CAE Plug-in for Premium Threaded connection 3D parameter Finite Element Model*. Ms thesis, Virginia Tech, Blacksburg, Estados Unidos, 2017.
- [18] J. C. M. Uribe, R. Carrazedo, and A. T. Beck, “Leakage resistance envelopes of API 8 round casing connections using fe analysis,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, 2019.
- [19] M. Abdel-Basset, L. Abdel-Fatah, and A. K. Sangaiah, “Chapter 10 - metaheuristic algorithms: A comprehensive review,” in *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications* (A. K. Sangaiah, M. Sheng, and Z. Zhang, eds.), Intelligent Data-Centric Systems, pp. 185–231, Academic Press, 2018.
- [20] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, vol. 16. John Wiley & Sons, 2001.
- [21] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [22] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, “Spea2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm,” *TIK-report*, vol. 103, 2001.
- [23] K. Deb, “An efficient constraint handling method for genetic algorithms,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 186, no. 2, pp. 311–338, 2000.
- [24] K. Deb and R. B. Agrawal, “Simulated binary crossover for continuous search space,” *Complex systems*, vol. 9, no. 2, pp. 115–148, 1995.
- [25] K. Kostas, A. Ginnis, C. Politis, and P. Kaklis, “Shape-optimization of 2D hydrofoils using an isogeometric BEM solver,” *Computer-Aided Design*, vol. 82, pp. 79–87, 2017. Isogeometric Design and Analysis.
- [26] A. Gauchía, B. Boada, M. Boada, and V. Díaz, “Integration of MATLAB and ANSYS for advanced analysis of vehicle structures,” in *MATLAB* (K. Bennett, ed.), ch. 7, IntechOpen, 2014.
- [27] American Petroleum Institute, API Specification 5B, *Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads*, 16 ed., 2017.

- [28] American Petroleum Institute, API Specification 5CT, *Specification for Casing and Tubing*, 8 ed., 2005.
- [29] M. K. Thompson and J. M. Thompson, *ANSYS mechanical APDL for finite element analysis*. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [30] W. Ramberg and W. R. Osgood, “Description of stress-strain curves by three parameters,” Tech. Rep. 902, National Advisory Committee for aeronautics, 1943.
- [31] American Petroleum Institute, API TR 5C3, *Calculating Performance Properties of Pipe Used as Casing or Tubing*, 7 ed., 2018.
- [32] International Organization for Standardization, ISO 13679, *Petroleum and natural gas industries — Procedures for testing casing and tubing connections*, 2 ed., 2019.