

# Diseño Automatizado Y Optimización De Carcasas Soldadas Para Reductores De Velocidad Mediante Simulación Basada En Elementos Finitos

**Rosendo Franco Rodríguez<sup>1</sup>, Gustavo Roberto Li Dejo<sup>1</sup>, Herbert Yépez Castillo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú. E-mail: rofranco@pucp.edu.pe, g.li@pucp.edu.pe, hyepe@pucp.edu.pe

## Resumen

En el presente trabajo se propone una solución específica para el diseño de carcasas soldadas utilizadas en reductores de velocidad de ejes paralelos y engranajes cilíndricos de una, dos y tres etapas, logrando un alto nivel de automatización. La solución consiste en una base de datos de carcasas tipificadas y parametrizadas según el número de etapas del reductor y de los espesores de plancha, entre otras consideraciones. Estas carcasas sirven como plantillas para alimentar un algoritmo que cuenta con un procedimiento de cálculo y diseño basado en recomendaciones recogidas en la literatura especializada. Además, para el cálculo de tensiones y deformaciones, el algoritmo incorpora el análisis por elementos finitos. Luego, mediante un proceso iterativo, el algoritmo minimiza el volumen de material utilizado en la carcasa, basado en espesores normalizados de planchas y asegurando un factor de seguridad definido por el usuario. El algoritmo ha sido implementado como un complemento en el entorno de la plataforma CAD comercial Autodesk Inventor y se ha verificado mediante cálculos analíticos de varios casos de estudio.

**Palabras clave:** carcasas soldadas, parametrización, optimización, elementos finitos.

## Abstract

In the present work, a specific solution for the design of welded housings used in one, two and three stages speed reducers with parallel shafts and cylindrical gears, achieving a high level of automation, is proposed. The solution consists of a database of standardized and parameterized housings according to the number of stages of the reducer and the thickness of the plate, among other considerations. These housings serve as templates to feed an algorithm that has a calculation and design procedure based on recommendations collected in the specialized literature. In addition, for the calculation of stresses and strains, the algorithm incorporates finite element analysis. Then, through an iterative process, the algorithm minimizes the volume of material used in the housings, based on standardized plate thicknesses and ensuring a user-defined safety factor. The algorithm has been implemented as a plug-in in the Autodesk Inventor commercial CAD platform environment and has been verified by analytical calculations of several case studies.

**Keywords:** welded housings; parametrization; optimization; finite elements.

## 1. Introducción

Los reductores de velocidad son ampliamente utilizados en la industria, en la mayoría de máquinas accionadas por un motor que requieren una velocidad de entrada menor a la de este. Uno de los componentes principales de estos equipos es la carcasa, encarga de alojar sus componentes internos y de soportar las

cargas que estos generan. Los diseños de las carcasas varían dependiendo del fabricante, pues no existe una normativa que respalde un determinado modelo y muchas veces las formas constructivas y dimensiones son empíricas. Autores como Rackov (2018) concluyen que inclusive en los diseños de carcasas más sofisticados se prioriza su estética, de manera que aparenten un diseño moderno. No existe un modelo

preferido del cual partir y se debe de evitar formas constructivas complejas e innecesarias. Lo más importante en el diseño de una carcasa es que esta cumpla con todos los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento.

La configuración y el dimensionamiento principal de la carcasa es la tarea más compleja en su proceso de diseño. Para este fin, se encuentran algunas recomendaciones en la literatura. Por ejemplo, Réshetov (1971) dimensiona las carcasas fundidas principalmente en función a la distancia entre centros. Asimismo, una de las principales causas de falla de los reductores de velocidad es el desalineamiento de los árboles, pues esto genera cargas no previstas en los alojamientos que eventualmente pueden ocasionar una falla por fatiga (Strokes, 1992). El desalineamiento de los árboles se puede deber a un mal contacto entre las superficies de la tapa y la base de la carcasa o al desalineamiento de los agujeros de las uniones atornilladas que las unen. Estos aspectos también deben ser considerados en el diseño de las carcasas.

El método de fabricación de carcasas más utilizado es la fundición, lo cual implica el uso de una misma carcasa para un determinado rango de potencias. Además, como ya se ha mencionado, a diferencia de otros elementos de máquina, no se cuenta con una metodología o normativa para el diseño de carcasas. Por todo ello, las carcasas diseñadas suelen ser sobredimensionadas, siendo de gran utilidad una solución que permita sistematizar su diseño y evitar su sobredimensionamiento. En tal sentido, en los siguientes acápite se describe una propuesta específica para el diseño automatizado de carcasas soldadas, utilizadas en reductores de velocidad de engranajes cilíndricos, ejes paralelos y disposición horizontal, de una, dos y tres etapas.

## 2. Metodología

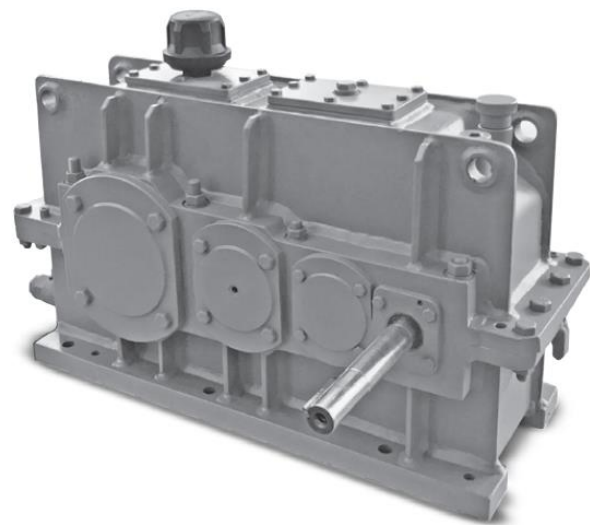
La metodología para de diseño automatizado de las carcasas soldadas objeto del presente estudio consta de las siguientes fases:

- 1) Tipificación y parametrización de las carcasas: comprende la configuración geométrica de las carcasas, así como la identificación de las variables independientes y dependientes que definen todas sus dimensiones.
- 2) Modelado FEM de las carcasas soldadas: se realiza la simplificación del modelo CAD y todas las consideraciones necesarias para el análisis mediante el método de los elementos finitos (FEM), incluyendo un análisis preliminar para afinar la tipificación realizada.
- 3) Algoritmo para la automatización y optimización del diseño: se definen la función objetivo, las variables de

diseño y las restricciones para la optimización de las carcasas. Además, se implementa el algoritmo para la automatización del proceso de diseño.

### 2.1. Tipificación y parametrización de las carcasas

La tipificación de las carcasas soldadas se realiza en base a tres aspectos fundamentales: número de etapas, tipo de nervio y posición relativa entre la entrada y la salida. El número de etapas depende de la relación de transmisión requerida, siendo el alcance del presente trabajo los reductores de velocidad de una, dos y tres etapas. Los nervios rigidizadores se colocan alineados con los alojamientos o apoyos de los rodamientos y se determinan en función de la magnitud de las cargas que se transmiten a la carcasa. Se identificaron cuatro formas constructivas principales: sin nervio, nervio simple, nervio doble y nervio cerrado. En un mismo reductor de velocidad se pueden combinar diferentes tipos de nervios. La conexión del árbol de entrada al motor y la conexión del árbol de salida a la máquina pueden estar en el mismo lado o en lados opuestos de la carcasa. En la Figura 1 se aprecia un reductor de velocidad para grúas del fabricante ELECON ENGINEERING CO. LTD. (Elecon, s.f.). En este caso se trata de una carcasa soldada para tres etapas, que combina nervios simples y dobles, y la entrada está en el lado opuesto a la salida.



**Figura 1.** Carcasa de tres etapas, con nervios simples y dobles, entrada y salida en lados opuestos (Elecon, s.f.).

De acuerdo con los tres aspectos descritos anteriormente, se estableció la tipificación para las carcasas soldadas que se muestra en la Tabla 1. De esta manera, la configuración de una carcasa se puede obtener combinando las cuatro columnas de la tabla. Por ejemplo, podría configurarse una carcasa para tres etapas, con nervio simple en la base del primer y segundo alojamiento, con nervio doble en la base del tercer alojamiento y nervio simple en todos los

alojamientos de la tapa, con entrada y salida en lados opuestos.

**Tabla 1.** Tipificación de las carcasas soldadas.

Número de etapas	Tipo de nervio	Ubicación del nervio	Entrada y salida
Una etapa	Sin nervio	En la base	Mismo lado
Dos etapas	Nervio simple	En la tapa	Opuestos
Tres etapas	Nervio doble	En x alojamiento	
	Nervio cerrado		

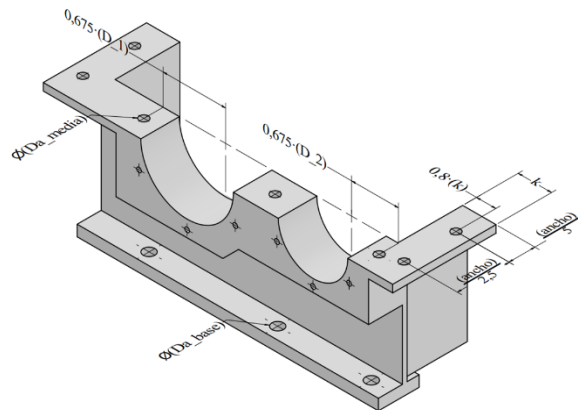
Las dimensiones de la carcasa se establecen a partir de ciertos parámetros de entrada, a los que se les denomina variables independientes. Los valores de las variables independientes son definidos por el diseñador o se determinan a partir de ciertos cálculos preliminares. Los valores del resto de parámetros, llamados variables dependientes, se obtienen a partir de las variables independientes. Por lo tanto, las dimensiones de la carcasa estarán completamente definidas una vez que se tengan todos los valores de las variables independientes. A continuación, se relacionan los parámetros de entrada o variables independientes definidas para la parametrización de las carcasas soldadas tipificadas en el presente trabajo.

- 1) Distancias entre centros
- 2) Diámetros exteriores de engranajes
- 3) Ancho interno
- 4) Espesor de planchas laterales
- 5) Espesor de nervios
- 6) Diámetros exteriores de rodamientos
- 7) Anchos de rodamientos
- 8) Diámetro de tornillos de tapas laterales
- 9) Diámetro de agujeros de unión base-tapa
- 10) Diámetro de agujeros de anclaje
- 11) Diámetro de tapón de vaciado
- 12) Diámetro para varilla de nivel de aceite
- 13) Diámetro de agujeros para izaje
- 14) Posición entre la entrada y la salida

A partir de la tipificación presentada en la Tabla 1 se podría generar una gran cantidad de configuraciones y sería poco práctico elaborar un modelo CAD para cada una de ellas. Por este motivo, se optó por elaborar tres modelos paramétricos flexibles capaces de representar carcasas de una, dos y tres etapas. Los nervios rigidizadores se configuran de manera opcional, abarcando los cuatro casos tipificados. Además, la posición entre la entrada y la salida solo tiene efecto en el análisis de las cargas, pues la geometría de la carcasa es simétrica.

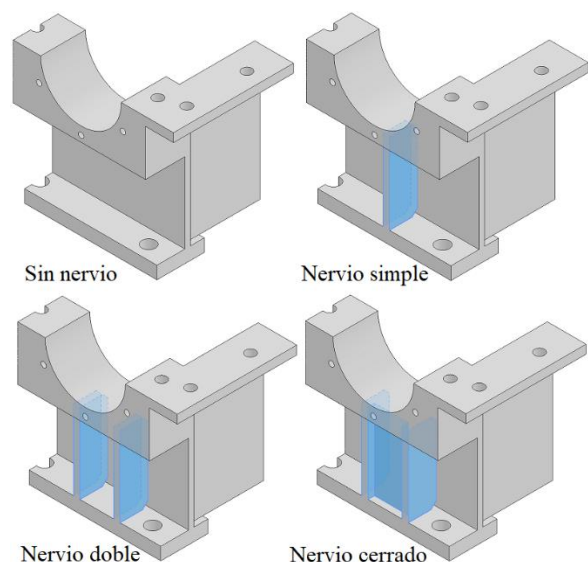
La parametrización se inicia con la definición de los alojamientos. Se recomienda que estos se fabriquen en

un solo bloque para evitar imperfecciones en su geometría, especialmente en la distancia entre centros y en las superficies de contacto entre la base y la tapa. De acuerdo con recomendaciones de la literatura se establecieron las variables dependientes en función de los parámetros de entrada. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se puede apreciar el modelo parcial de la base de la carcasa soldada de una etapa, aun sin nervios, con la indicación de algunos de los parámetros. Se muestra solo la mitad pues, como ya se indicó, es una pieza simétrica.



**Figura 2.** Modelo parcial de la base de la carcasa soldada de una etapa, sin nervios.

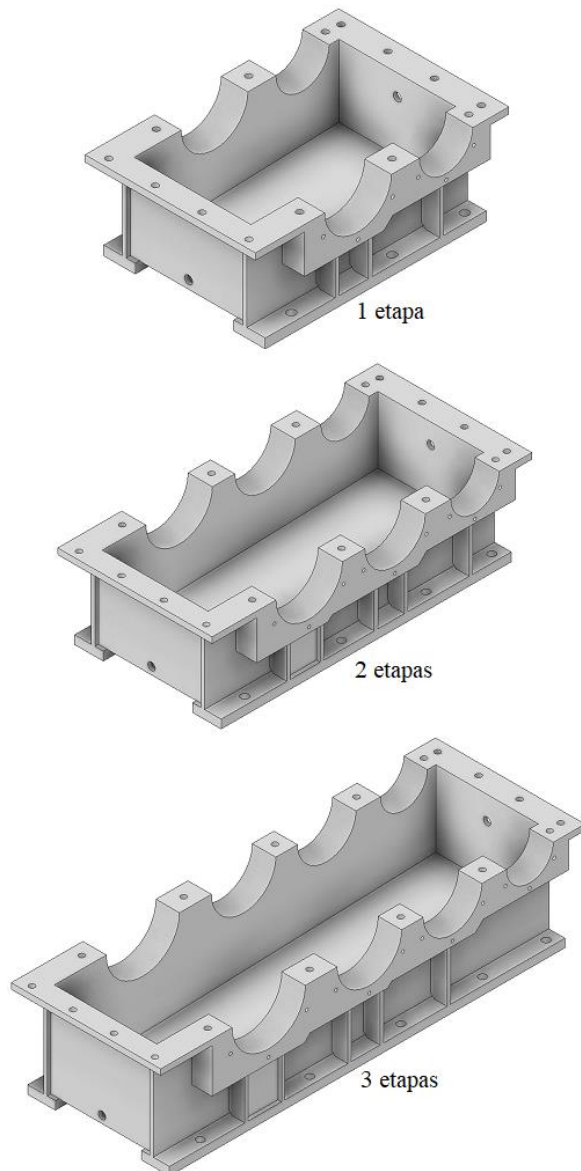
Los nervios de la base se ubican de manera simétrica al diámetro del alojamiento y sus espesores dependerán de la carga que vayan a soportar. En la Figura 3 se muestra la colocación de los nervios rigidizadores tipificados para el alojamiento del árbol de entrada.



**Figura 3.** Árboles de salida con unión por chavetas y unión estriada.

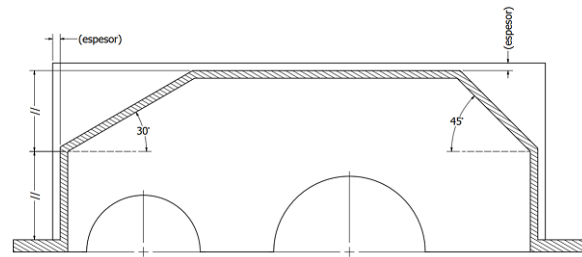
Una vez concluido el proceso de parametrización, se obtuvieron los modelos CAD parametrizados de las

bases de las carcasas soldadas para una, dos y tres etapas. En la Figura 4 se muestran estos modelos para una cierta configuración de nervios rigidizadores, los cuales se pueden modificar según sea necesario.



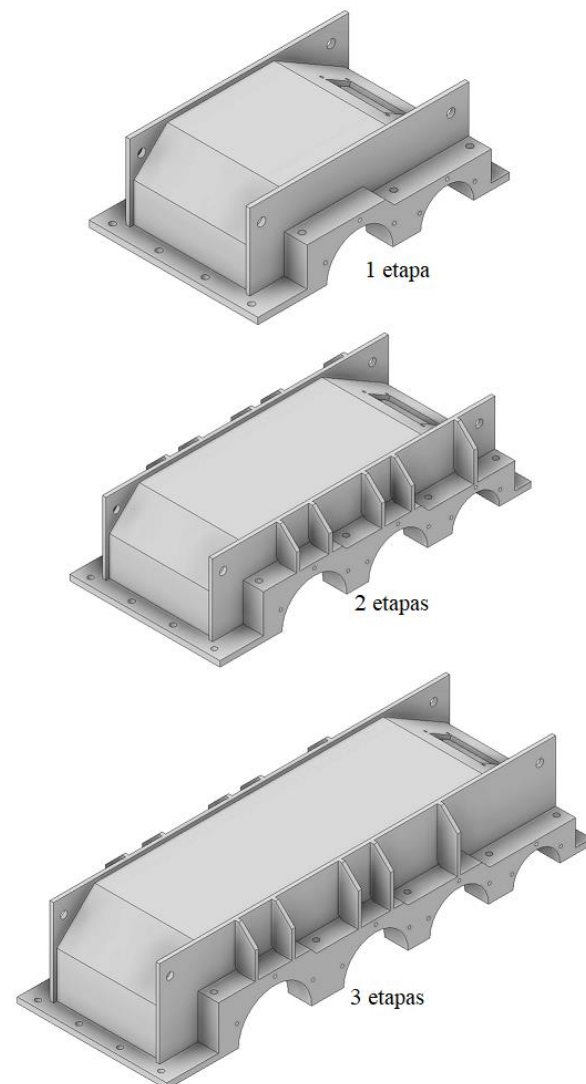
**Figura 4.** Modelos CAD parametrizados de las bases de las carcasas soldadas de una, dos y tres etapas.

Para el diseño de las tapas de las carcasas soldadas se siguió un procedimiento similar al utilizado en las bases. En el caso de las planchas laterales se utilizó una forma trapezoidal, ya que facilita el proceso de soldadura y disminuye el volumen de la carcasa. El trapecio tiene una construcción asimétrica pues el engrane de salida suele tener mayor diámetro que el piñón de entrada. Similar a las planchas laterales de la base, en la tapa las planchas laterales sobresalen una distancia igual al espesor de las mismas, respecto a los bordes exteriores, para colocar el cordón de soldadura, tal como se puede observar en la Figura 5.



**Figura 5.** Forma trapezoidal de la tapa de la carcasa soldada de una etapa.

La configuración de los nervios rigidizadores en la tapa de la carcasa es similar a la base, pero se añade un chaflán para evitar los bordes con filo. Además, en la tapa se agrega la mira de inspección en la plancha inclinada que está del lado de la entrada y 4 agujeros de izaje en las planchas laterales. En la Figura 6 se muestran los modelos CAD de las tapas de las carcasas soldadas para una, dos y tres etapas.

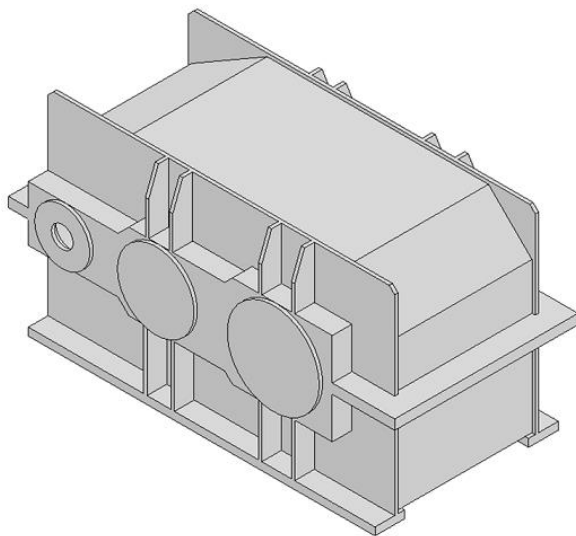


**Figura 6.** Modelos CAD parametrizados de las tapas de las carcasas soldadas de una, dos y tres etapas.

## 2.2. Modelado FEM de las carcasas soldadas

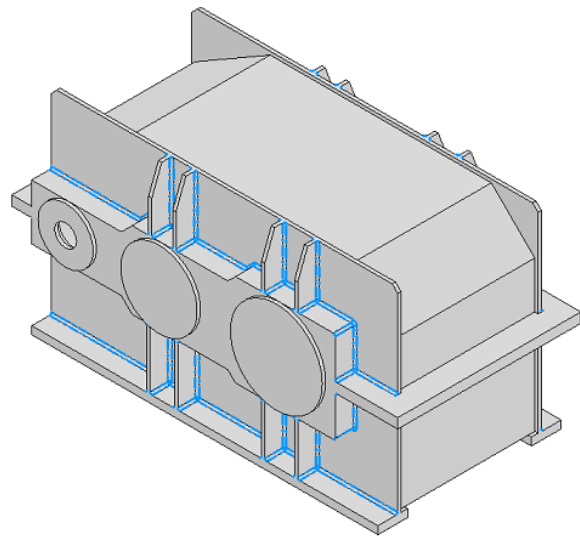
En la segunda fase de la metodología se elaboran los modelos CAD simplificados para la realización del modelado mediante elementos finitos. Asimismo, se establece una estrategia de mallado que garantiza la convergencia de los resultados. Posteriormente, se realiza un estudio preliminar para mejorar la geometría de la carcasa y reducir el número de casos a analizar.

La simplificación del modelo CAD para la simulación consistió en eliminar todos los agujeros de sujeción, eliminando así la necesidad de realizar mallados muy finos en zonas que no son críticas, aspecto que se verificó en algunos análisis previos. El modelo simplificado de la carcasa de dos etapas se muestra en la Figura 7. Para la discretización o mallado se utilizaron elementos tetraédricos de orden parabólico, de manera tal que la malla representa adecuadamente las superficies curvas, como por ejemplo los alojamientos. El material utilizado es acero ASTM A36, pero se podría usar otros aceros de buena soldabilidad si así se desea. Por otro lado, teniendo en cuenta que la unión entre la base y la tapa es bastante rígida, se optó por modelar la base y la tapa como una única pieza.



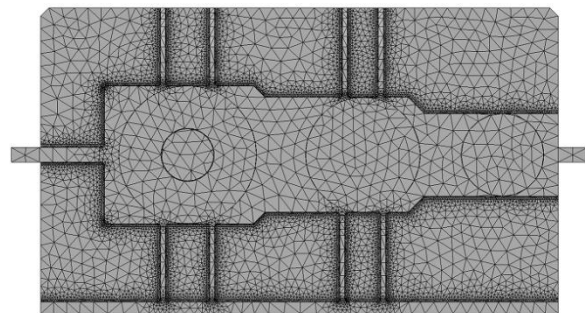
**Figura 7.** Modelo CAD simplificado para el análisis FEM.

Para evitar los concentradores de tensión ficticios que se generan en las zonas de singularidad, como las aristas donde se unen las planchas a  $90^\circ$ , se realizaron radios de redondeo. Estos radios de redondeo tienen la misma dimensión que el cateto de soldadura correspondiente, por lo que esta modificación trae consigo un modelo más cercano a la realidad. Los redondeos se añadieron solamente en las zonas críticas de los cordones de soldadura exteriores de las planchas laterales y en los nervios rigidizadores. En la Figura 8 se muestran resaltadas en color azul las aristas que han sido redondeadas.



**Figura 8.** Aristas redondeadas en las zonas críticas.

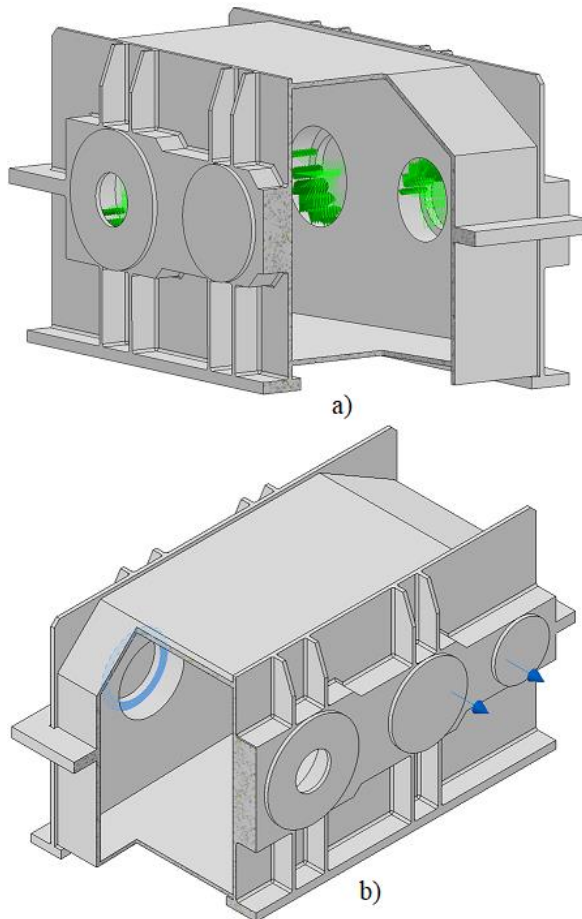
Se estableció una estrategia de mallado general, luego de realizar un análisis de convergencia para distintos casos. Los resultados mostraron que existe una relación entre el tamaño de malla y la geometría de la carcasa para el cual los resultados convergen. De esta manera, se encontró que el tamaño de malla en los redondeos críticos, ubicados en los nervios rigidizadores, puede ser igual al cateto de soldadura dividido entre 2,7. Para el resto de redondeos no críticos se estableció un tamaño de malla igual al cateto de soldadura dividido entre 1,7. Asimismo, para el tamaño de malla global se determinó que este puede obtenerse al dividir el largo de la base de la carcasa entre 40,5. Con estos valores se garantiza que los resultados convergen con una precisión no menor al 5%. En la Figura 9 se muestra el mallado obtenido con la estrategia descrita.



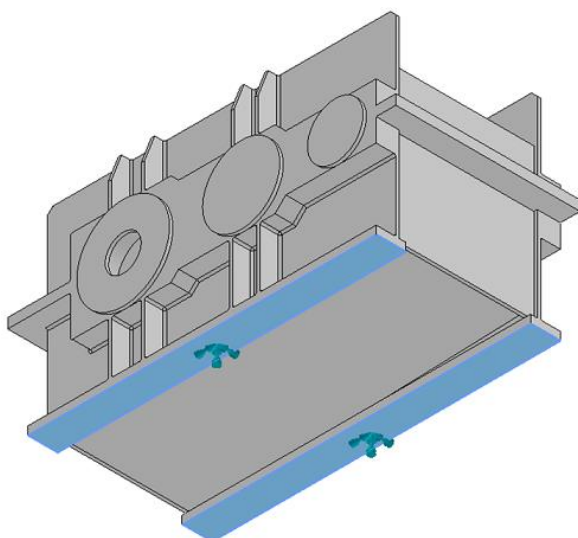
**Figura 9.** Mallado de la carcasa.

Las cargas ejercidas sobre la carcasa son transmitidas desde los engranajes, a través de los árboles y los rodamientos, hacia los alojamientos de la carcasa. Para las cargas radiales resultantes se utiliza una carga distribuida sinusoidal, según el manual de usuario (Autodesk, 2021), tal como se muestra en la Figura 10a. Las cargas axiales se distribuyen de manera

uniforme en las caras planas correspondientes de las tapas laterales, tal como se muestra en la Figura 10b. Como condición de contorno se consideró fija la base de la carcasa, como se muestra en la Figura 11.

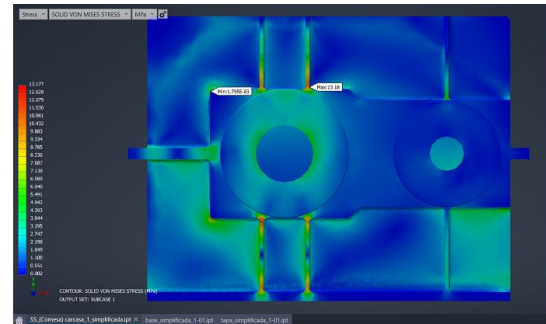


**Figura 10.** Cargas sobre la carcasa, a) radiales y b) axiales.

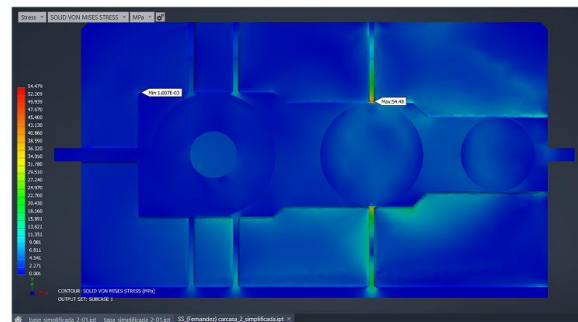


**Figura 11.** Restricción de desplazamientos en la base de la carcasa.

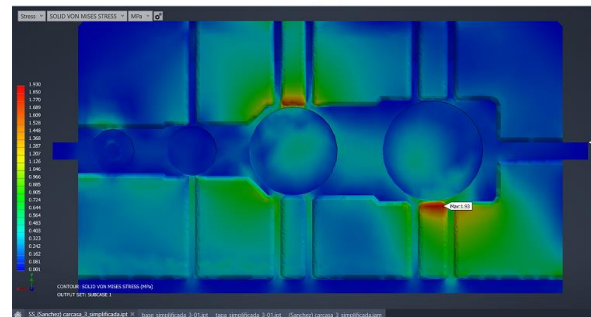
Durante el estudio se obtuvieron múltiples resultados, los cuales sirvieron para mejorar el modelo de la carcasa. En este sentido se logró establecer una sola configuración para la distribución de los nervios rigidizadores en cada uno de los modelos (una, dos y tres etapas). En la Figura 12 se muestran los resultados con la configuración de nervios final en cada modelo.



a) 1 etapa



b) 2 etapas



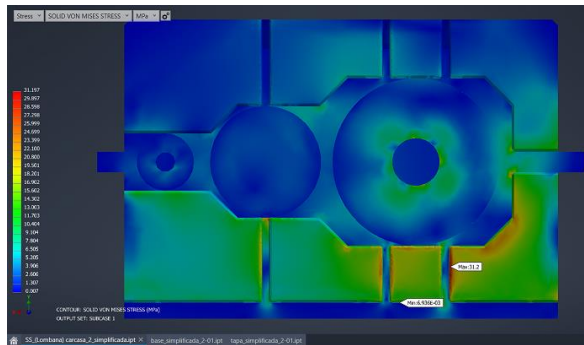
c) 3 etapas

**Figura 12.** Resultados preliminares según la configuración de nervios establecida, a) 1 etapa, b) 2 etapas y c) 3 etapas.

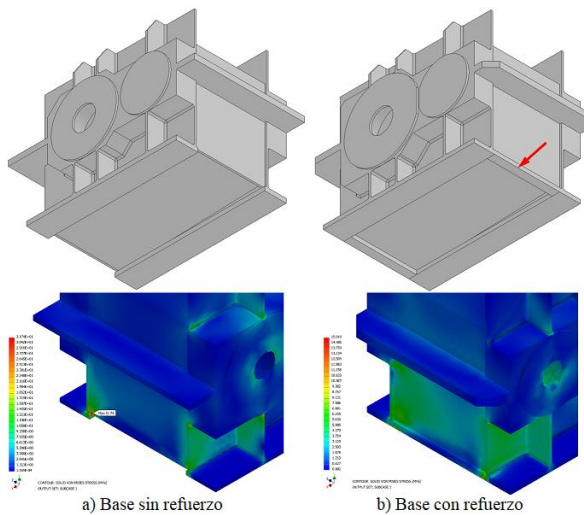
Por otro lado, se encontró que la opción de realizar un chaflán en las esquinas del bloque del alojamiento de salida permite una mejor distribución de las tensiones y una disminución de la tensión máxima. Se comprobó en todos los casos de estudio esta modificación reduce la tensión máxima, por lo que se aplicó en los tres modelos de carcasa. En la figura 13 se observa esta modificación para la carcasa de dos etapas.

Otro aspecto que se observó en varios de los casos analizados fue que la tensión máxima solía ubicarse en la unión entre las planchas verticales transversales y las planchas de anclaje. Para evitar este inconveniente se adicionaron dos planchas de refuerzo, de manera que la

zona de anclaje contara con un contorno cerrado más rígido. En la Figura 14 se muestra una comparación entre el antes y el después de la modificación, donde se observa una mejora en la distribución de las tensiones. Esta modificación también se incorporó en los tres modelos de carcasa.



**Figura 13.** Distribución de tensiones con alojamiento de salida modificado con chaflán.



**Figura 14.** Comparación entre las zonas de anclaje, a) sin refuerzo y b) con refuerzo.

### 2.3. Algoritmo para la automatización del diseño

La optimización del diseño de la carcasa está orientada a los espesores de las planchas utilizadas. Por ello, se establece como función objetivo el volumen de material total de la carcasa, la cual se debe de minimizar. Se entiende que un menor volumen implica un menor consumo de material y por ende una reducción en los costos. La variable de diseño es el espesor de las planchas laterales, ya que el resto de espesores se encuentra parametrizado en función de este espesor. Se trata de una variable discreta, pues los espesores pueden tomar solamente los valores normalizados de las planchas que se venden a nivel comercial.

Dentro de las restricciones de diseño se encuentra el factor de seguridad (F.S.) mínimo, el cual debe garantizar que la estructura de la carcasa no falle durante su funcionamiento. Existen varias fuentes que brindan recomendaciones para este fin. Según Vidosic (1957), entre 2 y 2,5 para materiales promedio que trabajan en condiciones de medio ambiente ordinarias y sujetos a cargas y esfuerzos que pueden calcularse. Por otro lado, el factor de seguridad calculado mediante el productor de coeficientes parciales propuesto por Moszyńsk (1952) permite obtener un factor de seguridad de 2,05. Finalmente, el factor de seguridad calculado mediante el procedimiento propuesto por Pugsley (1966) conduce a un factor de seguridad de 2,46. En base a estas fuentes, el factor de seguridad para las carcasas debería encontrarse dentro del rango de 2 a 2,5. Se definió como valor por defecto 2,5, pero puede ser modificado por el diseñador.

El espesor mínimo es otra restricción de diseño que debe considerarse. Durante los ensayos preliminares se encontraron casos en los que con un espesor de 4 mm se alcanzaba un factor de seguridad por encima de 2,5. Sin embargo, considerando que la mayoría de aplicaciones se dará para equipos de mediana y alta potencia, se estableció como espesor mínimo por defecto 6 mm. Este valor puede ser, igualmente, modificado por el diseñador.

El diagrama de flujo del algoritmo general se puede apreciar en la figura 15. El primer paso es leer todos los parámetros de entrada (variables independientes). Luego se calculan las tensiones equivalentes mediante el modelado FEM y el correspondiente factor de seguridad. El factor de seguridad se compara con el valor mínimo previamente definido y con ello se determina si el diseño actual de la carcasa se encuentra por encima o por debajo del mínimo establecido. En el primer caso se reducirá el espesor de las planchas y se revisará si el nuevo espesor ha sido verificado antes. Si el espesor ha sido verificado anteriormente, entonces se toma como la solución óptima y si no, se vuelve a repetir el análisis FEM. En el segundo caso se aumentará el espesor de las planchas y se revisará si el nuevo espesor ha sido verificado antes. Al igual que en el primer caso, si el espesor ya fue verificado, entonces se toma como la solución óptima y si no, se vuelve a repetir el análisis FEM.

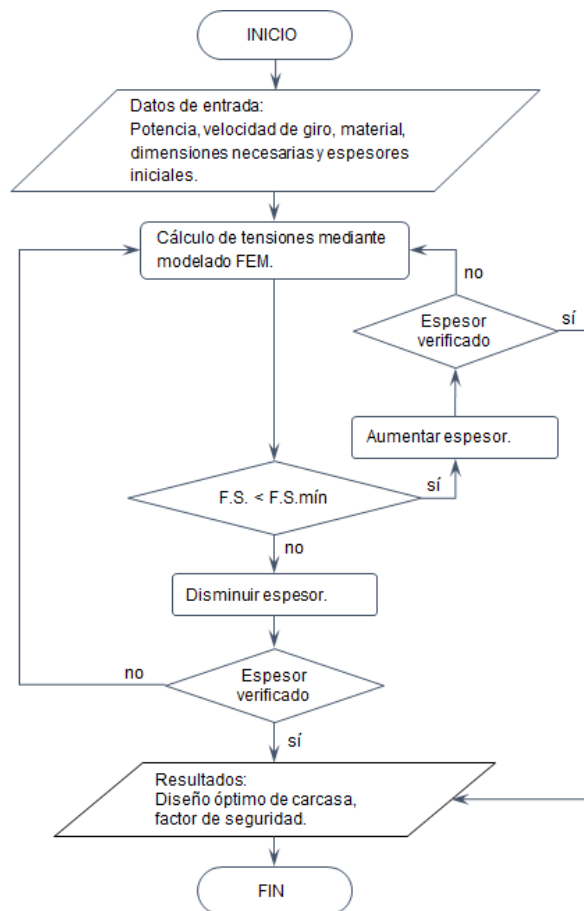


Figura 15. Diagrama de flujo del algoritmo general.

### 3. Resultados

El algoritmo fue implementado en el lenguaje de programación Visual Basic .NET en Visual Studio, como un complemento (Add-In) para la plataforma CAD Autodesk Inventor. Para el modelado por elementos finitos se utilizó el módulo Autodesk Inventor Nastran mediante la tecnología iLogic de Autodesk Inventor. El programa se probó en algunos ejemplos de aplicación y los resultados fueron comparados con ejemplos reportados en la literatura.

A continuación se presenta, de forma resumida, uno de los ejemplos. En este ejemplo de aplicación se utilizaron los datos del trabajo de Fernández (2018), sobre un reductor de velocidad para el accionamiento de una cinta transportadora de mineral de litio. Se utilizaron las mismas dimensiones principales, tales como los diámetros de los engranajes, dimensiones de los rodamientos, entre otros. El modelo de carcasa de la referencia se muestra en la Figura 16. Como se puede apreciar la configuración de la carcasa en este diseño es diferente a las configuraciones tipificadas en el presente trabajo. La principal diferencia es que se utiliza un árbol de entrada de menor longitud que los demás árboles. Debido a ello, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar las nuevas cargas,

considerando todos los árboles de la misma longitud. Sin embargo, las nuevas cargas obtenidas son similares a las iniciales. En la Figura 17 se muestran los datos ingresados al programa desarrollado.

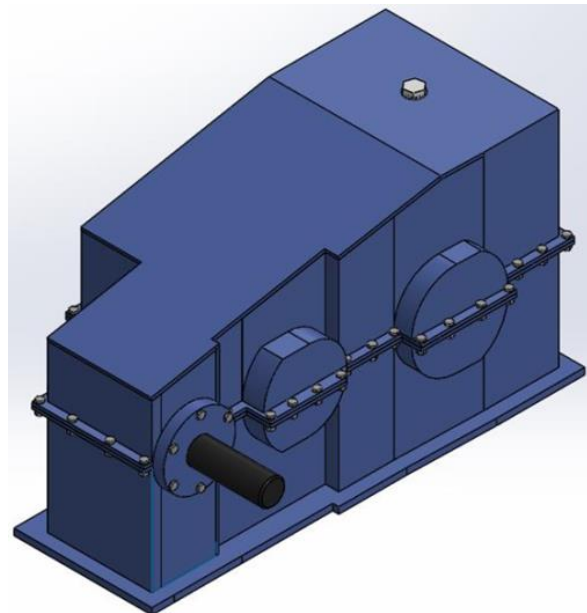


Figura 16. Reductor de velocidad de referencia para el ejemplo de aplicación (Fernández, 2018).

**Edit Parameters**

General parameters		1st stage	
Input-output shaft position	Opposites side 2	Pinion tooth number	27
Number of reduction stages	2	Gear tooth number	76
Case parameters		Module	3 mm
Internal width	250 mm	Helix angle	25 deg
Input shaft diameter	40 mm	2nd stage	
Output shaft diameter	65 mm	Pinion tooth number	26
Drain hole diameter	25 mm	Gear tooth number	71
Breather hole diameter	25 mm	Module	4 mm
Bearing width	42 mm	Helix angle	25 deg
Bearing outer diameter 1	72 mm	3rd stage	
Bearing outer diameter 2	100 mm	Pinion tooth number	
Bearing outer diameter 3	120 mm	Gear tooth number	
Bearing outer diameter 4		Module	
		Helix angle	

**Edit Forces**

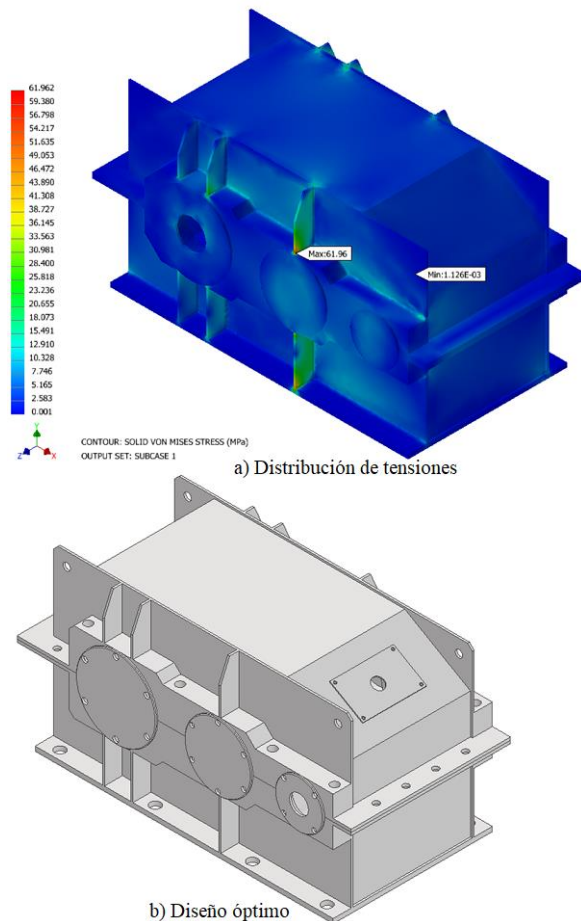
Input shaft		Intermediate shaft 1	
Side 1	Side 2	Side 1	Side 2
Fx 1057.3 N	Fx 1878.9 N	Fx 7148 N	Fx -3579.5 N
Fy 1257.6 N	Fy 6953.8 N	Fy -12530.7 N	Fy -10977.7 N
Fz 3409.3 N	Fz 0 N	Fz 4143.5 N	Fz 0 N
Output shaft		Intermediate shaft 2	
Side 1	Side 2	Side 1	Side 2
Fx -237.27 N	Fx -5267.43 N	Fx	Fx
Fy 11273 N	Fy 4923.9 N	Fy	Fy
Fz 0 N	Fz 7352.8 N	Fz	Fz

Figura 17. Ventanas de datos correspondientes al ejemplo.

Para resolver el problema, se tomaron en consideración las recomendaciones establecidas para el F.S. (2,5) y las restricciones de diseño. Los resultados de la distribución de tensiones obtenidas por el modelado



FEM se muestran en la Figura 18a y el diseño detallado de la carcasa se muestra en la Figura 18b. Se obtuvo un espesor de planchas laterales de 4 mm, modificando previamente el espesor mínimo por defecto a dicho valor. De esta manera se logró acercar el factor de seguridad al mínimo deseado, obteniéndose un valor de 3,58. La tensión máxima se localiza en los nervios rigidizadores, como se había previsto en los estudios preliminares.



**Figura 18.** Resultados del ejemplo de aplicación, a) distribución de tensiones y b) diseño óptimo.

Al comparar estos resultados con la carcasa de la referencia, se observa que esta utiliza planchas laterales de 5 mm de espesor para la base y la tapa, y 10 mm de espesor para la plancha de anclaje. Los espesores obtenidos por el programa son de 4 mm y 9,5 mm respectivamente, por lo que se puede afirmar que existe coherencia entre ambos diseños.

#### 4. Conclusiones

A través del presente trabajo se ha podido demostrar la factibilidad de desarrollar e implementar un algoritmo con un alto nivel de automatización para diseñar y optimizar el espesor de carcasas soldadas, usadas en reductores de velocidad de engranajes cilíndricos y ejes

paralelos, de una, dos y tres etapas. Un aspecto clave en esta solución es la tipificación y parametrización de las carcasas soldadas que cubren la necesidad planteada. Asimismo, se considera novedosa la automatización del modelado por elementos finitos utilizando el módulo Autodesk Inventor Nastran y la tecnología iLogic de Autodesk Inventor. El procedimiento planteado abre las posibilidades de aplicación en el diseño de otros componentes mecánicos.

El algoritmo implementado garantiza que en algún momento se obtenga el espesor óptimo en función de las condiciones establecidas. Los parámetros de entrada están basados en recomendaciones de la literatura, pero es posible que el diseñador los modifique, ya sea para disminuir el tiempo de cálculo o para cumplir con otras especificaciones. En todos los casos analizados se ha encontrado coherencia entre los resultados obtenidos con el software desarrollado y los reportados por otros autores o los obtenidos por métodos analíticos.

#### 5. Agradecimientos

Al financiamiento recibido a través del Proyecto Concytec - Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia. [contrato número 056-2018 FONDECYT], que permitió el desarrollo de la presente investigación.

#### 6. Referencias

Autodesk. (2021). *Autodesk Inventor 2022*. Recuperado el 21 de Abril de 2021, de <https://help.autodesk.com/view/INVTOR/2022/ENU/?guid=GUID-595F9D8E-9EEA-4446-91AB-830E5BAE548E>.

Elecon. (s.f.). *Crane Duty Gear Box*. Recuperado el 2021 de Marzo de 30, de Products: Elecon: <https://www.elecon.com/power-transmission/helical-bevel-helical-gearboxes/crane-duty-gear-box>.

Fernández, A. (2018). *Diseño y cálculo de un reductor de velocidad para el accionamiento de una cinta transportadora de mineral de litio*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Moszyńsk, W. (1952). *Determination of safety factors in strength calculation of engineering and machine construction*. Polonia: Wiadomości PKN.

Pugsley, A. (1966). *Safety of structures*. Nueva York: Edward Arnold Publishers Ltd.

Rackov, M. (2018). *Analysis of housing models of modern single-stage universal gear reducers*. Recuperado el 11 de Abril de 2021, de IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/393/1/012048>.

Reshétov, D. (1971). *Atlas de elementos de máquinas y mecanismos* (Primera ed.). Moscú: Construcción de maquinaria.

Strokes, A. (1992). *Manual gearbox design* (Primera ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Vidosic, J. (1957). *Machine design projects*. Nueva York: The Ronald Press.