LabDO-ENA v2.00

Laboratorio de Diseño Óptimo.
Estructuras de nudos articulados

1. Introducción
2. Fundamentos teóricos
3. Instalación de la aplicación
4. Inicio de la aplicación
5. Entorno gráfico de la aplicación
6. Entrada de datos
7. Salida de resultados
8. Referencias

1. Introducción

El objetivo de la aplicación LabDO-ENA es convertirse en una herramienta, fácil de utilizar, visual, e interactiva, de apoyo al aprendizaje del análisis y diseño óptimo de estructuras de nudos articulados.

LabDO-ENA permite, de forma muy sencilla, analizar y optimizar estructuras de nudos articulados con fuerzas aplicadas en los nudos y variaciones de temperatura o faltas de ajuste de las barras.

La aplicación permite generar, de forma sencilla, muchas configuraciones diferentes de una estructura, y utilizar diferentes variables y restricciones para el diseño óptimo.

2. Fundamentos teóricos

LabDO-ENA realiza el análisis y el diseño óptimo de estructuras de nudos articulados.

2.1. Análisis

LabDO-ENA realiza el análisis de las estructuras de nudos articulados mediante la formulación matricial por el método de los desplazamientos. Los conceptos básicos del análisis pueden encontrarse en el capítulo 2 Conceptos básicos del Análisis de Estructuras; el método de los nudos en los capítulos 3 Estructuras de nudos articulados y 4 Esfuerzos en estructuras isostáticas de nudos articulados, y el método de los desplazamientos en los capítulos 7 Análisis de estructuras de nudos articulados y 3 El método de los desplazamientos, de la referencia Martí, P. *Análisis de Estructuras*. Editorial Síntesis, Madrid, 2020.

La formulación matricial del método de los nudos puede encontrarse en el capítulo 6 Estructuras articuladas isostáticas. Cálculo de esfuerzos, de la referencia Martí, P. Análisis de Estructuras. Métodos clásicos y matriciales, Horacio Escarabajal Editores, Cartagena, 2007.

2.2. Diseño óptimo

LabDO-ENA realiza el diseño óptimo de estructuras de nudos articulados mediante Programación Matemática No Lineal; en particular, utilizando la función fmincon de MATLAB.

La formulación es la siguiente:

- Minimizar la función objetivo $f(\mathbf{x}) = a_1 * f_1(\mathbf{x}) + (1-a_1)\, f_2(\mathbf{x})$
- Sujeto a las restricciones:
  - De borde: $\mathbf{x}_{min} <= \mathbf{x} <= \mathbf{x}_{max}$
  - De respuesta $g(\mathbf{x}) <= 0$

siendo: **x** el vector de variables de diseño (áreas de las secciones transversales o valores asociados a las coordenadas de los nudos, y $0 <= a_1 <= 1$.

La función objetivo más habitual es el peso de la estructura.

Las variables consideradas son: de propiedades (asociadas a las áreas de las secciones transversales de las barras) y de geometría (asociadas a las coordenadas de los nudos).

Las restricciones consideradas son: de tensión, de pandeo, de esbeltez reducida, de desplazamiento, y de dominio de existencia de la solución.

Para el cálculo de las restricciones de pandeo y de esbeltez reducida, los valores necesarios de la sección transversal (inercias, radios de giro, etc.) se obtienen mediante ajustes a partir del área de la sección transversal.

3. Instalación de la aplicación

La aplicación se instala haciendo doble clic en el archivo de instalación "Instalador_LabDO-ENA_v2.00" . Aparece el icono de la aplicación (figura 1) y se prepara la instalación de la misma.

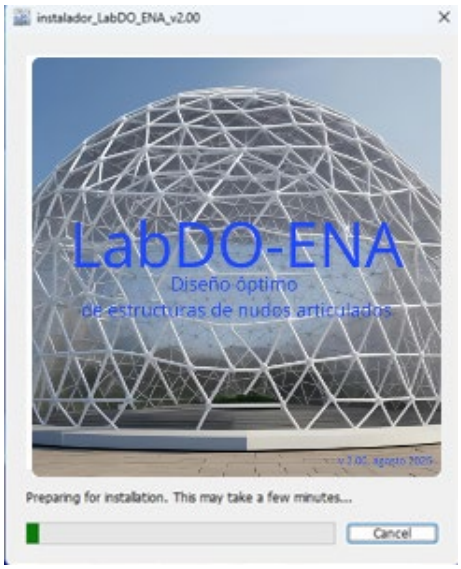

Figura 1. Preparación de la instalación de LabDO-ENA.

En unos segundos aparece el diálogo de inicio de la instalación (figura 2).

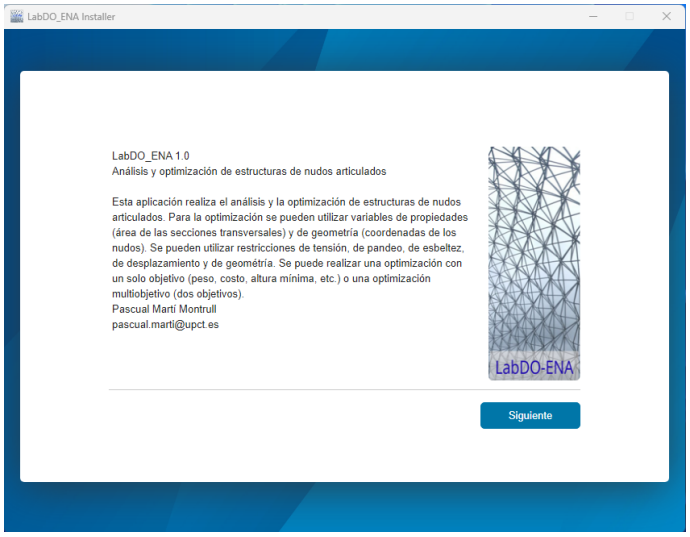

Figura 2. Inicio de la instalación de LabDO-ENA.

Pulsando “Siguiente” aparece un diálogo (figura 3) para definir el directorio de instalación de la aplicación. Se debe marcar la opción “Agregar atajo al escritorio“ si se quiere generar un acceso directo a la aplicación en el escritorio

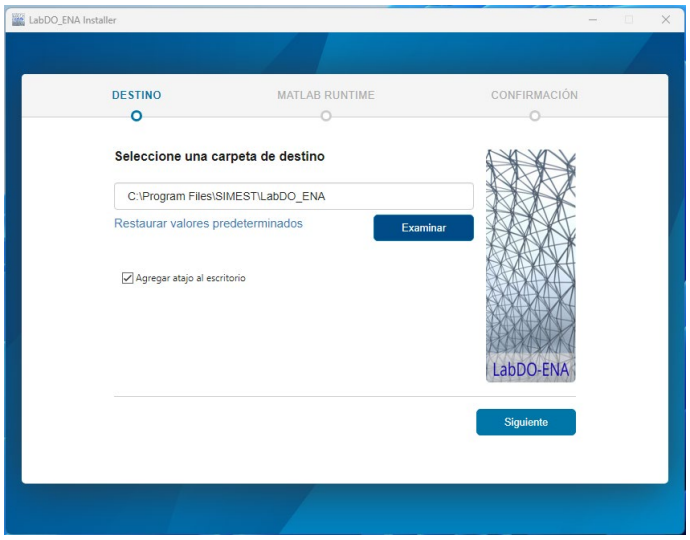

Figura 3. Directorio de instalación de LabDO-ENA
y opción marcada para generar un icono de acceso directo.

Pulsando “Siguiente” aparece un diálogo (figura 4) de confirmación de datos e inicio de la instalación.

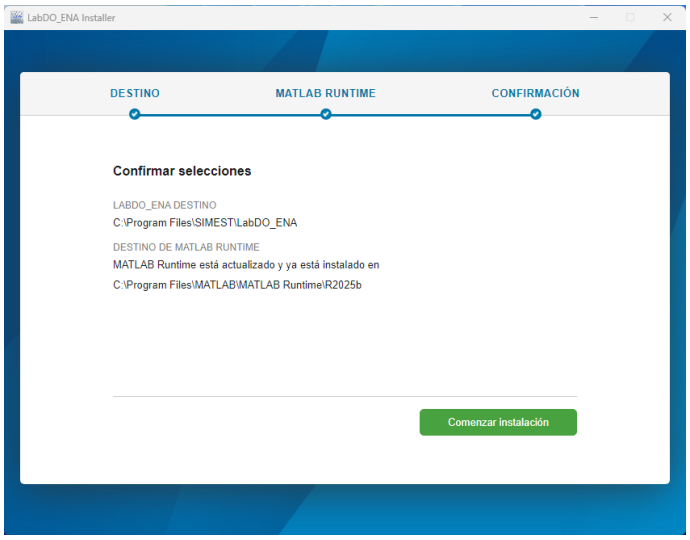

Figura 4. Confirmación de selecciones para iniciar la instalación.

Pulsando “Comenzar instalación’ se inicia la instalación. La primera vez que se instala el programa este proceso puede durar unos minutos, ya que el instalador tiene que descargar e instalar un software de MATLAB (“MATLAB Runtime”) que carga los archivos necesarios para que funcione la aplicación, aunque no se tenga instalado MATLAB. En las instalaciones posteriores la instalación es mucho más rápida, ya que no es necesario volver a descargar e instalar el “MATLAB Runtime”. Cuando finaliza la instalación aparece el diálogo de la figura 5.

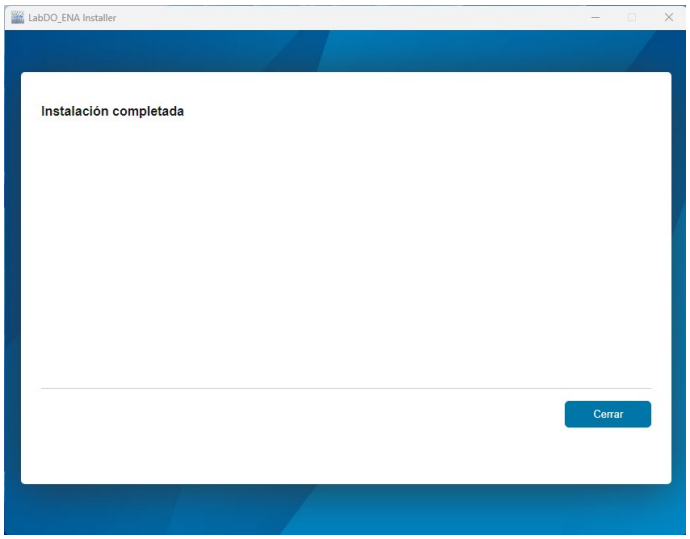

Figura 5. Fin de la instalación.

4. Inicio de la aplicación

Una vez finalizada la instalación, se puede ejecutar el programa haciendo doble clic en el icono "LabDO-ENA"

.

En primer lugar, aparece el icono de la aplicación, que permanece mientras se carga la misma.

Figura 6. Carga de la aplicación LabDO-ENA.

A continuación, aparece un diálogo de identificación del usuario. Este diálogo aparece, tanto para usuarios registrados como no registrados, la primera vez que se entra en la aplicación después de instalarla.

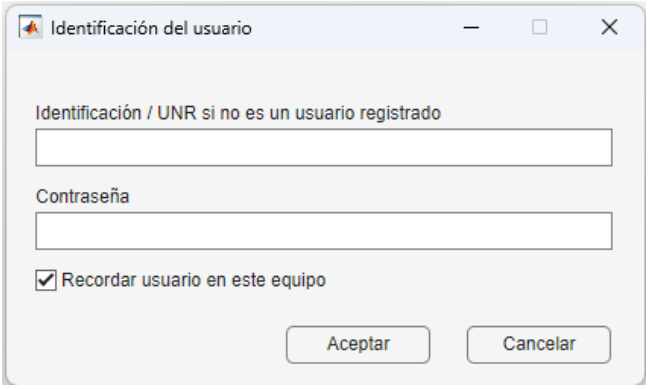

Figura 7. Entorno gráfico de la aplicación y diálogo de identificación del usuario.

Usuarios registrados. Como identificación, el usuario tiene que introducir el identificador y la Contraseña con el que está registrado en la aplicación.

Usuarios no registrados. Como identificación, el usuario tiene que introducir las iniciales de Usuario No Registrado (UNR). De esta forma se tiene acceso a las funcionalidades completas la aplicación durante un mes desde la instalación. El campo "Contraseña" no tiene que rellenarlo.

Si un usuario marca "Recordar usuario en este equipo", ya no se le volverá a solicitar la identificación ni la contraseña mientras no utilice el botón de la barra de herramientas de "Cierre de la sesión".

5. Entorno gráfico de la aplicación

Una vez validada la identificación, aparece el entorno gráfico (figura 8), con los datos de una de las estructuras incluidas en la aplicación ("CÚPULA").

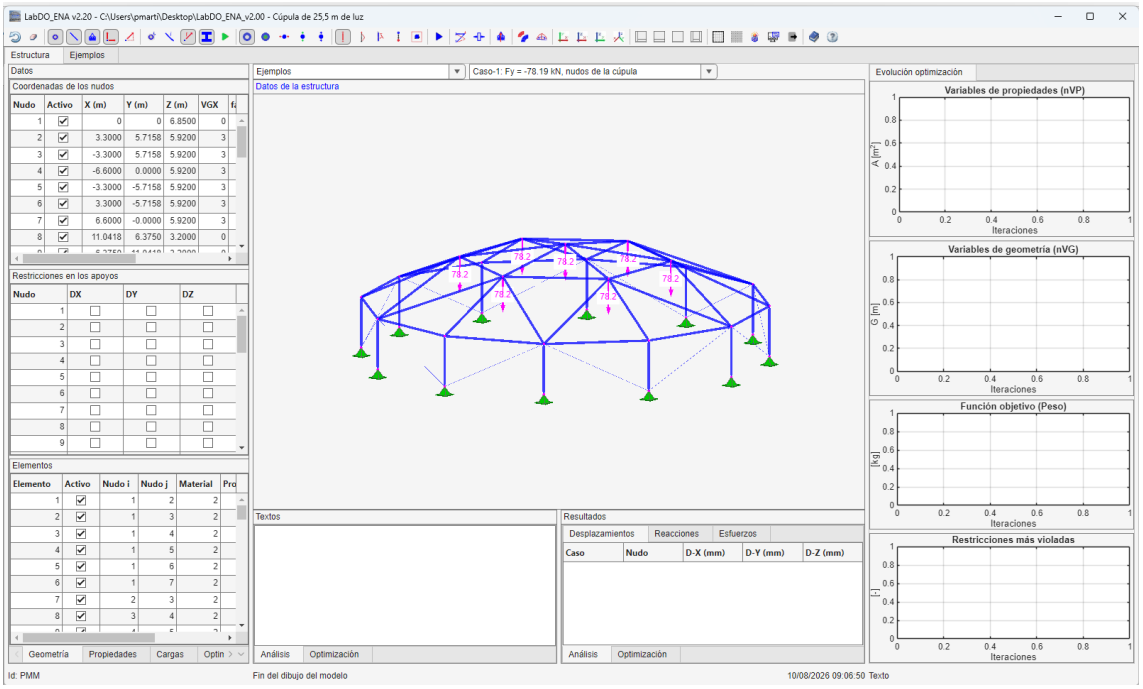

Figura 8. Entorno gráfico de la aplicación con datos de la estructura "CÚPULA".

En la parte superior izquierda de la pantalla aparecen dos pestañas: "Estructura" y "Ejemplos".

El contenido del entorno gráfico de la aplicación es el siguiente:

a) Pestaña "Estructura"

La pestaña "Estructura contiene cinco paneles: "Datos", "Ventana gráfica", "Textos", "Resultados" y "Evolución optimización".

a.1) Panel "Datos"

En la parte inferior, este panel contiene cuatro pestañas: "Geometría", "Propiedades", "Cargas" y "Optimización".

a.1.1) Pestaña "Propiedades"

Datos

Coordenadas de los nudos

Nudo	Activo	X (m)	Y (m)	Z (m)	VGX	f
1	☑	0	0	6.8500	0	
2	☑	3.3000	5.7158	5.9200	3	
3	☑	-3.3000	5.7158	5.9200	3	
4	☑	-6.6000	0.0000	5.9200	3	
5	☑	-3.3000	-5.7158	5.9200	3	
6	☑	3.3000	-5.7158	5.9200	3	
7	☑	6.6000	-0.0000	5.9200	3	
8	☑	11.0418	6.3750	3.2000	0	

Restricciones en los apoyos

Nudo	DX	DY	DZ
1	☐	☐	☐
2	☐	☐	☐
3	☐	☐	☐
4	☐	☐	☐
5	☐	☐	☐
6	☐	☐	☐
7	☐	☐	☐
8	☐	☐	☐
9	☐	☐	☐

Elementos

Elemento	Activo	Nudo i	Nudo j	Material	Pro
1	☑	1	2	2	
2	☑	1	3	2	
3	☑	1	4	2	
4	☑	1	5	2	
5	☑	1	6	2	
6	☑	1	7	2	
7	☑	2	3	2	
8	☑	3	4	2	

Geometría | Propiedades | Cargas | Optin

Datos

Coordenadas de los nudos

	VGX	facVGX	VGY	facVGY	VGZ	facVGZ
00	0	0	0	0	1	1
00	3	0	3	0	2	1
00	3	0	3	0	2	1
00	3	0	3	0	2	1
00	3	0	3	0	2	1
00	3	0	3	0	2	1
00	3	0	3	0	2	1
00	0	0	0	0	0	0

Restricciones en los apoyos

Nudo	DX	DY	DZ
1	☐	☐	☐
2	☐	☐	☐
3	☐	☐	☐
4	☐	☐	☐
5	☐	☐	☐
6	☐	☐	☐
7	☐	☐	☐
8	☐	☐	☐
9	☐	☐	☐

Elementos

i	Nudo j	Material	Propiedad	Beta_y	Beta_z
1	2	2	1	1	1
1	3	2	2	1	1
1	4	2	3	1	1
1	5	2	4	1	1
1	6	2	5	1	1
1	7	2	6	1	1
2	3	2	7	1	1
3	4	2	8	1	1

Geometría | Propiedades | Cargas | Optin

Figura 9a. Panel "Datos", pestaña "Geometría".

La pestaña "Geometría" tiene tres tablas:

1. **Coordenadas de los nudos**. Se muestran la actividad del nudo para la optimización de geometría, las coordenadas *X, Y, Z*; la variable de geometría asociada a la coordenada X, el factor por el que se multiplica la variable para obtener la coordenada. Igual para las coordenadas *Y* y *Z*. Las columnas 3 a 12 de la tabla son editables.
2. **Restricciones en los apoyos**. Se muestran los grados de libertad restringidos en los apoyos de la estructura. Las columnas 2 a 4 de la tabla son editables.
3. **Elementos**. Se muestran la actividad del elemento para la optimización, las conexiones (nudo inicial – nudo final), el material y las propiedades, y los coeficientes de pandeo beta_y y beta_z del elemento. Las columnas 2 a 8 de la tabla son editables.

a.1.2) Pestaña "Propiedades"

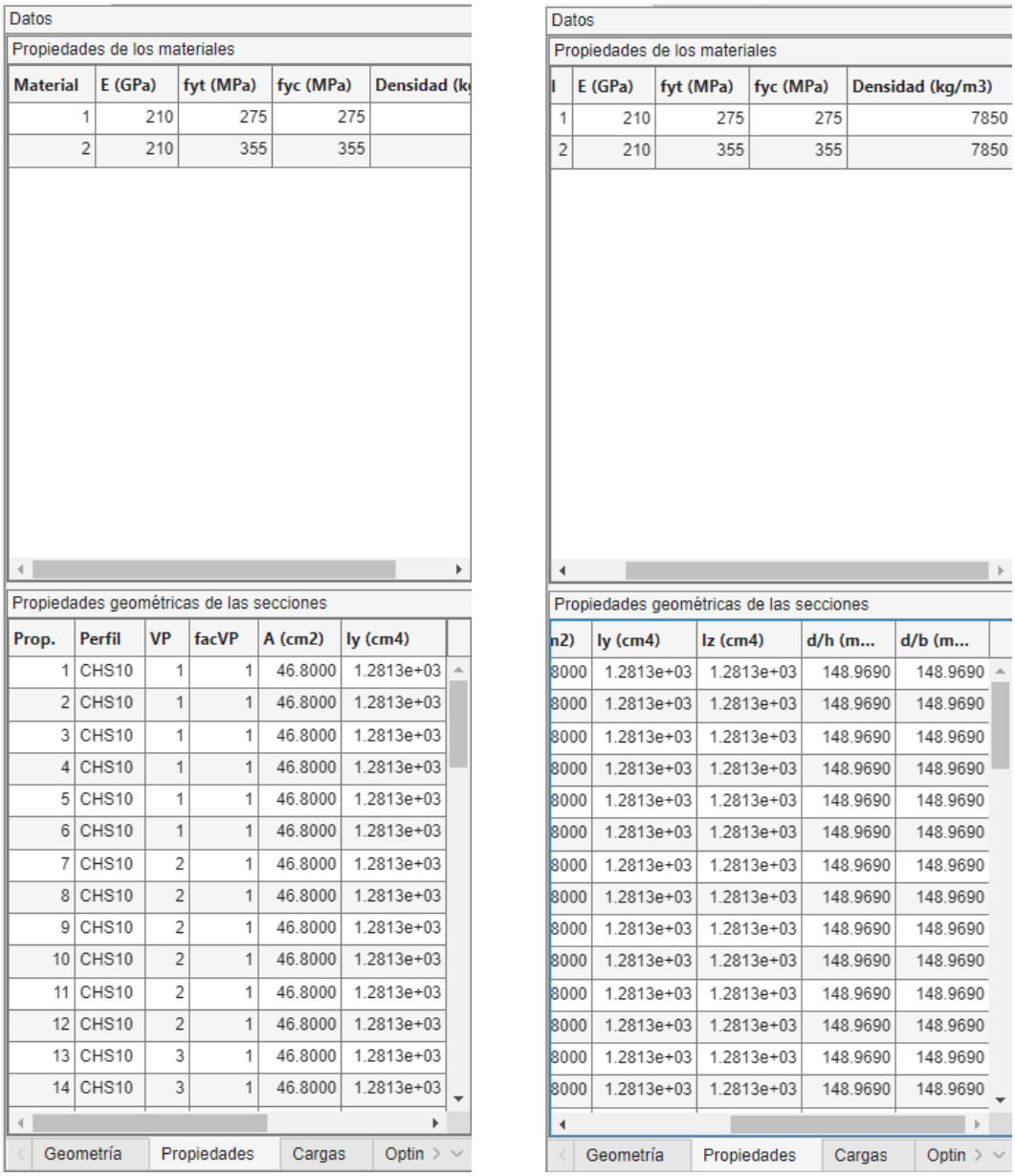

Figura 9b. Panel "Datos", pestaña "Propiedades".

La pestaña "Propiedades" tiene dos tablas:

1. **Propiedades de los materiales**. Se muestran el módulo de elasticidad, el límite elástico a tracción, el límite elástico a compresión, y la densidad. Las columnas 2 a 5 de la tabla son editables.
2. **Propiedades geométricas de las secciones**. Se muestran el tipo de perfil, la variable de propiedades asociada, el factor por el que se multiplica la variable para obtener el área, el valor del área, los valores de los momentos de inercia y las relaciones d/h y d/b obtenidas mediante ajustes del tipo de perfil. Las columnas 1 a 3 de la tabla son editables.

a.1.3) Pestaña "Cargas"

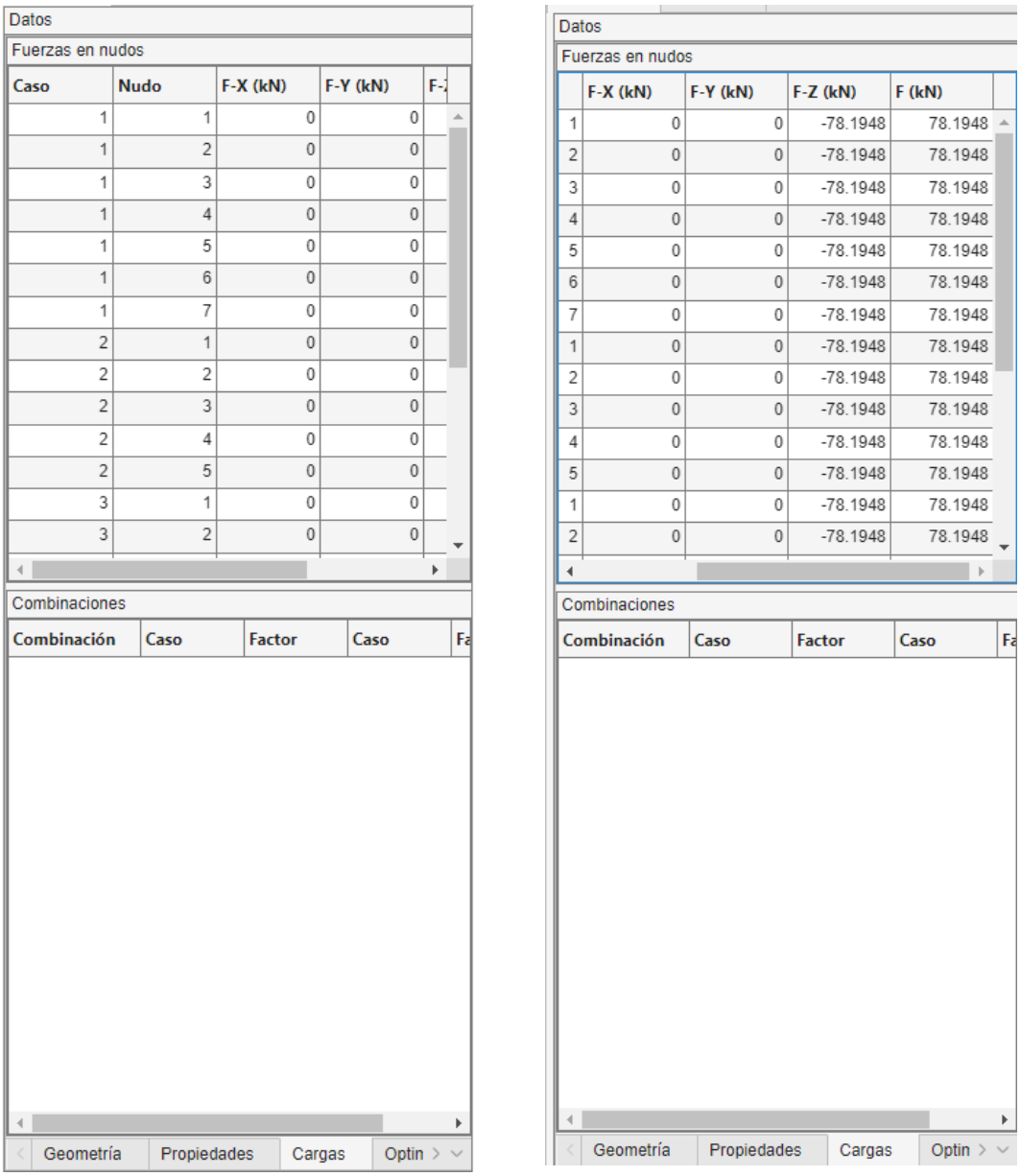

Figura 9c. Panel "Datos", pestaña "Cargas".

La pestaña "Cargas" tiene dos tablas:

1. **Fuerzas en nudos**. Se muestran, para cada caso de carga, las fuerzas aplicadas en los nudos. las coordenadas de los nudos de la estructura. Las columnas 3 a 5 de la tabla son editables para estructuras tridimensionales.
2. **Combinaciones (no activa)**. Se muestran, para cada combinación, los casos simples que intervienen en la combinación y los factores por los que se multiplican.

a.1.4) Pestaña "Optimización"

Datos

Funciones	Tipo	Valor	Unidades	facl
fobj	Peso	1	[kg]	
fMO1	Peso	1.2591e+04	[kg]	
fMO2	Dm	0	[m]	

Variables	Tipo	xmin	xinicial	xma
1	A [m2]	0.0427	1.0000	
2	A [m2]	0.0427	1.0000	
3	A [m2]	0.0427	1.0000	
4	A [m2]	0.0427	1.0000	
5	G [m]	-2.0000	0	
6	G [m]	-2.0000	0	
7	G [m]	-1.0000	0	

Restricciones	Valor
Núm. rests. de tensión/pandeo/esbeltez	66
. Coef. parcial de seguridad ELU	1.5
. Tipo de pandeo	EC3
. Esbeltez reducida máxima (compresión)	
. Esbeltez reducida máxima (tracción)	
Núm. de restricciones de desplazamiento	1.0000
* Nudo 1, desplazamiento Z [m] <=	0.0255
Núm. de restricciones de geometría	1.0000

Parámetros de optimización	Valor
Algoritmo de optimización	SQP
Tolerancia de la función objetivo	0.0000
Tolerancia de las variables	0.0000
Tolerancia de las restricciones	0.0000
Núm. máx. de evaluaciones de FO	560.0000
Número máximo de iteraciones	100.0000

a | Propiedades | Cargas | Optimización

Datos

	Valor	Unidades	facMO	refMO
	1	[kg]	-	-
	1.2591e+04	[kg]	1	1.2591e+04
	0	[m]	0	0.0250

s	Tipo	xmin	xinicial	xmax
1	A [m2]	0.0427	1.0000	1.7094
2	A [m2]	0.0427	1.0000	1.7094
3	A [m2]	0.0427	1.0000	1.7094
4	A [m2]	0.0427	1.0000	1.7094
5	G [m]	-2.0000	0	2.0000
6	G [m]	-2.0000	0	2.0000
7	G [m]	-1.0000	0	1.0000

Restricciones	Valor
. Tipo de pandeo	EC3
. Esbeltez reducida máxima (compresión)	
. Esbeltez reducida máxima (tracción)	
Núm. de restricciones de desplazamiento	1.0000
* Nudo 1, desplazamiento Z [m] <=	0.0255
Núm. de restricciones de geometría	1.0000
RG-1Coor(1,2) - Coor(8,2) <=	3.6500

Parámetros de optimización	Valor
Algoritmo de optimización	SQP
Tolerancia de la función objetivo	0.0000
Tolerancia de las variables	0.0000
Tolerancia de las restricciones	0.0000
Núm. máx. de evaluaciones de FO	560.0000
Número máximo de iteraciones	100.0000

a | Propiedades | Cargas | Optimización

Figura 9d. Panel "Datos", pestaña "Optimización".

La pestaña "Optimización" tiene cuatro tablas:

1. **Funciones**. Permite definir la función objetivo a utilizar para la optimización. Se puede utilizar una función objetivo única (fobj) o una función objetivo ponderada de dos funciones objetivo (fMO1 y fMO2).

2. **Variables**. Permite definir el tipo de variables (de propiedades A, o de geometría G) a utilizar, así como los valores mínimo, inicial y máximo de las variables de optimización (**x**).
3. **Restricciones**. Permite definir parámetros asociados a las restricciones.
4. **Parámetros de optimización**. Permite definir parámetros asociados al algoritmo de optimización

a.2) Panel "Ventana gráfica"

Es una ventana gráfica en la que se muestra inicialmente el modelo de análisis (geometría, condiciones de apoyo y cargas aplicadas), y los resultados y/o la estructura resultante una vez realizado el análisis o la optimización (figura 10, superior).

a.3) Panel "Textos"

Es un panel para la salida de textos con los resultados del análisis (Figura 10, inferior izquierda).

a.4) Panel "Resultados"

Es un panel con tablas para la salida de los resultados del análisis y la optimización. (Figura 10, inferior izquierda).

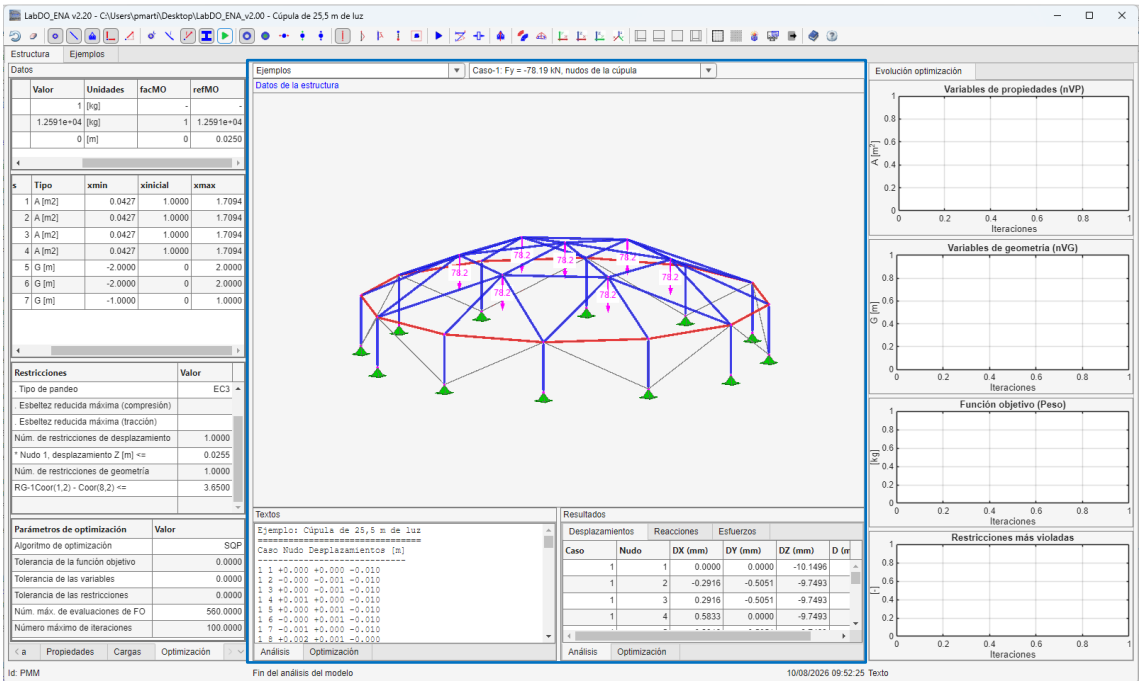

Figura 10. Ventana gráfica, área de textos y tablas de resultados.

a.5) Panel "Evolución optimización"

Es un panel con gráficos para la salida de la evolución de los resultados de la optimización. (Figura 10, inferior izquierda).

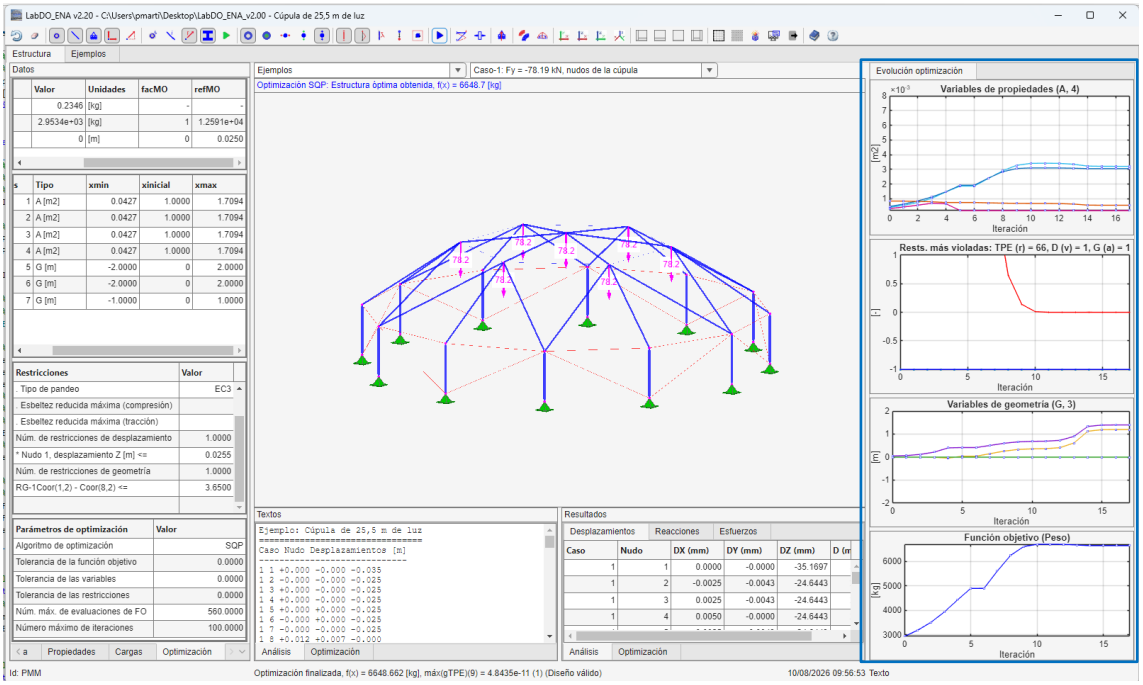

Figura 11. Panel "Evolución optimización".

b) Pestaña "Ejemplos"

Contiene 12 ejemplos de estructuras para optimizar, cuyos datos pueden cargarse pulsando los botones inferiores de cada estructura.

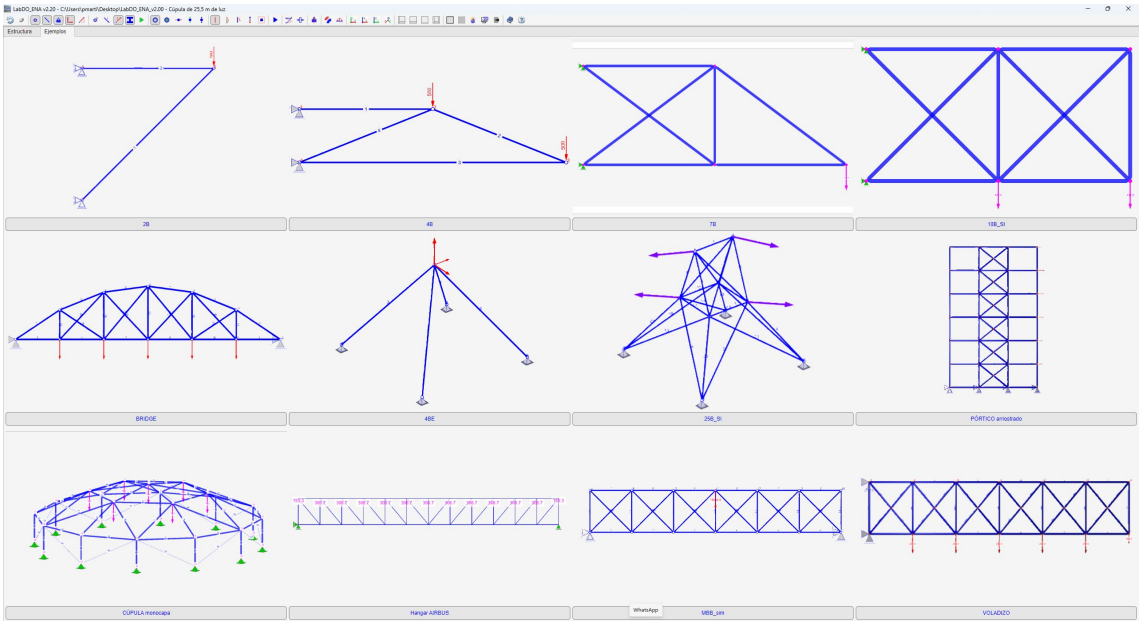

Figura 12. Ejemplos de estructuras para optimizar.

Barra de herramientas

En esta barra de herramientas están los botones para realizar las diferentes utilidades de la aplicación.

Figura 13 Barra de herramientas.

Las diferentes operaciones y procesos que se pueden realizar, de izquierda a derecha en la barra de herramientas, son:

Regenera el problema a su estado inicial.

Borra resultados e inicializa variables de optimización.

Activa/desactiva la representación de nudos.

Activa/desactiva la representación de barras.

Activa/desactiva la representación de apoyos.

Activa/desactiva la numeración de nudos.

Activa/desactiva la numeración de barras.

Activa/desactiva etiquetar fuerzas.

Activa/desactiva la representación 3D de barras.

Análisis de la estructura por el método de los desplazamientos.

Activa/desactiva la optimización con variables de propiedades.

Activa/desactiva la opción de unificar las variables de propiedades.

Activa/desactiva las variables de geometría de movimiento en el eje *X*.

Activa/desactiva las variables de geometría de movimiento en el eje *Y*.

Activa/desactiva las variables de geometría de movimiento en el eje *Z*.

 Activa/desactiva las restricciones de tensión.

Activa/desactiva las restricciones de pandeo.

Activa/desactiva las restricciones de esbeltez reducida.

Activa/desactiva las restricciones de desplazamiento.

Activa/desactiva las restricciones de dominio (borde).

Activa la optimización.

Activa/desactiva la representación de la deformada de la estructura.

Activa/desactiva la representación de los esfuerzos axiales de las barras.

Activa/desactiva la representación de las reacciones de la estructura.

Activa/desactiva la representación de los ejes.

Activa/desactiva el dibujo de las referencias del óptimo.

Activa la vista perpendicular al plano *XY*.

Activa la vista perpendicular al plano *XZ*.

Activa la vista perpendicular al plano *YZ*.

Activa la vista isométrica *XYZ*.

Layout “Datos+Modelo+Resultados”.

Layout “Modelo+Resultados”.

Layout “Modelo”.

Layout “Datos+Modelo+Resultados+Evolución”.

Activa/desactiva los ejes.

Activa/desactiva la malla de puntos.

Activa/desactiva la iluminación.

Captura de la figura de LabDO-ENA. Captura y guarda el contenido de la pestaña activa (“Estructura” o “Ejemplos”).

Cerrar sesión (Se solicitará identificación en el próximo inicio).

Manual de usuario. Se visualiza el archivo pdf del manual de usuario de la aplicación.

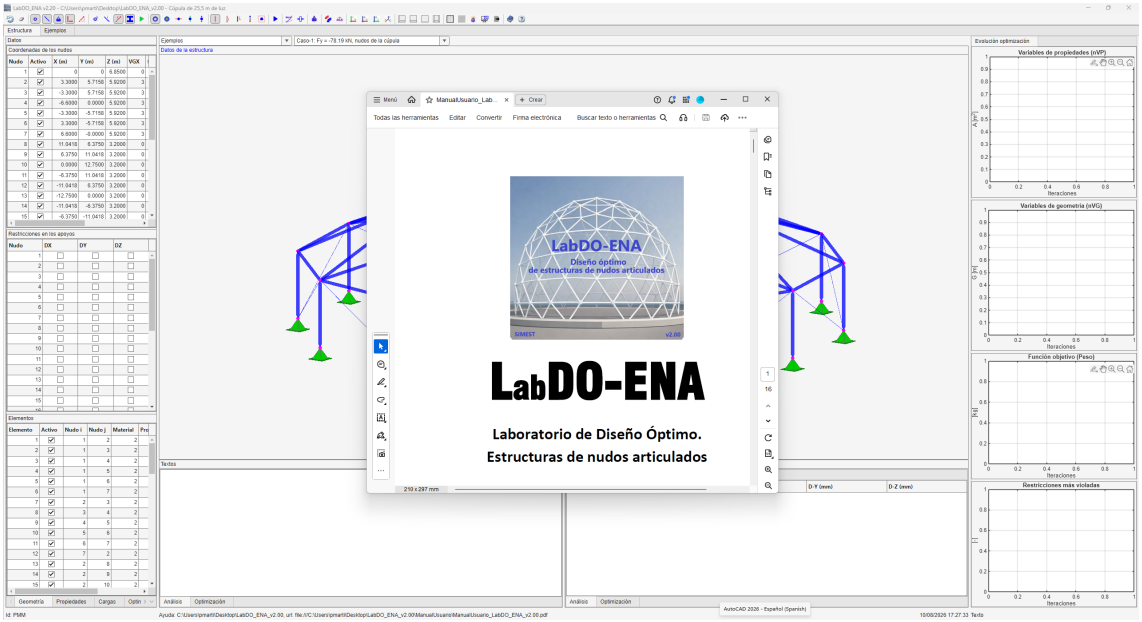

Figura 13. Manual de usuario.

Acerca de LabDO-ENA.

3. Entrada de datos

La entrada de datos se puede realizar por dos procedimientos:

1. Utilizando uno de los ejemplos disponibles en la aplicación (figura 12). Para este procedimiento basta con seleccionar el caso deseado, y hacer doble clic en el pie de figura de este.
   Los ejemplos muestran las posibilidades de LabDO-ENA para diferentes estructuras.
2. Cambiando los valores de los datos del caso inicial o de uno de los ejemplos de la aplicación. Se parte del caso inicial, o se carga uno de los ejemplos y se cambian los valores de este. Al realizar cambios en los datos, el modelo se actualiza inmediatamente.

4. Salida de resultados

La salida de los resultados se realiza: 1) a través de las ventanas gráficas, 2) a través del área de textos, 3) a través de las tablas de resultados, y 4) a través del panel "Evolución de la optimización".

En las figuras 14 se muestran los resultados del análisis del ejemplo"CÚPULA". Deformada amplificada por 250 y esfuerzos axiales.

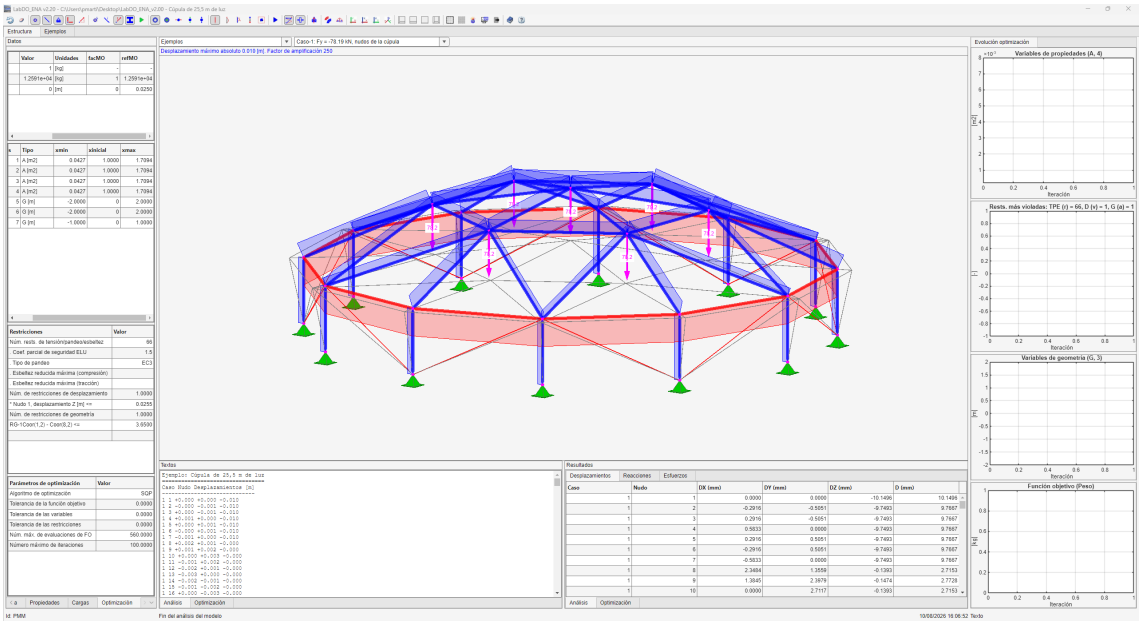

Figura 14. Ejemplo "CÚPULA". Algunos resultados del análisis.

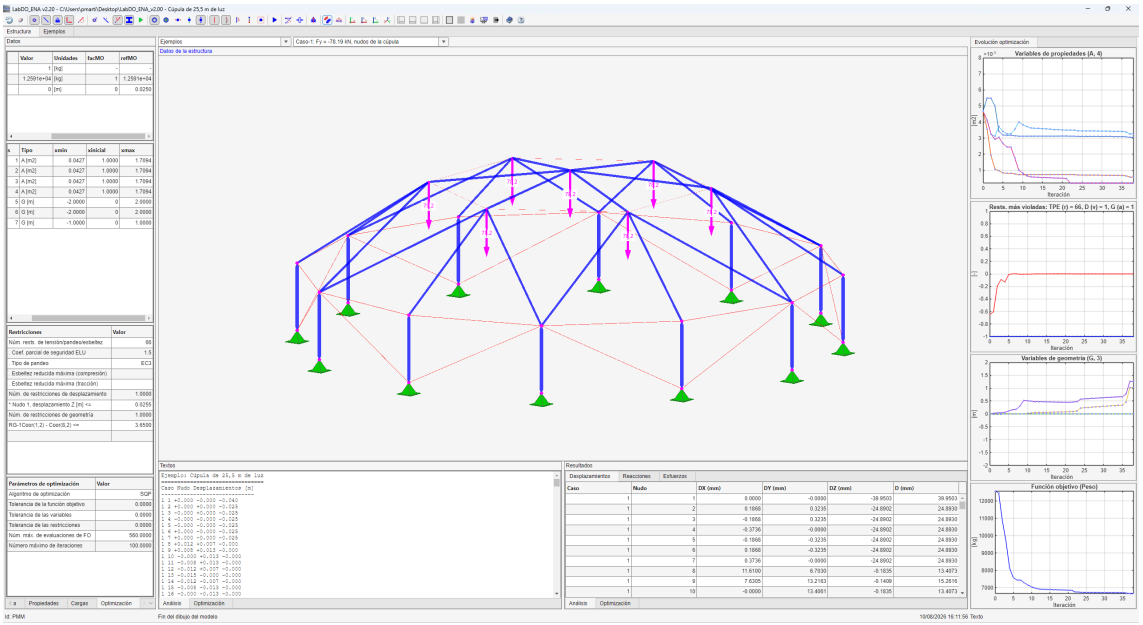

Figura 15. Ejemplo"CÚPULA". Resultados de la optimización con función objetivo Peso, variables áreas (de propiedades) y desplazamientos verticales de los nudos de la cúpula, y restricciones de resistencia y de pandeo de los elementos.

5. Referencias

- Martí, P. *Análisis de Estructuras.* Ed. Síntesis, Madrid, 2020.
- Martí, P. Análisis de Estructuras. Métodos clásicos y matriciales, Horacio Escarabajal Editores, Cartagena, 2007.
- Martí, P. Introducción al diseño óptimo de estructuras. Cartagena, agosto de 2026.