

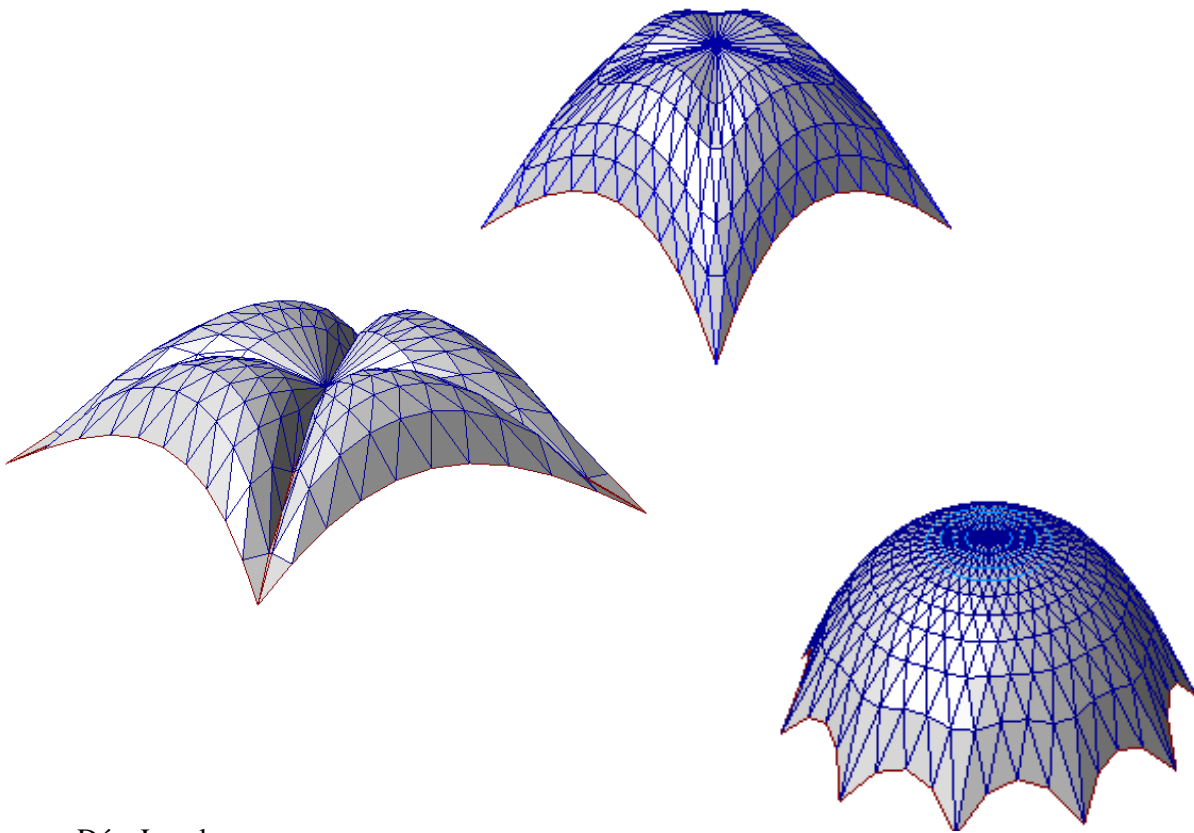


GRUPO DE INVESTIGACIÓN TEP-190: INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS
UNIVERSIDAD DE GRANADA

GAUDI 1.0

Manual de usuario

**Juan Francisco Carbonell Márquez, Luisa María Gil Martín, Enrique Hernández Montes,
Rafael Jurado Piña
Mayo 2012**



Dép. Legal:
GR 1905-2012
ISBN:
978-84-15418-55-9

Contenido del manual

1. Introducción	3
2. Bases teóricas del programa	3
2.1. Método de densidad de Fuerzas	3
2.2. Mallado Topológico	7
2.3. Introducción de peso propio y cálculo iterativo	9
2.3.1. Expresión para P_z	10
2.3.2. Ejemplo simple.....	10
2.3.3. Explicación a la posible no solubilidad del problema	12
2.3.4. Cálculo iterativo	14
3. Entorno del programa GAUDI.....	16
3.1. Iniciación del programa.....	16
3.2. Inputs necesarios	16
3.3. Introducción de los valores de las densidades de fuerza por grupos o por ramas	18
3.4. Ejecución del modelo y salida de resultados.....	19
4. Ejemplos.....	22
Contacto	27
Referencias.....	27

1. Introducción

El presente documento contiene las nociones teóricas básicas que fundamentan el programa GAUDI (<http://www.ugr.es/~tep190/investigacion/gaudi.html>). Además, comprende las indicaciones necesarias a nivel de usuario para emplear el programa adecuadamente.

GAUDI es un programa escrito en código Matlab© que permite obtener la forma de equilibrio de estructuras tales como estructuras tensadas o cubiertas sometidas a su peso propio. El programa, empleando el Método de Densidad de Fuerzas (MDF) [1] junto con el Mallado Topológico (MT) [2], simula los modelos colgantes de cadenas empleados por Gaudí o los modelos empleados por Isler [3] para la búsqueda de formas de equilibrio. De la misma manera que Gaudí o Isler modificaban las características de sus modelos (longitud de cables, pesos, dimensiones de la membrana, etc), también pueden modificarse los los datos de entrada al MT-MDF para obtener distintas formas de equilibrio de la estructura.

2. Bases teóricas del programa

A continuación se describe someramente el aparato matemático y mecánico que el programa GAUDI emplea para calcular la posición de equilibrio de la estructura. Si el usuario precisa de conocimientos en mayor detalle, puede dirigirse a las referencias citadas en cada apartado.

2.1. Método de densidad de Fuerzas

El MDF fue introducido por [1] y [4] como un nuevo método para el análisis de redes de nodos. El método, a partir de unos coeficientes denominados “densidades de fuerza” y definidos para cada rama, permite la búsqueda de la configuración de equilibrio de una red de nodos y ramas a través de la resolución de un sistema lineal de ecuaciones.

Para explicar la versatilidad del método imagínese el ejemplo de la Fig. 1: dos ramas que parten de los nodos v_1 y v_2 (fijos) y se unen en el nodo v_3 .

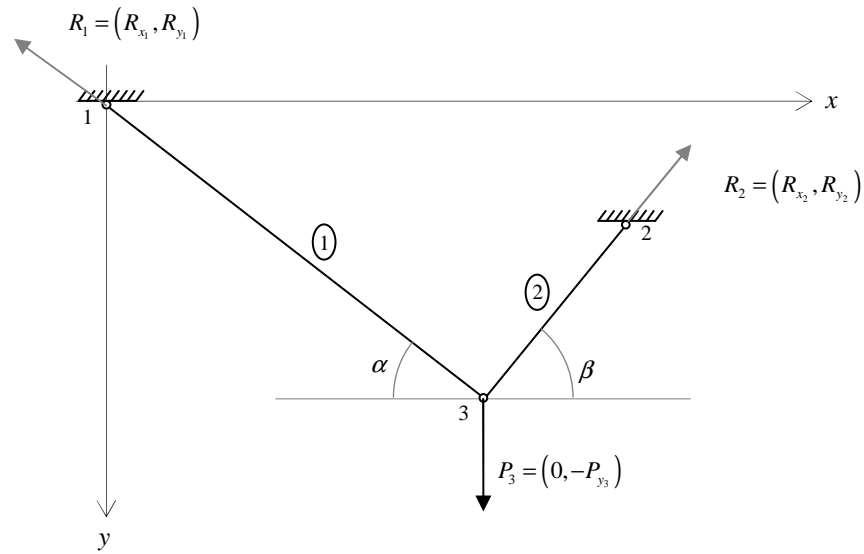


Fig. 1. Problema simple para resolver el equilibrio

Las ecuaciones de equilibrio del sistema presentado en Fig. 1 pueden escribirse como:

$$\begin{aligned}
 \text{Nodo } v_1 &\rightarrow \begin{cases} \sum F_H = R_{x_1} \rightarrow S_1 \cos \alpha = R_{x_1} \\ \sum F_V = R_{y_1} \rightarrow S_1 \sin \alpha = R_{y_1} \end{cases} \\
 \text{Nodo } v_2 &\rightarrow \begin{cases} \sum F_H = R_{x_2} \rightarrow S_2 \cos \beta = R_{x_2} \\ \sum F_V = R_{y_2} \rightarrow S_2 \sin \beta = R_{y_2} \end{cases} \\
 \text{Nodo } v_3 &\rightarrow \begin{cases} \sum F_H = 0 \rightarrow S_1 \cos \alpha + S_2 \cos \beta = 0 \\ \sum F_V = P_{y_3} \rightarrow S_1 \sin \alpha + S_2 \sin \beta = P_{y_3} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde S_1 y S_2 son las fuerzas en las ramas. Por simple geometría, las expresiones trigonométricas de Eq. (1) pueden expresarse como:

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha &= \frac{x_3 - x_1}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}} = \frac{x_3 - x_1}{l_1} \\
 \sin \alpha &= \frac{y_3 - y_1}{l_1}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \beta &= \frac{x_3 - x_2}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}} = \frac{x_3 - x_2}{l_2} \\
 \sin \beta &= \frac{y_3 - y_2}{l_2}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Introduciendo las expresiones de las Eqs. (2) y (3) en Eq. (1), se obtiene finalmente:

$$\begin{aligned}
\text{Nodo } v_1 &\rightarrow \begin{cases} \sum F_H = R_{x_1} \rightarrow S_1 \frac{x_3 - x_1}{l_1} = R_{x_1} \\ \sum F_V = R_{y_1} \rightarrow S_1 \frac{y_3 - y_1}{l_1} = R_{y_1} \end{cases} \\
\text{Nodo } v_2 &\rightarrow \begin{cases} \sum F_H = R_{x_2} \rightarrow S_2 \frac{x_3 - x_2}{l_2} = R_{x_2} \\ \sum F_V = R_{y_2} \rightarrow S_2 \frac{y_3 - y_2}{l_2} = R_{y_2} \end{cases} \\
\text{Nodo } v_3 &\rightarrow \begin{cases} \sum F_H = 0 \rightarrow S_1 \frac{x_3 - x_1}{l_1} + S_2 \frac{x_3 - x_2}{l_2} = 0 \\ \sum F_V = P_{y_3} \rightarrow S_1 \frac{y_3 - y_1}{l_1} + S_2 \frac{y_3 - y_2}{l_2} = P_{y_3} \end{cases}
\end{aligned} \tag{4}$$

El problema presentado puede enfocarse de varias maneras distintas. Por ejemplo, si las coordenadas de los nodos v_1 , v_2 y v_3 son conocidas, las incógnitas serían S_1 , S_2 y las reacciones R_{x_1}, R_{y_1} y R_{x_2}, R_{y_2} en los nodos v_1 y v_2 (6 ecuaciones y 6 incógnitas). La resolución lineal del problema se abordaría resolviendo el equilibrio del nodo v_3 .

Por otra parte, si la incógnita es la posición del nodo v_3 (x_3, y_3) y las reacciones R_{x_1}, R_{y_1} y R_{x_2}, R_{y_2} en los nodos v_1 y v_2 , con todos los demás datos conocidos, incluidos los valores de S_1 y S_2 , la resolución del problema seguiría teniendo sentido (6 ecuaciones y 6 incógnitas). No obstante, la linealidad del problema se pierde, dado que las longitudes de las barras l_i están expresadas en función de las coordenadas de los puntos.

Una forma alternativa de resolver el problema que, además mantiene la linealidad, consiste en introducir el concepto de densidad de fuerza, $q_i = S_i/l_i$, de tal forma que las ecuaciones de equilibrio horizontal y vertical del nodo v_3 quedan:

$$\begin{aligned}
q_1(x_3 - x_1) + q_2(x_3 - x_2) &= 0 \\
q_1(y_3 - y_1) + q_2(y_3 - y_2) &= P_{y_3}
\end{aligned} \tag{5}$$

En Eq. (5) todos los valores son datos conocidos salvo (x_3, y_3). Para los valores de q_i puede adoptarse cualquier combinación, de tal manera que distintos valores de q_i proporcionarán

distintas coordenadas para el nodo v_3 . Una vez resuelto el sistema, bastará con conocer la longitud de cada rama, l_i , para obtener la fuerza existente en ellas:

$$S_i = q_i l_i \quad (6)$$

El planteamiento del problema presentado para el sistema de Fig. 1 puede generalizarse como se expresa a continuación. Sea \mathbf{u} el vector de diferencias de coordenadas x de los nodos extremos de cada cable y \mathbf{v} su homólogo para la coordenada y (Eq. (7)). Los vectores \mathbf{u} y \mathbf{v} tendrán tantas componentes como número de ramas, n_b .

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ x_3 - x_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} y_3 - y_1 \\ y_3 - y_2 \end{pmatrix}$$

Si \mathbf{x} e \mathbf{y} son los vectores de las respectivas coordenadas x e y de los n nodos del sistema, los vectores \mathbf{u} y \mathbf{v} están relacionados con ellos mediante la matriz \mathbf{C} de conectividades, de acuerdo con la Eq. (8):

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{C} \mathbf{x} \\ \mathbf{v} &= \mathbf{C} \mathbf{y} \end{aligned} \quad (8)$$

siendo \mathbf{C} :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

De manera más general, si la rama j de la red une los nodos v_i y v_k , con $i < k$, la matriz \mathbf{C} se define como:

$$\mathbf{C}(j, r) = c_{jr} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = r \\ -1 & \text{si } k = r \\ 0 & \text{para el resto} \end{cases} \quad (10)$$

Definimos la matriz \mathbf{Q} como una matriz $n_b \times n_b$, donde en la diagonal contiene la densidad de fuerzas q_i para la fila y columna i , y el resto es cero. Finalmente, si el vector \mathbf{P}_x contiene el valor

de las fuerzas nodales en la dirección x para cada nodo, Eq. (4) puede escribirse de manera matricial como:

$$\begin{aligned} \text{Equilibrio en } x &\rightarrow (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{x} + \mathbf{P}_x = 0 \\ \text{Equilibrio en } y &\rightarrow (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{y} + \mathbf{P}_y = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

De manera análoga, si el problema se plantease en el espacio, el equilibrio en la coordenada z quedaría:

$$\text{Equilibrio en } z \rightarrow (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{z} + \mathbf{P}_z = 0 \quad (12)$$

Así pues, la posición de los nodos de cualquier malla espacial puede ser determinada conociendo la conectividad de los nodos (matriz \mathbf{C}), las densidades de fuerza de las ramas de la malla (matriz \mathbf{Q}), las coordenadas de los nodos fijos y las fuerzas nodales aplicadas en los nodos libres. El sistema lineal a resolver será:

$$\begin{aligned} (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{x} + \mathbf{P}_x &= 0 \\ (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{y} + \mathbf{P}_y &= 0 \\ (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{z} + \mathbf{P}_z &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

2.2. Mallado Topológico

Uno de los inputs necesarios a introducir en MDF es la matriz \mathbf{C} . Entre los diversos métodos existentes para construir dicha matriz de conectividad, se encuentra el propuesto por [2] y [5] denominado Mallado Topológico (MT). Tal y como se aprecia en numerosos ejemplos expuestos en la literatura, por ejemplo [7], se precisa una idea inicial de la forma de la estructura para poder generar una primera red a la hora introducir en el MDF. La ventaja que presenta el MT es la no necesidad de esa idea inicial, presentando una gran versatilidad a la hora de crear redes para cualquier tipo de estructura tensada. Sólo se necesita conocer la conectividad de los nodos de la topología, en contraste con otros métodos de mallados que están basados sólo en geometría. Los únicos inputs necesarios para iniciar el MT-MDF son las coordenadas de los

nodos fijos, las densidades de fuerzas q de las ramas de la red y una serie de reglas topológicas que proveerán la conectividad de los nodos.

El MT construye una red topológica mediante pasos o anillos de nodos sucesivos, de acuerdo con una serie de información a proporcionar al método: el número de nodos en el primer paso, el número de pasos totales, la relación topológica entre pasos sucesivos y el tipo de red a construir (abierta o cerrada). Aunque en el planteamiento original del MT se presentaron tres tipos de redes básicas de nodos o relaciones entre pasos sucesivos (A, B, ó C), el programa GAUDI sólo emplea redes cerradas tipo B (Fig. 2) por lo que resulta especialmente adecuado para estructuras con simetría radial o estructuras no alargadas. En las redes tipo B, cada nodo se une a los adyacentes de su mismo anillo y a dos del siguiente, resultando el número de nodos constante en cada anillo (véase Fig. 2). En las redes cerradas (Fig. 2 y 3), los anillos se distribuyen concéntricamente respecto a un nodo central, de manera que el contorno de la forma de equilibrio está formado por los nodos del último anillo. El paso de la red de la topología a la geometría se produce cuando se asignan los nodos fijos a los nodos del contorno: la distribución de los nodos del contorno se hace de manera proporcional a la distancia real existente entre los nodos fijos en el espacio. Para mayores detalles relativos al MT, el lector puede consultar las referencias [2] y [5].

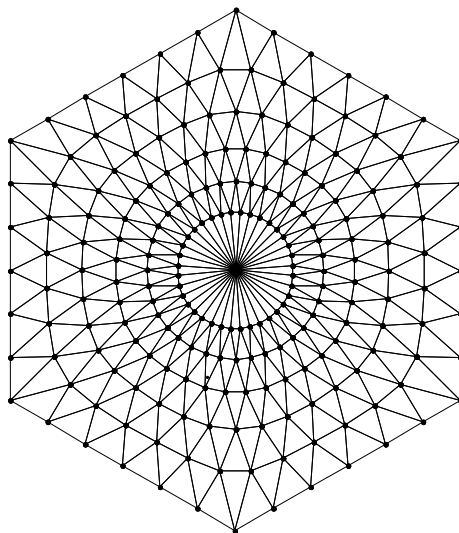


Fig. 2. Red cerrada tipo B con 6 nodos anillos y 32 nodos por anillo

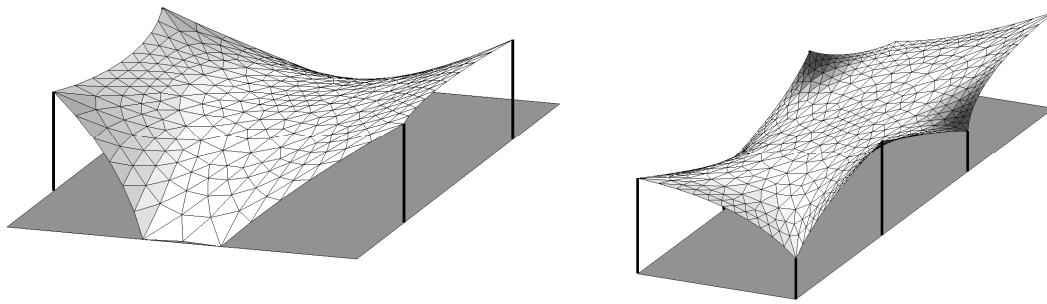


Fig. 3. Estructuras tensada modelizadas con redes topológicas similar a la de la Fig. 2

2.3. Introducción de peso propio

La conjunción MT-MDF ha sido explicada hasta ahora para la búsqueda de formas de equilibrio de estructuras tensadas. Para poder simular los modelos de Gaudí o Isler se hace necesaria la consideración del peso propio del material que conforma la estructura representada por la red de triángulos. Para considerar el peso propio de la estructura, las ecuaciones previamente lineales en Z son alteradas de manera que cada nodo soporta un tercio del peso de cada triángulo al que dicho nodo pertenece.

A pesar de la introducción del peso propio, una de las principales características que hacen potente al MDF se sigue manteniendo: el desacople existente entre las ecuaciones de las distintas coordenadas X, Y y Z (Eq. (14)). Sin embargo, la linealidad se pierde en la coordenada Z dado que el peso de la estructura dependerá directamente del tamaño de los triángulos que la modelizan. Las ecuaciones de equilibrio en X e Y se siguen manteniendo lineales:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{x} + \mathbf{P}_x &= 0 \\
 (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{y} + \mathbf{P}_y &= 0 \\
 (\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}) \mathbf{z} + \mathbf{P}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Las componentes del vector de cargas \mathbf{P}_z de los triángulos de la red estarán compuestas, para cada nodo, de un tercio de la suma del peso de los triángulos que tienen al nodo correspondiente como vértice. Para calcular el peso de cada triángulo, primero habrá que obtener su área y

multiplicarla posteriormente por el peso específico γ que haya sido adoptado. El área de cada triángulo puede calcularse como la mitad de la norma del producto vectorial de dos vectores que conformen dos de sus lados.

2.3.1. Expresión para \mathbf{P}_z

Con el objetivo de obtener una expresión más clara para las cargas \mathbf{P}_z de los triángulos de la red, considérese la matriz $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ de tamaño $n \times n$ en la que el elemento a_{ij} de la fila i y columna j vale 1 si el nodo v_i comparte una rama con el nodo v_j (son adyacentes) y 0 si ocurre lo contrario (Eq. (15)). Por convención, la diagonal de la matriz \mathbf{A} es nula.

$$\mathbf{A}(i, j) = a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } v_i \text{ unido a } v_j \\ 0 & \text{para el resto} \end{cases} \quad (15)$$

Hecha esta observación, la componente i del vector \mathbf{P}_z , correspondiente a un tercio de la suma del peso de los triángulos que tienen como vértice al nodo v_i puede definirse como:

$$P_{z_i} = \sum_{j < k} \left[(a_{ij} \cdot a_{ik} \cdot a_{jk}) \frac{\gamma}{3} \left(\frac{1}{2} \|\overline{v_i v_j} \times \overline{v_i v_k}\| \right) \right] \quad (16)$$

siendo $\overline{v_i v_j}$ el vector que parte del nodo v_i y llega al v_j y $\|\overline{a} \times \overline{b}\|$ la norma del producto vectorial de los vectores \overline{a} y \overline{b} .

Dado que la posición de los nodos v_i , v_j y v_k viene dada por las componentes i , j y k de los vectores \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} ($P_{z_i} = P_{z_i}(x_i, y_i, z_i)$), cada una de las componentes del vector \mathbf{P}_z se escribirá como función de dichas coordenadas: $\mathbf{P}_z = \mathbf{P}_z(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. De esta manera, la linealidad en la coordenada Z se pierde.

2.3.2. Ejemplo simple

El siguiente ejemplo simple (Fig. 4) ilustra esta manera de introducir el peso propio. La red consiste en cuatro nodos, tres de los cuales son fijos (nodos v_1 , v_2 y v_4) y la posición del nodo central (v_3) debe determinarse. El área (o peso) que soporta el nodo v_3 se encuentra sombreada

en gris. Tras asignar una densidad de fuerza q a las ramas y un peso específico γ a los triángulos de la red, se observa que el problema puede o no tener solución.

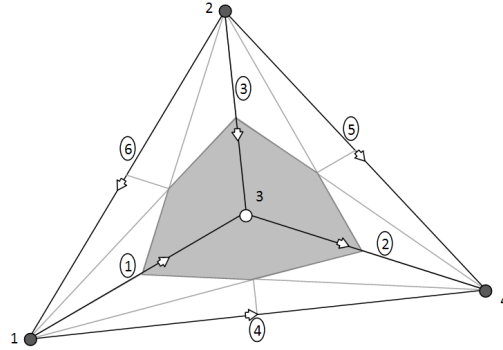


Fig. 4. Ejemplo simple a resolver

La ecuación a resolver para determinar la posición del nodo v_3 en el ejemplo anterior posee una parte lineal, sólo afectada por el parámetro densidad de fuerza q y una parte no lineal que depende del tamaño de los triángulos que afectan al nodo v_3 y del peso específico γ (Eq. (17)).

$$\underbrace{3q z_3 - q(z_1 + z_2 + z_4)}_{\text{Parte lineal}} - \frac{\gamma}{3} \underbrace{\left(\overset{\Delta}{v_3 v_1 v_2} + \overset{\Delta}{v_3 v_1 v_4} + \overset{\Delta}{v_3 v_2 v_4} \right)}_{\text{Parte no lineal}} = 0 \quad (17)$$

siendo $\overset{\Delta}{v_i v_j v_k}$ el área del triángulo que tiene como vértices a los nodos v_i , v_j y v_k .

Tal y como se indica en la Eq. (16) el área de los distintos triángulos puede calcularse mediante el producto vectorial de los pares de vectores que parten del nodo v_3 y cuyos nodos extremos son adyacentes entre sí (Eq. (18)):

$$3q z_3 - q(z_1 + z_2 + z_4) - \frac{\gamma}{6} \left(\left\| \overrightarrow{v_3 v_1} \times \overrightarrow{v_3 v_2} \right\| + \left\| \overrightarrow{v_3 v_1} \times \overrightarrow{v_3 v_4} \right\| + \left\| \overrightarrow{v_3 v_2} \times \overrightarrow{v_3 v_4} \right\| \right) = 0 \quad (18)$$

La Fig. 5 representa gráficamente cada una de las partes de Eq. (17): lineal (verde), no lineal (azul) y total (rojo). La ecuación tendrá solución si la función total corta al eje de abscisas. Para conseguir la solubilidad del problema, el usuario tendrá que cambiar el parámetro densidad de fuerza q adecuadamente.

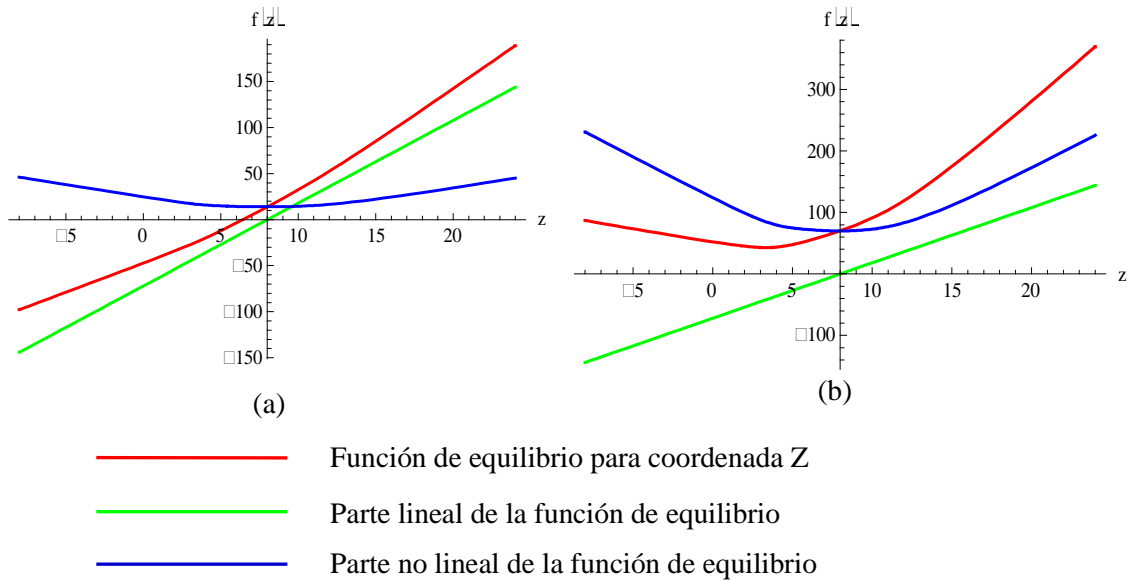


Fig. 5. Representación gráfica de la función a ser igualada a cero en la ecuación de equilibrio en Z. Las diferentes partes de la función (lineal y no lineal) son representadas. Dependiendo de las condiciones del problema, éste puede (a) o no (b) tener solución

2.3.3. Explicación a la posible no solubilidad del problema

Con el objetivo de entender la posible o no solubilidad del problema, se puede establecer la similitud de una de las ramas de la red con densidad de fuerza q y un muelle recto con una constante de elasticidad de valor k . Ambos parámetros, q y k expresan la relación existente entre los incrementos de longitud y fuerza en ambos casos, rama y muelle.

Imagínese primero que del muelle cuelga un peso constante de valor p (Fig. 6). Para cualquier valor de k existirá solución del problema.

Si ahora el peso que cuelga del muelle se hace variable (función de su longitud l), $p = p_0 + \gamma l$, el problema cambia (véase Fig. 7). Si la fuerza en el muelle es $F = k l$, la longitud del muelle con para que el sistema se encuentre en equilibrio es:

$$F = p \rightarrow p_0 + \gamma l_{eq} = k l_{eq} \rightarrow l_{eq} = \frac{p_0}{(k - \gamma)} \quad (19)$$

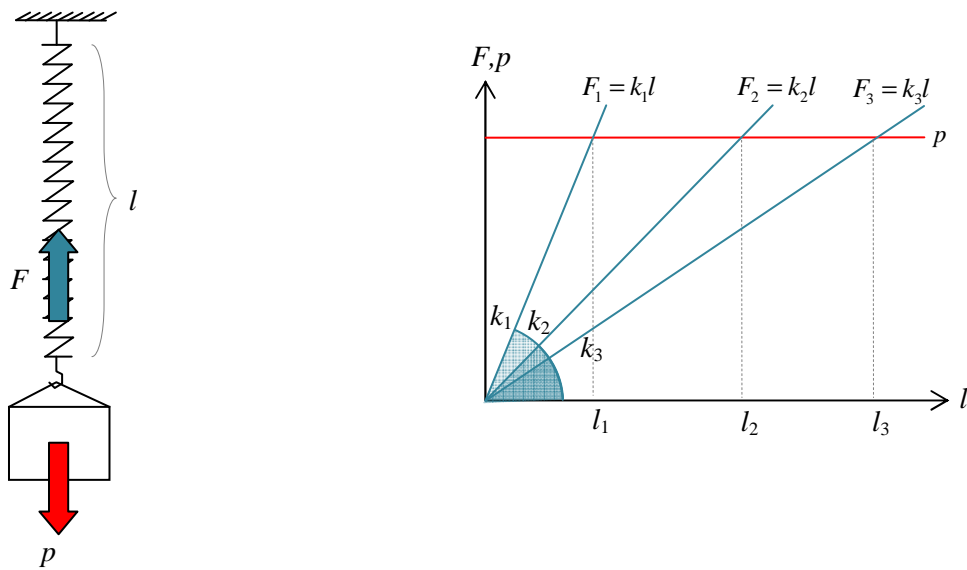


Fig. 6. Analogía del problema con un muelle cargado para entender la solubilidad: peso p constante. El problema siempre tiene solución

De esta manera, para poder plantear el equilibrio, la constante k del muelle debe cumplir:

$$(k - \gamma) > 0 \rightarrow k > \gamma \tag{20}$$

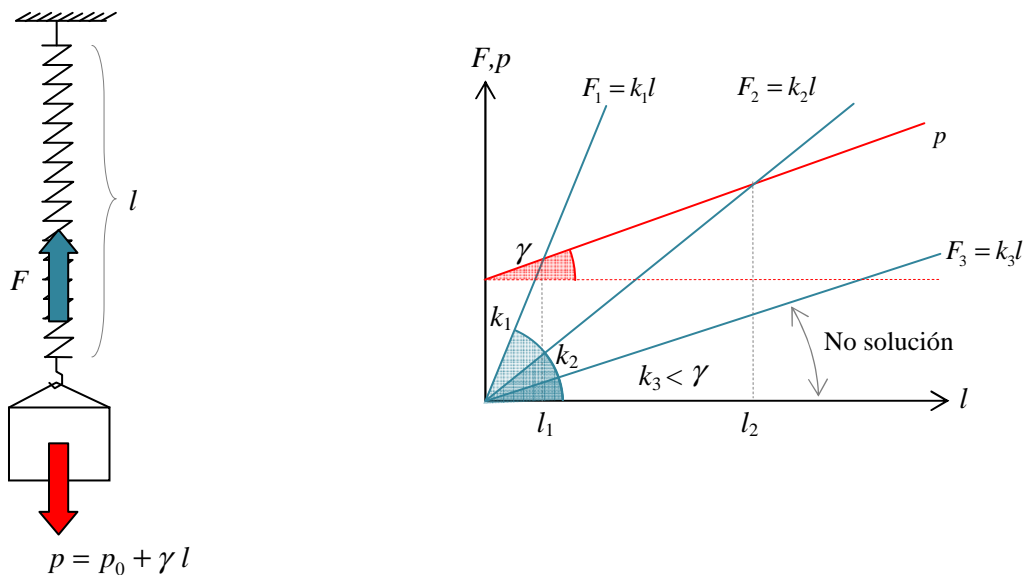


Fig. 7. Analogía del problema con un muelle cargado para entender la solubilidad: peso p variable con la longitud del muelle. El problema tendrá solución en función del valor de k

Así pues, el problema de la solubilidad en MDF considerando peso propio puede entenderse de la misma manera: la fuerza en los cables necesita crecer a un ritmo mayor que con el que lo hace el peso de los triángulos cuando la longitud de los cables y, por consiguiente, el área de los triángulos se incrementa. La diferencia aquí es que la condición a imponer a las densidades de fuerza no es tan simple como en el caso del problema del muelle, ya que existen no linealidades que deben ser tenidas en cuenta.

2.3.4. Cálculo iterativo

Dado que las ecuaciones a resolver no son lineales en la coordenada Z, la resolución de las mismas se lleva a cabo de manera iterativa con el objetivo de que puedan resolverse linealmente (Fig. 8). Así, en una primera iteración, el sistema de ecuaciones es resuelto en X, Y y Z ignorando el peso propio de los triángulos. A partir de este momento, las coordenadas X e Y se mantienen constantes a lo largo del proceso. Una vez resuelta la primera iteración, se calcula el peso de los triángulos obtenidos y se aplica esta acción como una carga exterior. De esta manera, se plantean de nuevo las ecuaciones en Z de manera lineal y se vuelven a resolver, calculando de nuevo el peso propio y volviéndolo a introducir como una carga exterior. El proceso finaliza una vez que la diferencia entre los resultados de iteraciones sucesivas es inferior a un umbral fijado por el usuario (se produce convergencia) o una vez que se hayan realizado un número máximo de iteraciones también determinado por el usuario.

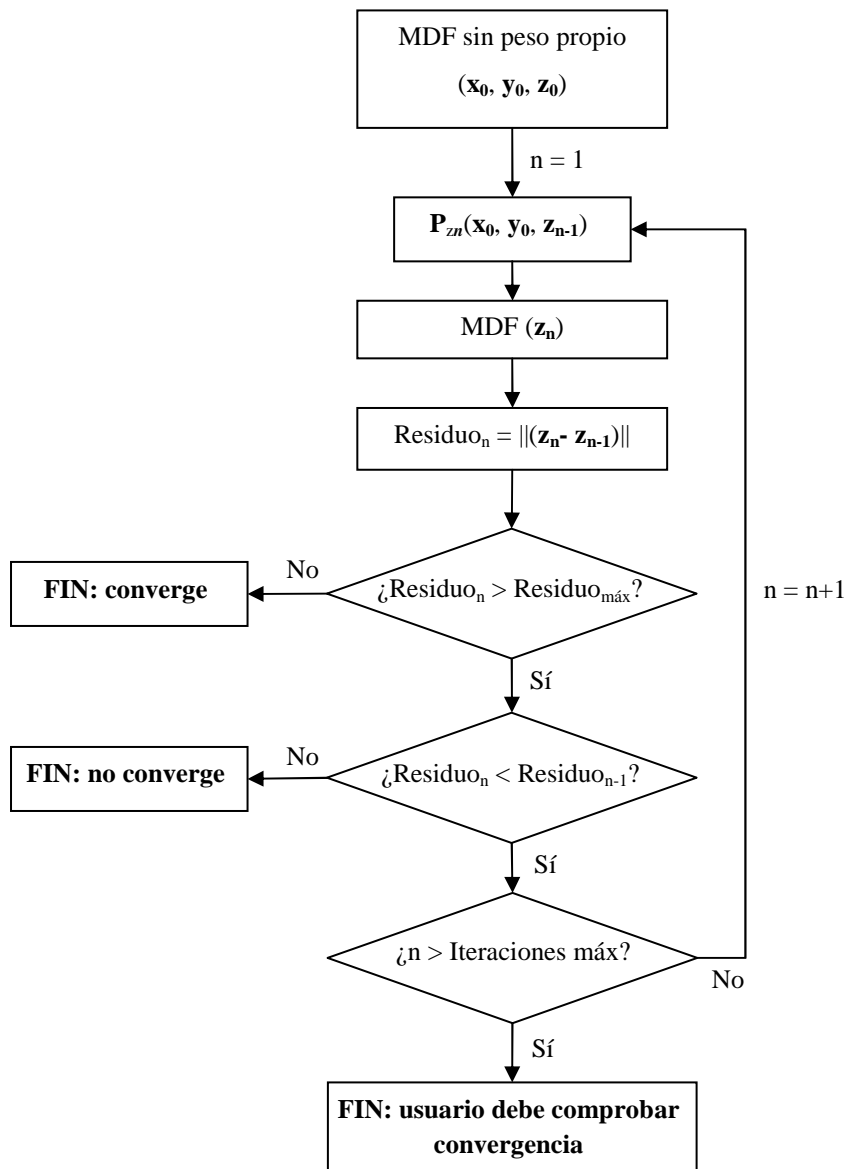


Fig. 8. Diagrama de flujo para el cálculo iterativo

La manera en que el programa compara los resultados sucesivos se basa en el cálculo de la norma del vector compuesto por la diferencia, coordenada a coordenada, de los resultados de iteraciones sucesivas. El programa detendrá el proceso si se observa que la diferencia entre el resultado entre iteraciones sucesivas comienza a crecer. En este caso, el proceso no converge y habrá que cambiar el valor de las densidades de fuerzas introducidas. Hay que señalar que será el usuario quien deba juzgar la adecuada convergencia de los resultados.

3. Entorno del programa GAUDI

Antes de iniciar el programa, verifique que su ordenador funciona bajo un sistema operativo Microsoft Windows ® de 32 bits. Para poder ejecutar el programa, haga doble click sobre el archivo “gaudi_pkg.exe” que se ha descargado. Automáticamente se instalará el *runtime* de Matlab para poder ejecutar el programa posteriormente y se crearán una serie de archivos (_install.bat, readme.txt, gaudi.exe) en la carpeta donde ha ejecutado “gaudi_pkg.exe”

3.1. Iniciación del programa

Para iniciar el programa haga doble click sobre el icono del archivo “gaudi.exe” que se ha generado. A continuación, se abrirá una ventana del símbolo de sistema con un mensaje de bienvenida y segundos después, se abrirá la interfaz de entrada de datos (Fig. 9).

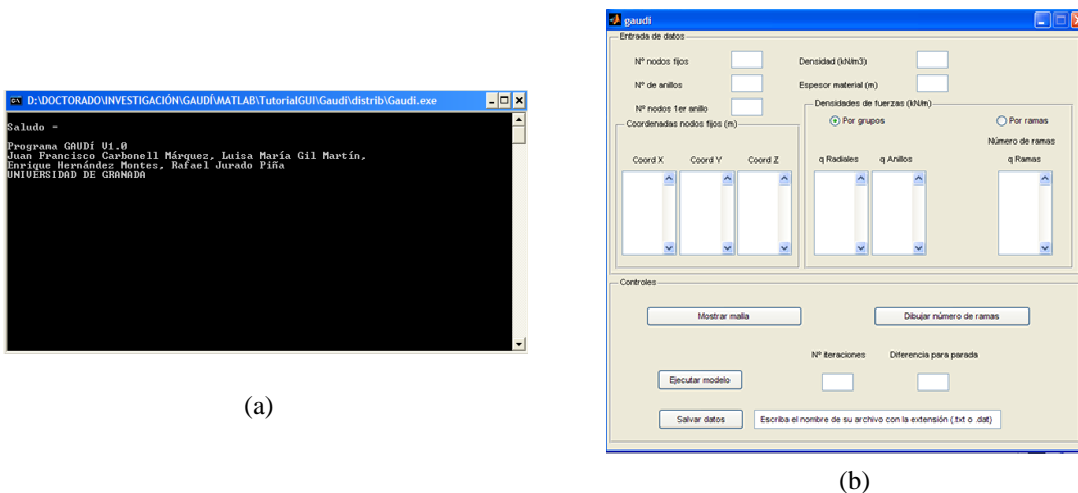


Fig. 9. Iniciación del programa: (a) Ventana del símbolo del sistema con mensaje de bienvenida; (b) Interfaz de introducción de datos y controles del modelo

3.2. Inputs necesarios

La interfaz de introducción de datos será la única herramienta que el usuario precisa para controlar el modelo. A través de dicha interfaz el usuario introducirá los siguientes datos para a definición del modelo:

- a. Número de nodos fijos que el modelo tiene en el contorno, como mínimo 3

- b. Número de anillos sucesivos de los que dispondrá la red topológica
- c. Número de nodos por anillo. Este valor debe ser igual o mayor al número de nodos fijos introducidos en a. Si los lados del polígono del contorno de la estructura son iguales en longitud, el número de nodos del primer anillo debe ser igual al número de lados o múltiplo de éste
- d. La densidad del material en kN/m^3
- e. El espesor de la estructura en m, para calcular posteriormente la carga de peso propio por m^2 que tiene que soportar la estructura
- f. Coordenadas X, Y y Z de los nodos fijos. El usuario tendrá que introducir tantos valores para cada coordenadas como número de nodos fijos introdujo en el apartado a. Cada valor debe introducirse en una nueva línea, es decir, tras la introducción de un valor, el usuario debe presionar la tecla “intro” antes de introducir el siguiente
- g. Densidades de fuerzas. El usuario tiene la opción de introducir las densidades de fuerza por grupos radiales y anulares o bien introducir una a una la densidad de fuerza de cada rama:
 - i. Por grupos radiales y anulares. El usuario debe introducir tantos valores para cada tipo de densidad de fuerza como número de anillos introdujo en el apartado b. El orden de los grupos de ramas radiales y anulares crece desde el nodo central de la malla hacia el exterior.
 - ii. Por ramas. El usuario debe introducir tantos valores como ramas tiene la malla.
- h. Número de iteraciones máximas que el programa debe llevar a cabo en el cálculo iterativo de la posición de equilibrio

- i. Valor mínimo de la diferencia entre los resultados de iteraciones sucesivas que el usuario crea conveniente para asegurar la convergencia de los cálculos

3.3. Introducción de los valores de las densidades de fuerza por grupos o por ramas

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, el usuario dispone la opción de introducir el valor de las densidades de fuerza por grupos (radiales y anulares) o por ramas. El programa, por defecto, se ejecutará como si los valores hubiesen sido introducidos por grupos (Fig. 10). No obstante, el usuario puede hacer click en la pestaña “Por ramas”. Si previamente se han definido el número de anillos y nodos por anillo, el programa proporcionará el número de valores que hay que introducir al hacer click en “Por ramas”. En caso contrario, el programa mostrará “NaN” hasta que se realicen las acciones anteriormente descritas.

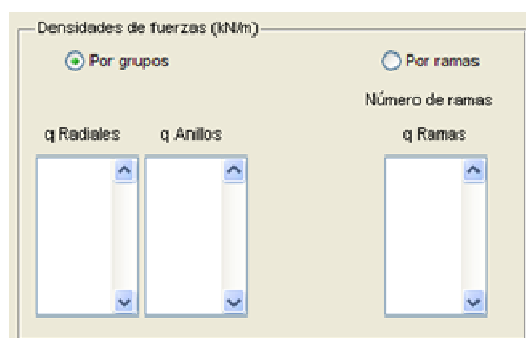


Fig. 10. Panel de introducción de densidades de fuerzas

Los anillos se enumeran en orden creciente partiendo del centro de la malla hacia el exterior, al igual que los grupos radiales. El primer grupo de ramas radiales es el que une el nodo central de la malla con los nodos del primer anillo y así sucesivamente. La asignación de las densidades de fuerza a cada uno de los grupos se realizará ateniéndose al orden con que han sido introducidas (grupo 1 – densidad de fuerza 1,...)

Para introducir el valor de las densidades de fuerzas por ramas, el usuario debe conocer previamente como se enumeran las ramas de la malla. Para ello, conocer dicha numeración, el

usuario, una vez introducidos todos los inputs (pueden obviarse las densidades de fuerza), debe hacer click en “Mostrar malla”, dentro del panel de controles (Fig. 11). El programa ejecutará el modelo con una densidad de fuerza constante en todas las ramas de valor 1000 kN/m y mostrará su disposición espacial. A continuación, el usuario debe hacer click en “Dibujar número de ramas”, con lo que aparecerá una nueva figura de la malla con los números de cada rama sobre la misma. Es importante destacar que la disposición espacial de la malla con la numeración de las ramas se corresponde con la última ejecución del modelo que el usuario ha llevado a cabo. Se ha sugerido hacer click en “Mostrar malla” si previamente el usuario no conoce las densidades de fuerza que quiere asignar a cada rama.

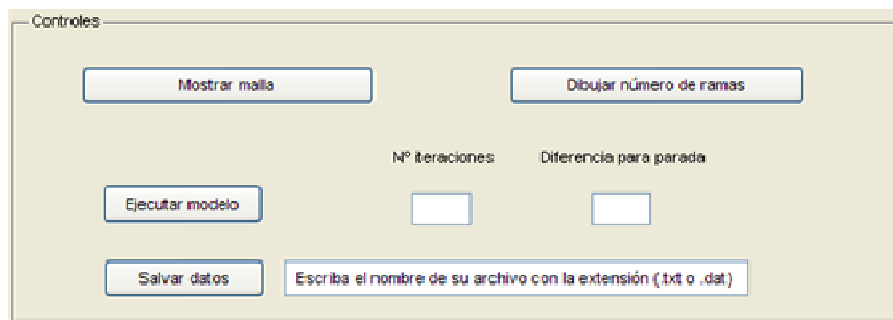


Fig. 11. Panel de controles

Para mayor comodidad del usuario, si el modelo dispone de numerosos nodos fijos o anillos, se recomienda previamente escribir los valores de las coordenadas o de las densidades de fuerza en un editor de texto, copiarlos y pegarlos dentro de cada box.

3.4. Ejecución del modelo y salida de resultados

Una vez introducidos todos los inputs relativos a la malla, el usuario debe especificar el número máximo de iteraciones que desea que el programa realice dentro del box “Nº de iteraciones”, en el panel de controles (Fig. 11). Además, el usuario debe también indicar la diferencia máxima que debe existir entre iteraciones para que se considere existente la convergencia en el cálculo. Dicho valor se introducirá en el box “Diferencia para parada”, también dentro del panel de controles (Fig. 11).

El usuario se encuentra en disposición de hacer click en “Ejecutar modelo”. Tras unos segundos, y si se ha producido convergencia, el programa mostrará en una nueva ventana la figura correspondiente a la disposición espacial de equilibrio de la malla.

Una vez los datos han sido introducidos, el usuario puede presionar el botón “Ejecutar modelo”. Si se produce convergencia, el programa mostrará en una nueva ventana un gráfico en 3D de la estructura calculada (Fig. 12). La ventana se divide en dos partes: a la izquierda se muestra el gráfico 3D de la estructura y a la derecha una barra de color numerada correspondiente a las densidades de fuerza de las ramas de la estructura. Cada rama de la estructura aparecerá coloreada según la densidad de fuerza que el usuario le haya designado previamente.

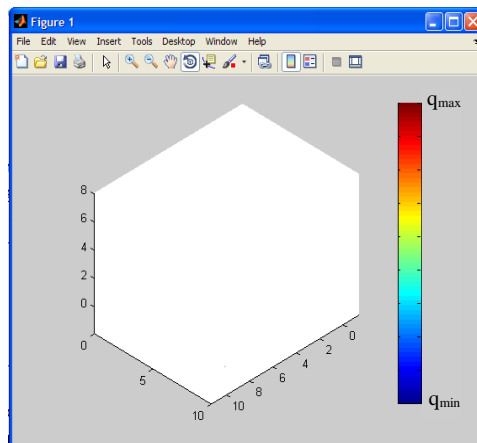


Fig. 12. Ventana de gráfico de la estructura

Si no se produce convergencia durante el proceso de cálculo, el programa mostrará una ventana advirtiendo al usuario de este hecho (Fig. 13)

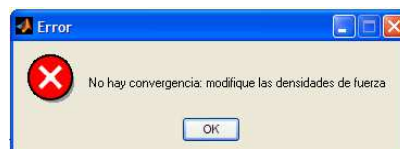


Fig. 13. Mensaje de error por no convergencia en los cálculos

Una vez que se ha producido convergencia, el usuario puede salvar los datos en un archivo .txt o .dat. Para ello debe introducir el nombre del archivo que quiere crear con la extensión del

mismo dentro del campo situado junto al botón “Salvar datos”. El programa salvará los datos en la carpeta donde el ejecutable se encuentre. El archivo de salida contiene los datos introducidos por el usuario y muestra como “output” el número de iteraciones realizadas y las coordenadas de los nodos de la red. La Fig. 14 muestra la salida de datos general que hace el programa.

```

datos.txt - Bloc de notas
-----INPUT-----
Nº nodos fijos: 4
Nº de anillos: 4
Nº de nodos en primer anillo: 4
Coordenadas nodos fijos (m)
-----
X       Y       Z
-----
0       0       0
10      0       0
10      10      0
0       10      0
-----
Densidades de fuerzas (kN/m)
-----
qr      qa
-----
1       1
2       1
3       1
4       1
-----
Densidad: 22 kN/m3
Espesor: 0.2 m
Iteraciones máximas a realizar: 50
Diferencia mínima establecida: 1e-005
-----OUTPUT-----
Iteraciones llevadas a cabo: 2
Coordenadas de los nodos (m)
-----
X       Y       Z
-----
5       5       9.994
5.44    5       9.852
5       5.44    9.852
4.56    5       9.852
5       4.56    9.852
5.771   4.229   9.474
5.771   5.771   9.474
4.229   5.771   9.474
4.229   4.229   9.474
5       2.211   7.853
7.789   5       7.853
5       7.789   7.853
2.211   5       7.853
0       0       -0
10      0       -0
10      10      -0
0       10      -0

```

Fig. 14. Archivo de salida de datos

Si al introducir los datos, el usuario comete algún error (número de nodos fijos en primer anillo inadecuados, número de valores de densidades de fuerzas incoherente con el número de anillo, número de valores de coordenadas incoherentes con el número de nodos fijos, etc.), el programa mostrará un mensaje de error comunicándolo al usuario (Fig. 15)

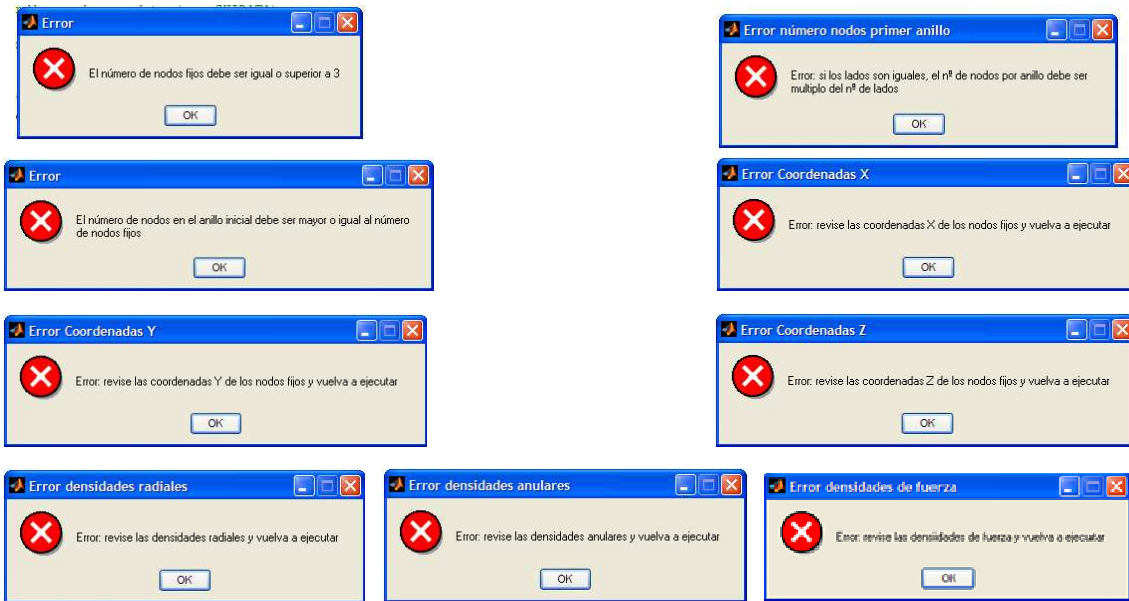


Fig. 15. Posibles mensajes de error por datos inadecuados

4. Ejemplos

A continuación, a través de la realización de varios ejemplos, se pretende mostrar al usuario las capacidades del programa.

El primer ejemplo consiste en una estructura con cuatro nodos fijos que forman en planta un cuadrado de lado 10 m. La red tiene 5 anillos y 40 nodos por anillo (dado que la cantidad de nodos del primer anillo se repite a lo largo de los demás). Las coordenadas de los nodos fijos, las densidades de fuerzas empleadas y el aspecto de la ventana de introducción de datos se presentan en la Fig. 16.

Coord X (m)	Coord Y (m)	Coord Z (m)
0	0	0
10	0	0
10	10	0
0	10	0

Coordenadas nodos fijos

q Radiales	q Anillos
2	1
2	1
2	1
4	1
5	50

Densidades de fuerza

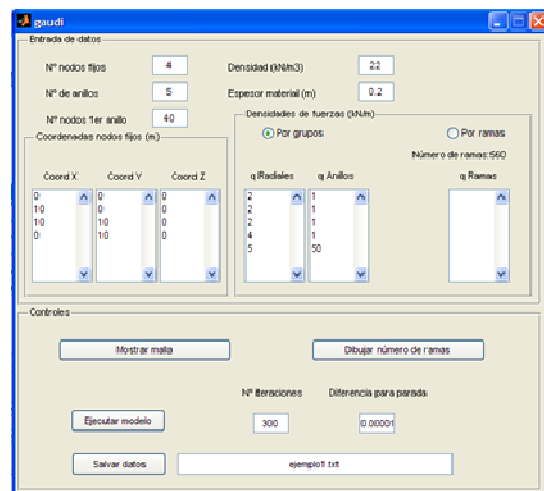


Fig. 16. Datos ejemplo 1

Tras presionar “Ejecutar modelo”, el programa muestra la siguiente figura tras realizar 14 iteraciones (Fig. 17):

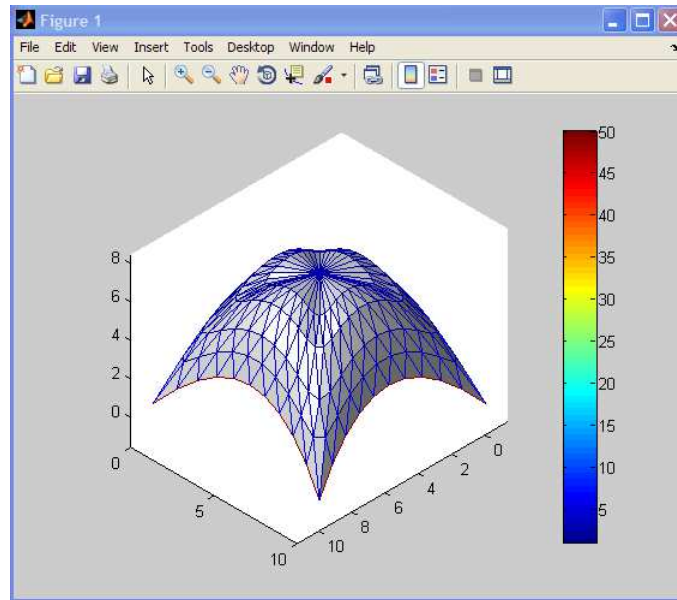


Fig. 17. Forma de equilibrio para el ejemplo 1

Para el segundo ejemplo los nodos fijos forman un decágono en planta de lado 10 m. Se emplean en este ejemplo 10 anillos y 40 nodos en el primero. Las coordenadas de los nodos fijos, las densidades de fuerzas empleadas y el aspecto de la ventana de introducción de datos se presentan en la Fig. 18.

Coord X (m)	Coord Y (m)	Coord Z (m)
0,00	15,39	0,00
3,09	5,88	0,00
11,18	0,00	0,00
21,18	0,00	0,00
29,27	5,88	0,00
32,36	15,39	0,00
29,27	24,90	0,00
21,18	30,78	0,00
11,18	30,78	0,00
3,09	24,90	0,00

Coordenadas nodos fijos

q Radiales	q Anillos
10	20
10	20
10	20
10	20
10	10
10	10
10	10
10	10
10	10
10	50

Densidades de fuerza

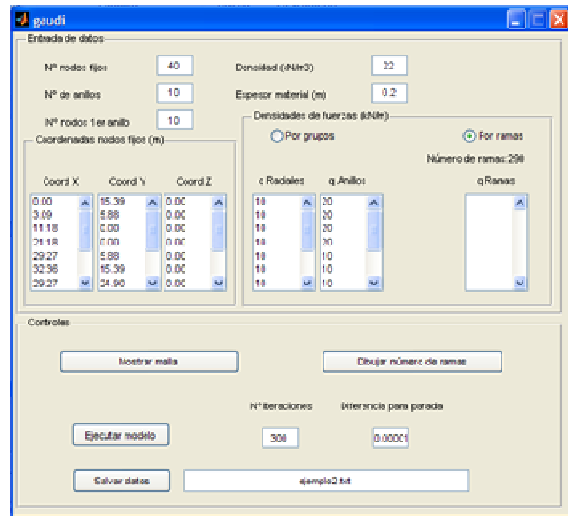


Fig. 18. Datos ejemplo 2

Tras realizar 13 iteraciones, el programa muestra la siguiente figura (Fig. 19):

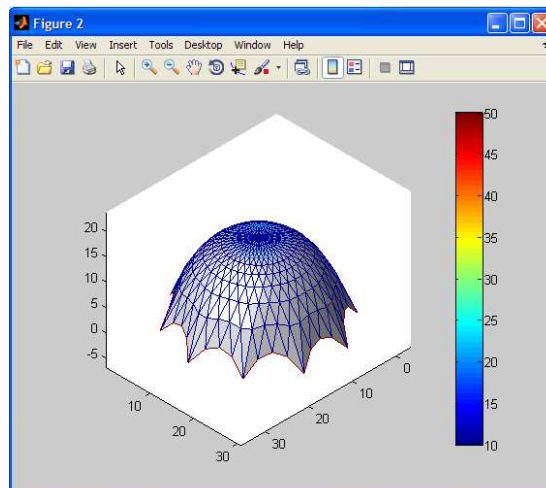


Fig. 19. Forma de equilibrio para el ejemplo 2

El tercer ejemplo no se corresponde con ninguna figura regular en planta. Los nodos fijos de este ejemplo se encuentran sobre una semicircunferencia de 10 m de radio y sobre las 4 esquinas de un cuadrado de 20 m de lado adyacente a la anterior semicircunferencia. Se emplean aquí 10

anillos, 11 nodos fijos (4 en las esquinas del cuadrado y 7 sobre la semicircunferencia) y 20 nodos por anillo. Las coordenadas de los nodos fijos, las densidades de fuerzas empleadas y el aspecto de la ventana de introducción de datos se presentan en la Fig. 20.

Coord X (m)	Coord Y (m)	Coord Z (m)
0,00	10,00	0,00
0,76	6,17	0,00
2,93	2,93	0,00
6,17	0,76	0,00
10,00	0,00	0,00
13,83	0,76	0,00
17,07	2,93	0,00
19,24	6,17	0,00
20,00	10,00	0,00
20,00	30,00	0,00
0,00	30,00	0,00

Coordenadas nodos fijos

q Radiales	q Anillos
10	1
5	1
5	1
5	1
5	1
5	100
35	1
40	1
45	1
50	10

Densidades de fuerza

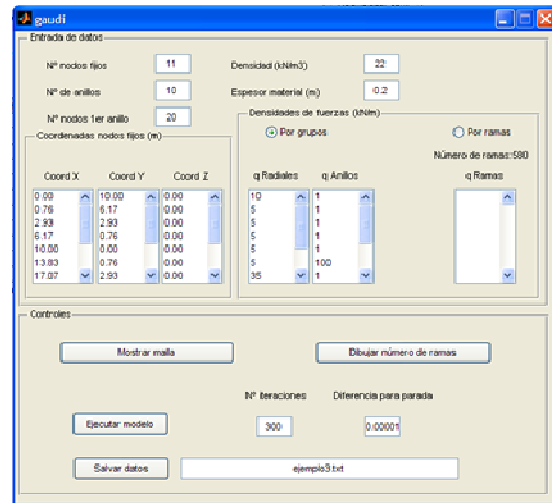


Fig. 20. Datos ejemplo 2

Tras realizar 16 iteraciones, el programa muestra la siguiente figura (Fig. 21).

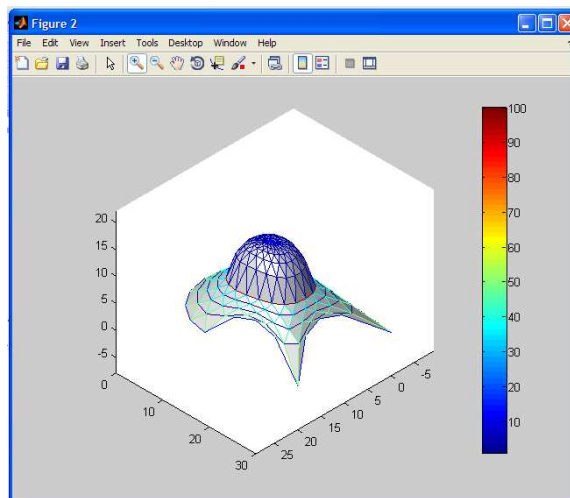


Fig. 21. Forma de equilibrio para el ejemplo 3

Para el cuarto ejemplo se empleará la entrada de datos por ramas. El input para la malla de este ejemplo es el mismo que en el primer ejemplo, aunque las densidades de fuerza cambian (Fig. 22). La Fig. 23 muestra el resultado, tras 13 iteraciones.

Coord X (m)	Coord Y (m)	Coord Z (m)
0	0	0
10	0	0
10	10	0
0	10	0

Coordenadas nodos fijos

Diagonal 1	Diagonal 2	Diagonal 3	Diagonal 4
9	19	29	39
97	117	137	157
98	118	138	158
218	238	258	278
219	239	259	279
339	359	379	399
340	360	380	400
460	480	500	520
461	481	501	441
Contorno	521-560		

Ramas con densidad de fuerza 100

El resto de ramas, densidad de fuerza 5

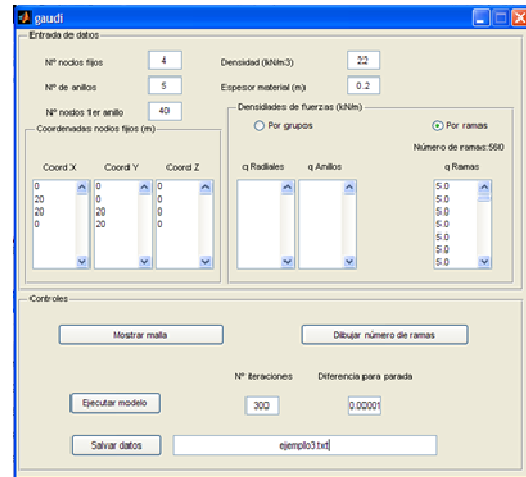


Fig. 22. Datos ejemplo 4

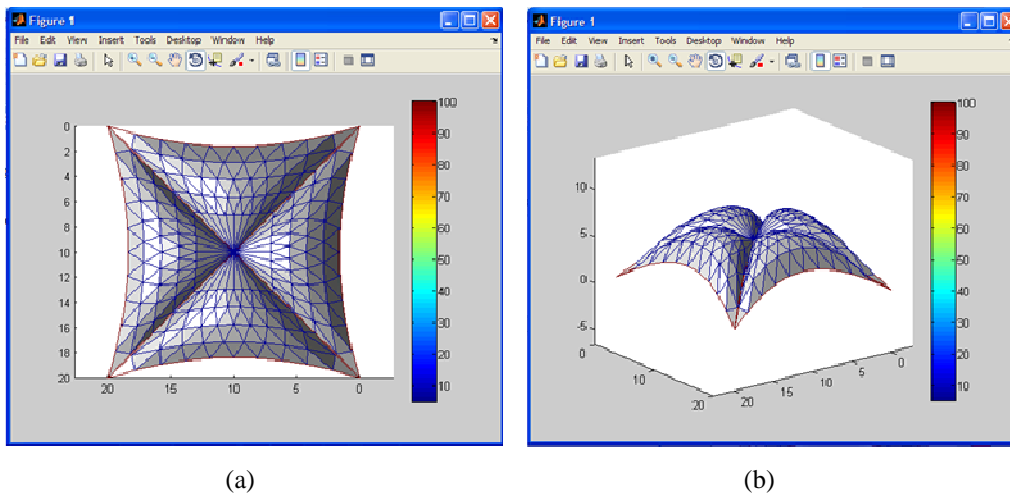


Fig. 23. Forma de equilibrio para el ejemplo 4: (a) vista en planta; (b) perspectiva

Contacto

Esta es la primera versión del programa GAUDI por lo que algunos errores pueden haber pasado desapercibido a los autores. Si el usuario encontrase alguno, por favor, comuníquese a jfcarbonell@ugr.es

Referencias

- [1] Linkwitz, K, and Schek, HJ. Einige Bemerkung von vorsgepannten Seilnetzkonstruktionen. Ingenieur-archiv 1971; 40: 145-158.
- [2] Hernández-Montes, E, Jurado-Piña, R, and Bayo, E. Topological mapping for tension structures. Journal of Structural Engineering 2006; 132(6): 970-977.
- [3] Isler, H. Generating shell shapes by physical experiments. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures 1993; 34(1): 56-63.
- [4] Schek, HJ. The force density method for form-finding and computation of general networks. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1974; 3: 115-134.
- [5] Jurado-Piña, R, Hernández-Montes, E, and Gil-Martín, LM. Topological mesh for shell structures. Applied Mathematical Modelling 2009; 33(2): 948-958.
- [6] Linkwitz, K. About formfinding of double-curved structures. Engineering Structures 1999; 21(8): 709–718.
- [7] Levy, R, and Spillers, WR. Analysis of geometrically nonlinear structures, 2nd Ed. London: Chapman & Hall; 2004.