

Universidad de La Laguna

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo de Fin de Grado  
de Tecnologías Marinas**

**Estudio de los esfuerzos térmicos y mecánicos de  
un generador de vapor en la fase de encendido**

Presentado por

**Yauci Cabello Reyes**

Santa Cruz de Tenerife, 29 de junio de 2019



# Autorización

Pedro Rivero Rodríguez, Profesor Titular de Universidad perteneciente al área de conocimiento de Construcciones Navales del Departamento de *Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima* de la Universidad de La Laguna hace constar que:

Yauci Cabello Reyes, ha realizado bajo mi dirección el trabajo de fin de grado titulado: Estudio de los esfuerzos térmicos y mecánicos de un generador de vapor en la fase de encendido.

Revisado dicho trabajo, estimo que reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que le sea designado.

Para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente documento en Santa Cruz de Tenerife, a 29 de junio de 2019.

Fdo.: Pedro Rivero Rodríguez  
-Tutor del trabajo-



# Resumen

En el presente estudio se analiza el comportamiento termomecánico de los haces tubulares de un generador de vapor durante su fase de encendido. El principal problema que surge durante esta fase es la carga mecánica y térmica a la que se ven sometidos los materiales en el arranque en frío. Esto se debe a la diferencia de temperaturas que se produce entre el hogar y el interior de los tubos, provocando entre ellos un esfuerzo mecánico mayor que en su funcionamiento a régimen nominal. Por ello, los fabricantes recomiendan una carga del quemador lo más baja posible en torno al 25 % durante el arranque, hasta alcanzar un calentamiento progresivo en los elementos internos del generador. En este estudio durante la fase de encendido de los generadores de vapor, se analizan las recomendaciones de los fabricantes, se tienen en cuenta las condiciones más desfavorables que pudieran darse durante el encendido: máxima temperatura en el hogar y temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ) para el agua del interior de los tubos. Así se investigan posibles alternativas para reducir el tiempo en el momento del encendido, o bien se corrobora dichas recomendaciones. Además se visualizan las zonas donde se localizan los mayores esfuerzos.

El proyecto se desarrolla en varias fases. Primero se modeliza un generador de vapor partiendo de dimensiones reales, en el software libre (FreeCAD). Luego, se realiza con la herramienta (FEM) un análisis utilizando el método de elementos finitos, que es un método numérico de ecuaciones diferenciales parciales que se aplica en las geometrías creadas para el estudio termomecánico. Se supone una temperatura en el hogar con una carga del quemador del 100 % en el encendido, igual a su demanda máxima. También se analizan los resultados obtenidos en el estudio, comprobando el comportamiento de los materiales con el quemador a máxima carga y la temperatura del agua en el interior de los tubos a  $25^{\circ}\text{C}$ . Finalmente se hace un análisis comparativo entre las recomendaciones de los fabricantes y los datos obtenidos en este estudio.



# Abstract

In the present study, the thermomechanical behavior of the tubular bundles of a steam generator during its ignition phase is studied. The main problem that arises during this phase is the mechanical and thermal load to which the materials are subjected in the cold start. This is due to the difference in temperatures that occurs between the furnace and the interior of the pipes, causing a greater mechanical effort among them than in their operation at nominal speed. Therefore, manufacturers recommend a burner load as low as possible around 25 % during start-up, until a progressive heating is achieved in the internal elements of the generator. In this study during the ignition phase of the steam generators, the recommendations of the manufacturers are analyzed, taking into account the most unfavorable conditions that could occur during the ignition: maximum temperature in the home and room temperature (25°C) for the water inside the tubes. So it will be study possible solutions to reduce the time in the ignition system, or corroborate these recommendations. In addition, the areas where the greatest efforts are located are displayed.

The project will be developed in several phases. First the steam generator is modeled starting from real dimensions, in free software (FreeCAD). Then, an analysis using the finite element method, which is a numerical method of partial differential equations applied in to geometries, created for the thermomechanical study, is performed with the tool FEM. A temperature in the furnace is assumed with a burner load of 100 % at ignition, equal to its maximum demand. The results obtained in the study are also analyzed, checking the behavior of the materials with the burner at maximum load and the temperature of the water inside the tubes at 25°C. Finally, a comparative analysis will be made between the recommendations of the manufacturers and the data obtained in this study.



# Índice general

|  |          |
|--|----------|
| Lista de figuras   | xviii    |
| Lista de tablas  | xix      |
| <b>1. Introducción</b>                                     | <b>1</b> |
| <b>2. Objetivos</b>  | <b>3</b> |
| <b>3. Metodología</b>                                      | <b>5</b> |
| 3.1. Planificación . . . . .                               | 5        |
| 3.2. Alcance del estudio . . . . .                         | 6        |
| 3.3. Modelización del análisis mecánico: FreeCAD . . . . . | 8        |
| 3.4. Modelización 3D del generador de vapor . . . . .      | 8        |
| 3.4.1. Unión colectores y tubos . . . . .                  | 8        |
| 3.4.2. Aislamiento térmico . . . . .                       | 9        |
| 3.4.3. Carcasa . . . . .                                   | 9        |
| 3.5. Método de elementos finitos . . . . .                 | 10       |
| 3.6. Módulo FEM . . . . .                                  | 12       |
| 3.7. Material: elección y propiedades . . . . .            | 12       |
| 3.7.1. Módulo de Young . . . . .                           | 13       |
| 3.7.2. Coeficiente de Poisson . . . . .                    | 15       |
| 3.7.3. Densidad . . . . .                                  | 15       |
| 3.7.4. Conductividad térmica . . . . .                     | 16       |
| 3.7.5. Coeficiente de expansión . . . . .                  | 16       |
| 3.7.6. Calor específico . . . . .                          | 16       |
| 3.7.7. Esfuerzos sufridos por el material . . . . .        | 16       |
| 3.8. Análisis estructural . . . . .                        | 18       |
| 3.8.1. Condiciones de Contorno . . . . .                   | 18       |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. Características del generador de vapor</b>   | <b>23</b> |
| 4.1. Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS . . . . .                                  | 23        |
| 4.1.1. Datos de diseño . . . . .   | 25        |
| 4.1.2. Planos constructivos . . . . .  | 26        |
| 4.1.3. Datos característicos de la caldera en relación a la carga . . . . .                  | 26        |
| 4.2. Transferencia de calor en el generador de vapor . . . . .                               | 27        |
| 4.2.1. Radiación . . . . .   | 27        |
| 4.2.2. Convección . . . . .  | 29        |
| 4.2.3. Conducción . . . . .  | 29        |
| <b>5. Resultados</b>   | <b>33</b> |
| 5.1. Banco de tubos frontal con una carga del quemador del 100 % . . . . .                   | 33        |
| 5.1.1. Aplicación de temperaturas en el generador de vapor . . . . .                         | 33        |
| 5.1.2. Esfuerzos Von Misses . . . . .  | 33        |
| 5.1.3. Desplazamiento absoluto . . . . .   | 35        |
| 5.1.4. Máx. Shear Stress (esfuerzos cortantes) . . . . .                                     | 35        |
| 5.1.5. Máx. Principal Stress (Tracción) . . . . .  | 37        |
| 5.1.6. Mín. Principal Stress (Compresión) . . . . .  | 40        |
| 5.1.7. Deformación en la dirección de los ejes X, Y, Z . . . . .                             | 44        |
| 5.2. Banco de tubos frontal con una carga del quemador del 50 % . . . . .                    | 46        |
| 5.2.1. Aplicación de temperaturas en el generador de vapor . . . . .                         | 46        |
| 5.2.2. Esfuerzos Von Misses . . . . .  | 46        |
| 5.2.3. Desplazamiento absoluto . . . . .   | 48        |
| 5.2.4. Máx. Shear Stress (esfuerzos cortantes) . . . . .                                     | 48        |
| 5.2.5. Máx. Principal Stress (Tracción) . . . . .  | 49        |
| 5.2.6. Mín. Principal Stress (Compresión) . . . . .  | 50        |
| 5.2.7. Deformación en la dirección de los ejes X, Y, Z . . . . .                             | 50        |
| 5.3. Banco de tubos frontal con una carga del quemador del 25 % . . . . .                    | 53        |
| 5.3.1. Aplicación de temperaturas en el generador de vapor . . . . .                         | 53        |
| 5.3.2. Esfuerzos Von Misses . . . . .  | 53        |
| 5.3.3. Desplazamiento absoluto . . . . .   | 55        |
| 5.3.4. Máx. Shear Stress (esfuerzos cortantes) . . . . .                                     | 55        |
| 5.3.5. Máx. Principal Stress (Tracción) . . . . .  | 56        |
| 5.3.6. Mín. Principal Stress (Compresión) . . . . .  | 56        |
| 5.3.7. Deformación en la dirección de los ejes X, Y, Z . . . . .                             | 58        |
| <b>6. Conclusiones</b>   | <b>65</b> |
| <b>Anexos</b>  | <b>69</b> |
| <b>A. Planos constructivos y curvas del generador de vapor MITSUBISHI MAC-BS AUX. BOILER</b> | <b>69</b> |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>B. Estudio termomecánico del generador de vapor (1)</b> | <b>87</b>  |
| <b>C. Estudio termomecánico del generador de vapor (2)</b> | <b>109</b> |
| <b>D. Estudio termomecánico del generador de vapor (3)</b> | <b>131</b> |
| <b>E. Estudio termomecánico del generador de vapor (4)</b> | <b>153</b> |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>165</b> |



# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Estructura interna del generador . . . . .  | 6  |
| 3.2. Cuerpo del generador para el estudio termomecánico . . . . .                                      | 7  |
| 3.3. Banco de tubos del generador de vapor . . . . .   | 7  |
| 3.4. Tubos completos amurallados del generador . . . . .   | 8  |
| 3.5. Aislamiento térmico del generador . . . . .   | 9  |
| 3.6. Carcasa parte superior del generador . . . . .  | 9  |
| 3.7. Carcasa parte inferior del generador . . . . .  | 10 |
| 3.8. Parámetro de mallado (muy burda) . . . . .  | 11 |
| 3.9. Parámetro de mallado (fino) . . . . .   | 11 |
| 3.10. Parámetros introducidos del material para la simulación . . . . .                                | 14 |
| 3.11. Tracción . . . . .   | 17 |
| 3.12. Compresión . . . . .   | 18 |
| 3.13. Desplazamiento absoluto . . . . .  | 19 |
| 3.14. Restricciones estáticas en el generador . . . . .  | 19 |
| 3.15. Restricciones térmicas en el generador . . . . .   | 20 |
| 3.16. Aplicación de temperatura (K) en el generador de vapor . . . . .                                 | 21 |
| 3.17. Simulación de propagación de calor (K) del haz tubular del generador de vapor . . . . .          | 21 |
| 4.1. Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS . . . . .  | 24 |
| 4.2. Presión del colector . . . . .  | 25 |
| 4.3. Radiación en el interior del hogar . . . . .  | 28 |
| 4.4. Transferencia térmica por convección en el generador . . . . .                                    | 30 |
| 4.5. Conducción en el generador de vapor . . . . .   | 31 |
| 5.1. Banco de tubos del generador . . . . .  | 34 |
| 5.2. Presentación VTK de temperaturas (K) en el generador . . . . .                                    | 34 |
| 5.3. Esfuerzos Von Misses del generador en la simulación . . . . .                                     | 35 |
| 5.4. Representación VTK de los esfuerzos de Von Misses (MPa) en el generador . . . . .                 | 36 |
| 5.5. Sección de mayor desplazamiento del generador en la simulación . . . . .                          | 36 |
| 5.6. Representación VTK de la zona que experimenta la mayor deformación (mm) en el generador . . . . . | 37 |
| 5.7. Esfuerzos cortantes del generador de vapor . . . . .  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 5.8. Esfuerzos cortantes en la parte interna del generador . . . . .  | 38 |
| 5.9. Representación VTK de los esfuerzos cortantes (MPa) del generador de vapor . . . . .                           | 39 |
| 5.10. Presentación VTK de los esfuerzos cortantes (MPa) del generador de vapor . . . . .                            | 39 |
| 5.11. Representación VTK con el clip escalar de los esfuerzos cortantes (MPa) del generador de vapor . . . . .      | 40 |
| 5.12. Esfuerzo de tracción del generador de vapor en la simulación . . . . .  | 41 |
| 5.13. Presentación VTK del esfuerzo de tracción (MPa) del generador . . . . .                                       | 41 |
| 5.14. Representación VTK de los esfuerzo de tracción (MPa) en el interior del tubo del generador de vapor . . . . . | 42 |
| 5.15. Esfuerzo de compresión del generador en la simulación . . . . .   | 42 |
| 5.16. Esfuerzo de compresión (MPa) del generador . . . . .  | 43 |
| 5.17. Deformación en el eje X del generador de vapor . . . . .  | 44 |
| 5.18. Deformación en el eje Y del generador de vapor . . . . .  | 45 |
| 5.19. Deformación en el eje Z del generador de vapor . . . . .  | 45 |
| 5.20. Presentación VTK de la propagación de la temperatura (K) en el generador . . . . .                            | 46 |
| 5.21. Esfuerzos Von Misses en el generador de vapor . . . . .   | 47 |
| 5.22. Presentación VTK del esfuerzo de Von Misses (MPa) sufrido por el generador . . . . .                          | 47 |
| 5.23. Desplazamiento del haz tubular del generador de vapor . . . . .   | 48 |
| 5.24. Esfuerzos cortantes sufridos en el generador . . . . .  | 49 |
| 5.25. Esfuerzo de tracción en el generador de vapor . . . . .   | 50 |
| 5.26. Esfuerzo de compresión en el generador de vapor . . . . .   | 51 |
| 5.27. Deformación en el eje X del generador . . . . .   | 51 |
| 5.28. Deformación en el eje Y del generador . . . . .   | 52 |
| 5.29. Deformación en el eje Z del generador . . . . .   | 52 |
| 5.30. Presentación VTK de la propagación de la temperatura (K) en el generador . . . . .                            | 53 |
| 5.31. Esfuerzos Von Misses en el generador de vapor . . . . .   | 54 |
| 5.32. Presentación VTK del esfuerzo Von Misses (MPa) sufrido por el generador . . . . .                             | 54 |
| 5.33. Desplazamiento del haz tubular del generador de vapor . . . . .   | 55 |
| 5.34. Esfuerzos cortantes sufridos en el generador . . . . .  | 56 |
| 5.35. Esfuerzo de tracción en el generador de vapor . . . . .   | 57 |
| 5.36. Esfuerzo de compresión en el generador de vapor . . . . .   | 57 |
| 5.37. Deformación en el eje X del generador . . . . .   | 58 |
| 5.38. Deformación en el eje Y del generador . . . . .   | 59 |
| 5.39. Deformación en el eje Z del generador . . . . .   | 59 |
| 5.40. Gráfico de máximos esfuerzos Von Misses del generador . . . . .   | 60 |
| 5.41. Gráfico de máximos esfuerzos cortantes del generador . . . . .  | 60 |
| 5.42. Gráfico de máximos esfuerzos de tracción del generador . . . . .  | 61 |
| 5.43. Esfuerzos máximos de Von Misses . . . . .   | 62 |
| 5.44. Máximos esfuerzos cortantes . . . . .   | 62 |
| 5.45. Máximos esfuerzos de tracción . . . . .   | 63 |

|  |     |
|--|-----|
| B.1. Banco de tubos frontal del generador . . . . .                                  | 88  |
| B.2. Temperaturas en el banco de tubos frontal del generador . . . . .               | 88  |
| B.3. Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos frontal del generador . . . . .     | 89  |
| B.4. Desplazamiento absoluto en el banco de tubos frontal del generador . . . . .    | 89  |
| B.5. Esfuerzos cortantes en el banco de tubos frontal del generador . . . . .        | 90  |
| B.6. Esfuerzo de tracción en el banco de tubos frontal del generador . . . . .       | 90  |
| B.7. Esfuerzo de compresión en el banco de tubos frontal del generador . . . . .     | 91  |
| B.8. Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos frontal del generador . . . . . | 91  |
| B.9. Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos frontal del generador . . . . . | 92  |
| B.10.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos frontal del generador . . . . . | 92  |
| B.11.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 93  |
| B.12.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 93  |
| B.13.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 94  |
| B.14.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 94  |
| B.15.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 95  |
| B.16.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 95  |
| B.17.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 96  |
| B.18.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 96  |
| B.19.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 97  |
| B.20.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 97  |
| B.21.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 98  |
| B.22.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 98  |
| B.23.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 99  |
| B.24.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 99  |
| B.25.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 100 |
| B.26.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 100 |
| B.27.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 101 |
| B.28.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 101 |
| B.29.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 102 |
| B.30.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 102 |
| B.31.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 103 |
| B.32.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 103 |
| B.33.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 104 |
| B.34.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 104 |
| B.35.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 105 |
| B.36.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 105 |
| B.37.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 106 |
| B.38.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 106 |
| B.39.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 107 |
| B.40.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 107 |

|  |     |
|--|-----|
| C.1. Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 110 |
| C.2. Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 110 |
| C.3. Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 111 |
| C.4. Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 111 |
| C.5. Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 112 |
| C.6. Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 112 |
| C.7. Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 113 |
| C.8. Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 113 |
| C.9. Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 114 |
| C.10.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 114 |
| C.11.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 115 |
| C.12.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 115 |
| C.13.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 116 |
| C.14.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 116 |
| C.15.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 117 |
| C.16.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 117 |
| C.17.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 118 |
| C.18.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 118 |
| C.19.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 119 |
| C.20.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 119 |
| C.21.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 120 |
| C.22.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 120 |
| C.23.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 121 |
| C.24.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 121 |
| C.25.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 122 |
| C.26.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 122 |
| C.27.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 123 |
| C.28.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 123 |
| C.29.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 124 |
| C.30.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 124 |
| C.31.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 125 |
| C.32.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 125 |
| C.33.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 126 |
| C.34.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 126 |
| C.35.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 127 |
| C.36.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 127 |
| C.37.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 128 |
| C.38.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 128 |
| C.39.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 129 |
| C.40.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 129 |

|  |     |
|--|-----|
| D.1. Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 132 |
| D.2. Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 132 |
| D.3. Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 133 |
| D.4. Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 133 |
| D.5. Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 134 |
| D.6. Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 134 |
| D.7. Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 135 |
| D.8. Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 135 |
| D.9. Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 136 |
| D.10.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 136 |
| D.11.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 137 |
| D.12.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 137 |
| D.13.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 138 |
| D.14.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 138 |
| D.15.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 139 |
| D.16.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 139 |
| D.17.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 140 |
| D.18.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 140 |
| D.19.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 141 |
| D.20.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 141 |
| D.21.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 142 |
| D.22.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 142 |
| D.23.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 143 |
| D.24.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 143 |
| D.25.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 144 |
| D.26.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 144 |
| D.27.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 145 |
| D.28.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 145 |
| D.29.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 146 |
| D.30.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 146 |
| D.31.Banco de tubos trasero del generador . . . . .                                  | 147 |
| D.32.Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador . . . . .               | 147 |
| D.33.Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 148 |
| D.34.Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador . . . . .    | 148 |
| D.35.Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador . . . . .        | 149 |
| D.36.Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador . . . . .       | 149 |
| D.37.Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador . . . . .     | 150 |
| D.38.Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 150 |
| D.39.Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 151 |
| D.40.Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador . . . . . | 151 |

|   |     |
|---|-----|
| E.1. Tubos de pared de salida de gases del generador . . . . .                              | 154 |
| E.2. Temperatura en los tubos de pared de salida de gases del generador . . . . .           | 154 |
| E.3. Esfuerzos de Von Misses en los tubos de pared de salida de gases del generador . . .   | 155 |
| E.4. Desplazamiento absoluto en los tubos de pared de salida de gases del generador . . .   | 155 |
| E.5. Esfuerzos cortantes en los tubos de pared de salida de gases del generador . . . . .   | 156 |
| E.6. Esfuerzo de tracción en los tubos de pared de salida de gases del generador . . . . .  | 156 |
| E.7. Esfuerzo de compresión en los tubos de pared de salida de gases del generador . . . .  | 157 |
| E.8. Desplazamiento en el eje X en los tubos de pared de salida de gases del generador . .  | 157 |
| E.9. Desplazamiento en el eje Y en los tubos de pared de salida de gases del generador . .  | 158 |
| E.10. Desplazamiento en el eje Z en los tubos de pared de salida de gases del generador . . | 158 |
| E.11. Muro de tubos frontal del generador . . . . .   | 159 |
| E.12. Temperaturas del muro de tubos frontal del generador . . . . .                        | 159 |
| E.13. Esfuerzo de Von Misses en el muro de tubos frontal del generador . . . . .            | 160 |
| E.14. Desplazamiento absoluto en el muro de tubos frontal del generador . . . . .           | 160 |
| E.15. Esfuerzos cortantes en el muro de tubos frontal del generador . . . . .               | 161 |
| E.16. Esfuerzo de tracción en el muro de tubos frontal del generador . . . . .              | 161 |
| E.17. Esfuerzo de compresión en el muro de tubos frontal del generador . . . . .            | 162 |
| E.18. Desplazamiento en el eje X en el muro de tubos frontal del generador . . . . .        | 162 |
| E.19. Desplazamiento en el eje Y en el muro de tubos frontal del generador . . . . .        | 163 |
| E.20. Desplazamiento en el eje Z en el muro de tubos frontal del generador . . . . .        | 163 |

# Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Herramientas del modulo FEM . . . . .                                   | 12 |
| 3.2. Composición química del acero usado en la modelización . . . . .        | 13 |
| 3.3. Propiedades mecánicas del acero elegido . . . . .                       | 15 |
| 3.4. Propiedades mecánicas del acero elegido . . . . .                       | 15 |
| 4.1. Datos de tubos del generador de vapor . . . . .                         | 25 |
| 4.2. Datos de diseño del generador de vapor . . . . .                        | 26 |
| 4.3. Datos característicos de la caldera en relación a la carga . . . . .    | 26 |
| 5.1. Tensión de Von Misses del generador en la simulación . . . . .          | 33 |
| 5.2. Desplazamiento absoluto del generador en la simulación . . . . .        | 35 |
| 5.3. Esfuerzos cortantes del generador en la simulación . . . . .            | 37 |
| 5.4. Tracción del generador en la simulación . . . . .                       | 38 |
| 5.5. Compresión del generador en la simulación . . . . .                     | 40 |
| 5.6. Deformación en el eje X para una carga del quemador del 100 % . . . . . | 44 |
| 5.7. Deformación en el eje Y para una carga del quemador del 100 % . . . . . | 44 |
| 5.8. Deformación en el eje Z para una carga del quemador del 100 % . . . . . | 46 |
| 5.9. Tensión de Von Misses del generador en la simulación . . . . .          | 46 |
| 5.10. Desplazamiento absoluto del generador en la simulación . . . . .       | 48 |
| 5.11. Esfuerzos cortantes del generador en la simulación . . . . .           | 49 |
| 5.12. Tracción del generador en la simulación . . . . .                      | 49 |
| 5.13. Compresión del generador en la simulación . . . . .                    | 50 |
| 5.14. Deformación en el eje X para una carga del quemador del 50 % . . . . . | 50 |
| 5.15. Deformación en el eje Y para una carga del quemador del 50 % . . . . . | 51 |
| 5.16. Deformación en el eje Z para una carga del quemador del 50 % . . . . . | 52 |
| 5.17. Tensión de Von Misses del generador en la simulación . . . . .         | 53 |
| 5.18. Desplazamiento absoluto del generador en la simulación . . . . .       | 55 |
| 5.19. Esfuerzos cortantes del generador en la simulación . . . . .           | 55 |
| 5.20. Tracción del generador en la simulación . . . . .                      | 56 |
| 5.21. Compresión del generador en la simulación . . . . .                    | 57 |
| 5.22. Deformación en el eje X para una carga del quemador del 25 % . . . . . | 58 |
| 5.23. Deformación en el eje Y para una carga del quemador del 25 % . . . . . | 58 |
| 5.24. Deformación en el eje Z para una carga del quemador del 25 % . . . . . | 59 |



# 1 Introducción

En la actualidad, tanto en el ámbito industrial terrestre como marino, se ha hecho imprescindible el uso del vapor para múltiples aplicaciones. Existen fábricas, plantas generadoras y turbinas propulsoras impulsadas por vapor.

La propulsión de los buques ha evolucionado, con lo que su uso en la propulsión ha quedado limitado a los buques gaseros (LNG). Por las características de la carga transportada, disponen de combustible que se quema en calderas para la generación de vapor que impulsa turbinas de vapor. Sin embargo, aún tiene gran aplicación en cualquier buque para calentar el combustible de los motores, las tuberías de trasiego de carga, accionamiento de turbo bombas y turbogeneradores, calefacción, entre otras.

Este estudio está enmarcado en el encendido en frío de un generador de vapor. Se analizan los esfuerzos térmicos y mecánicos a los que se verán sometidos los elementos internos durante este período, ya que se intuye que son mayores que trabajando a su régimen nominal. Los fabricantes recomiendan un régimen de encendido con la carga del quemador lo más bajo posible, con ello se consigue disminuir los esfuerzos, lo que conlleva que el agua tardará más en llegar a su estado de ebullición, por lo tanto, se dilata el tiempo necesario para obtener vapor a la presión y temperatura adecuada.

Por otra parte, se profundizará en el software (FreeCAD) de diseño de tres dimensiones, que servirá de apoyo para el estudio. Con sus nuevas funciones, se diseñará un generador de vapor al que se le realizará un análisis estructural termomecánico durante el encendido de la caldera.

Con el estudio se analizará el por qué de las recomendaciones de los fabricantes y así poder investigar algunas posibles propuestas para disminuir la carga térmica y mecánica en esta fase. Con ello se podría reducir el tiempo de encendido obteniendo la ebullición del agua en menor tiempo, generando vapor antes, en su calidad óptima.

La elección de este estudio fue una propuesta del tutor Pedro Rivero. Se planteó la posibilidad de realizar un estudio en el comportamiento de los elementos estructurales de un generador de vapor en su fase de encendido en el software (FreeCAD). Esto despertó mi interés por este estudio ante la demanda constante de vapor que se origina tanto en los buques como en la industria en general.



## 2 Objetivos

Entre los objetivos principales de este estudio están:

1. Profundizar en el conocimiento de los generadores de vapor.
2. Crear un modelo 3D de un generador de vapor, utilizando un software libre (FreeCAD) de diseño de tres dimensiones.
3. Analizar el arranque en frío de un generador de vapor, enfocado a explicar el porqué del tiempo de encendido.
4. Realizar con el software (FreeCAD) un análisis estructural termomecánico durante el encendido de la caldera.
5. Analizar los resultados obtenidos de las tensiones y desplazamiento provocado por la diferencia térmica en el hogar.
6. Justificar si el régimen de encendido recomendado por los fabricantes es correcto para un adecuado calentamiento progresivo del generador de vapor.



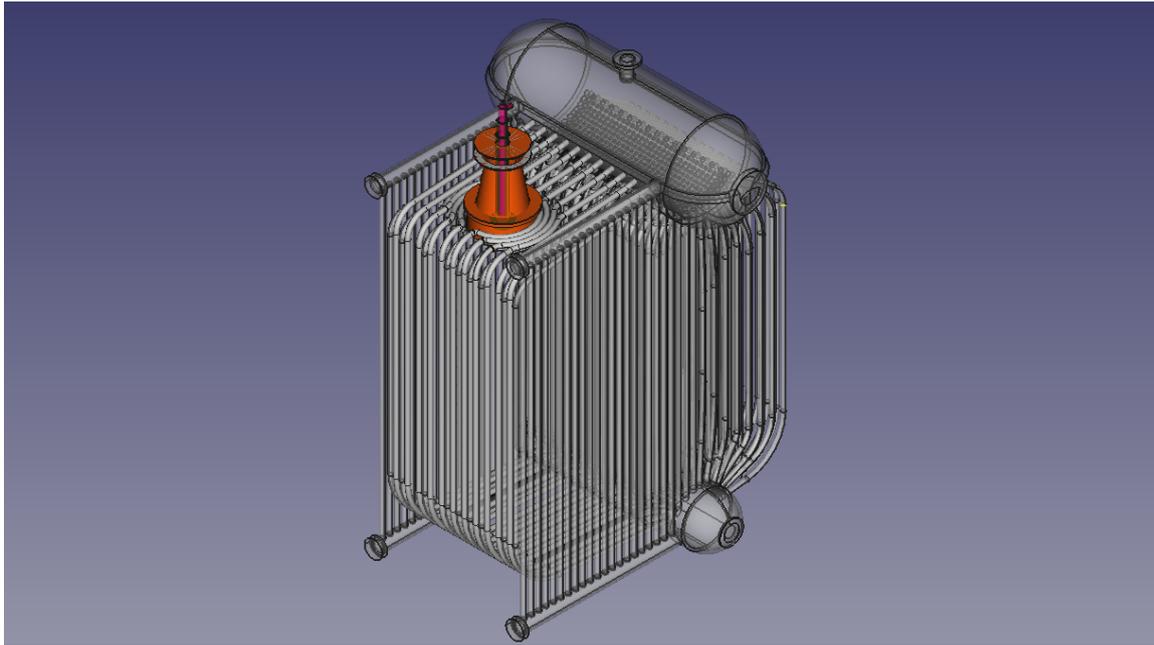
# 3 Metodología

La metodología de trabajo para la realización de este proyecto se recoge en los siguientes puntos.

## 3.1 Planificación

Se desarrollan por orden las siguientes etapas.

1. Búsqueda de información: se hace imprescindible para profundizar en el estudio de los generadores de vapor, con lo que se conseguirá mayor comprensión de los esfuerzos a los que se verán sometidos los elementos internos en su arranque en frío. En esta búsqueda de información cabe destacar los libros de Resistencia de Materiales de V.I. Feodósiev [9] y Steam It's Generation and Use de BABCOCK and WILCOX [5]. La investigación se completó con búsqueda por Internet de información de materiales de calderas.
2. Elección del generador: durante la indagación no se consiguieron planos sobre un generador de vapor. Cabe reseñar que se prosiguió con el envío de correos electrónicos a empresas del sector con el fin de obtener información y planos fiables para su diseño; las respuestas al respecto fueron todas negativas por los niveles de confidencialidad de cada una de ellas. Finalmente, se consiguió unos planos del generador de vapor Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS. Se trata de una caldera de vapor saturado acuotubular, donde el agua fluye por el interior de los tubos y los gases de combustión fluyen por el exterior de estos, transfiriendo su calor al agua.
3. Diseño: el diseño del generador de vapor se elabora con la herramienta de trabajo FreeCAD, es un software libre de diseño de objetos 3D paramétricos, que puede ser utilizado en cualquier plataforma. Se utiliza principalmente en la ingeniería mecánica. Está desarrollándose continuamente; en la actualidad se pueden realizar análisis termomecánicos a los objetos creados. Los conocimientos básicos para la realización del diseño y su posterior estudio, se obtuvieron mediante tutoriales de Internet así como por los conocimientos adquiridos en la asignatura "Maquinas e Instalaciones de Vapor.
4. Estudio: una vez finalizado el diseño, se procede con el estudio termomecánico de los elementos internos del generador de vapor. Este se realiza a través del banco de trabajo FEM (Método de Elementos Finitos) de FreeCAD. Es un método numérico de resolución de problemas, se utiliza en la industria mecánica para simular los esfuerzos termomecánicos que sufren los materiales y así analizar las tensiones a las que se verán expuestos.
5. Resultados: después de realizar el estudio de los elementos estructurales del generador de vapor, se representan los resultados obtenidos, donde se podrán determinar de una forma aproximada, las tensiones y las deformaciones en el interior del generador. Para una mejor visualización en los resultados, el software aporta una escala de colores en el mallado que sirve para observar los valores obtenidos. También se realizó un postprocesado de los resultados con la herramienta VTK, siendo muy útil tanto para análisis avanzados como para fines de ilustración.
6. Conclusiones: en este punto se exponen los resultados obtenidos de las tensiones y deformaciones sufridas en el interior del hogar. Estos resultados se cotejan con las recomendaciones de los fabricantes durante la fase de encendido de los generadores de vapor. Las recomendaciones son para lograr un calentamiento progresivo de los elementos estructurales en el interior de la caldera, y así conseguir disminuir los esfuerzos termomecánicos a los que se verán sometidos.



**Figura 3.1:** Estructura interna del generador

Fuente: Elaboración propia

7. Edición de la memoria: para la redacción se ha usado el editor de textos Tex Studio, basado en LATEX, que permite crear documentos presentando una alta calidad tipográfica.

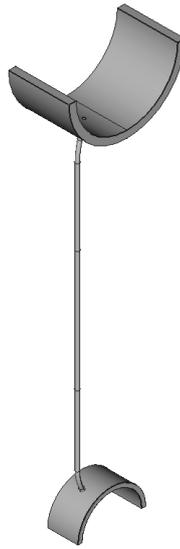
## 3.2 Alcance del estudio

Este trabajo está basado en el estudio del arranque en frío de un generador de vapor. Para su análisis, se realizó la modelización de los elementos estructurales completos del generador en el software FreeCAD (**fig.3.1**).

El propósito inicial era realizar el estudio termomecánico del conjunto de la caldera, pero no fue posible, pudiendo ser por limitaciones del software de modelización o tal vez por la capacidad del ordenador (mallado completo). Después de varios intentos de realizar un estudio con el mayor número de componentes de la estructura del generador, se fueron retirando elementos hasta conseguir el estudio de una sección de los colectores y de un haz tubular (**fig.3.2**). Se obtuvo el análisis de varios tubos individuales con los colectores del banco de tubos (**fig.3.3**), solo se analizó los resultados del más próximo a la llama del quemador, ya que se intuye que será el que mayores esfuerzos termomecánicos tendrá que soportar, el resto se analizaron de manera superficial por la limitación de tiempo para la presentación del trabajo.

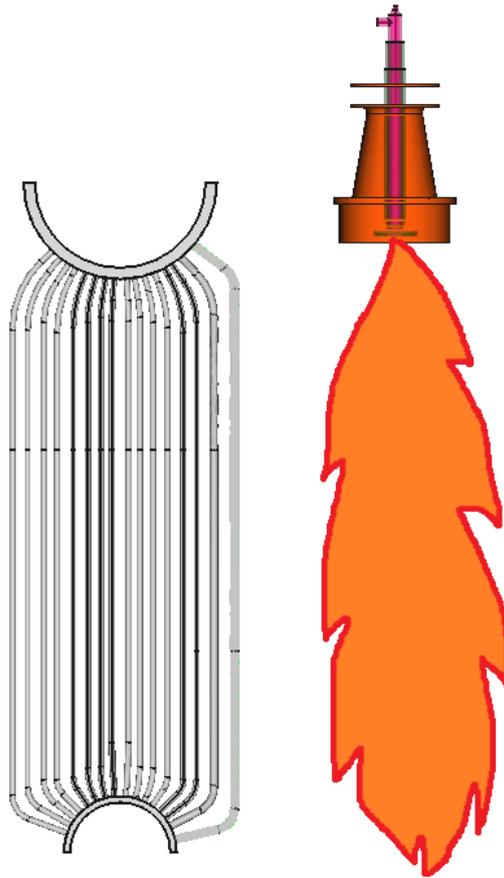
En el estudio se consideraron 3 valores de flujos térmicos en el quemador, para el análisis se aplicaron al banco de tubos frontal, ya que se considera que será el que mayores esfuerzos termomecánicos soportará por su proximidad a la llama del quemador:

- Carga del quemador 100 %: Se simulará que la temperatura aportada por la llama del quemador es de  $1170^{\circ}\text{C}$  ( $1443,15\text{ K}$ ) en la zona de más incidencia de calor, ocasionando una situación límite por la resistencia del material, la temperatura irá disminuyendo hasta la zona de los colectores que será de  $767^{\circ}\text{C}$  ( $1040,15\text{ K}$ ).
- Carga del quemador 50 %: con este caso se podrá comprobar la disminución de esfuerzos en el generador. La temperatura aportada por la llama del quemador será de  $572,5^{\circ}\text{C}$  ( $845,65\text{ K}$ ) en la zona de más incidencia de calor e irá disminuyendo hasta la zona de los colectores que será de  $277,5^{\circ}\text{C}$  ( $550,65\text{ K}$ ).



**Figura 3.2:** Cuerpo del generador para el estudio termomecánico

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.3:** Banco de tubos del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

- Carga del quemador 25 %: Esta carga aproximadamente es la que recomiendan los fabricantes para un encendido adecuado y así disminuir los esfuerzos que se generan en el interior del generador. La temperatura aportada por la llama del quemador será de  $286,25^{\circ}\text{C}$  ( $559,4\text{ K}$ ) en la zona de más incidencia de calor e irá disminuyendo hasta la zona de los colectores que será de  $77,25^{\circ}\text{C}$  ( $350,4\text{ K}$ ).

### 3.3 Modelización del análisis mecánico: FreeCAD

FreeCAD es un software de código abierto de diseño 3D paramétrico, que se utiliza frecuentemente en ingeniería por la posibilidad de crear diseños mecánicos y estudiarlos. Está basado en Open CASCADE y programado en los lenguajes C++ y Python.

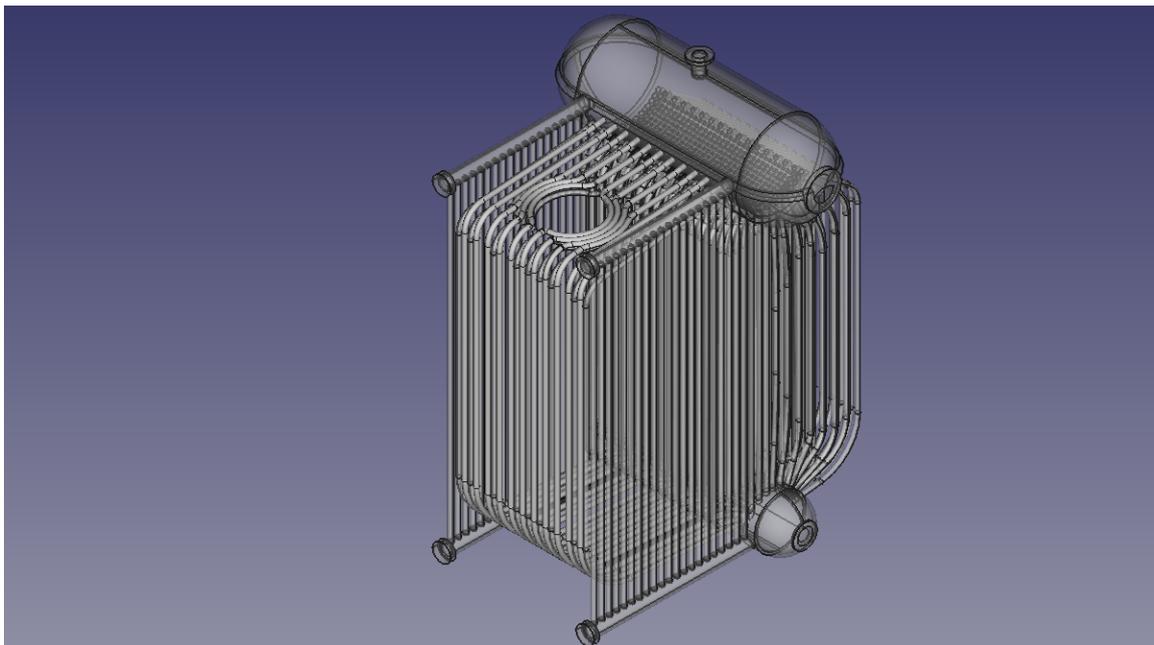
El programa dispone de una variada librería para modelar prácticamente cualquier objeto para su posterior estudio. También cabe destacar que dispone de una variada lista de materiales utilizados comúnmente en ingenierías (aceros, aluminios, entre otros).

Otra propiedad de FreeCAD es que es completamente multiplataforma, con lo que se puede operar en sistemas como Windows, Linux/Unix y Mac OSX.

Aunque en un comienzo fue diseñado como una herramienta de diseño de geometrías 3D, en la actualidad es aplicable en problemas estructurales relacionados con tensiones o desplazamientos, producidos por cargas térmicas que son especialmente interesantes para este estudio.

### 3.4 Modelización 3D del generador de vapor

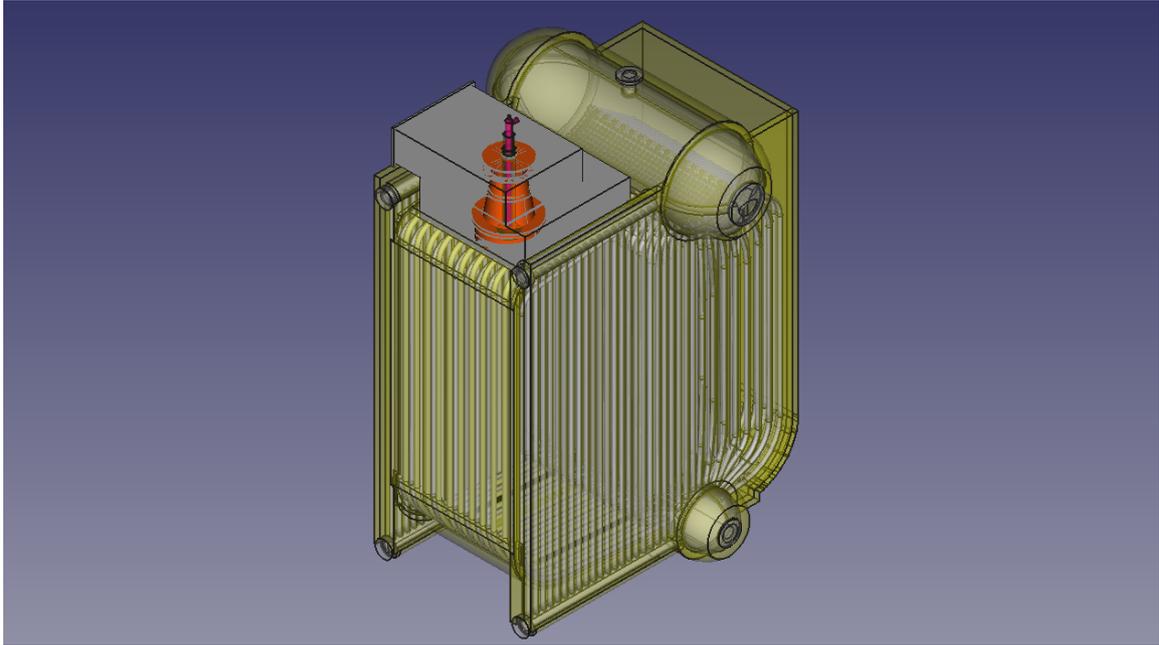
#### 3.4.1 Unión colectores y tubos



**Figura 3.4:** Tubos completos amurallados del generador

Fuente: Elaboración propia

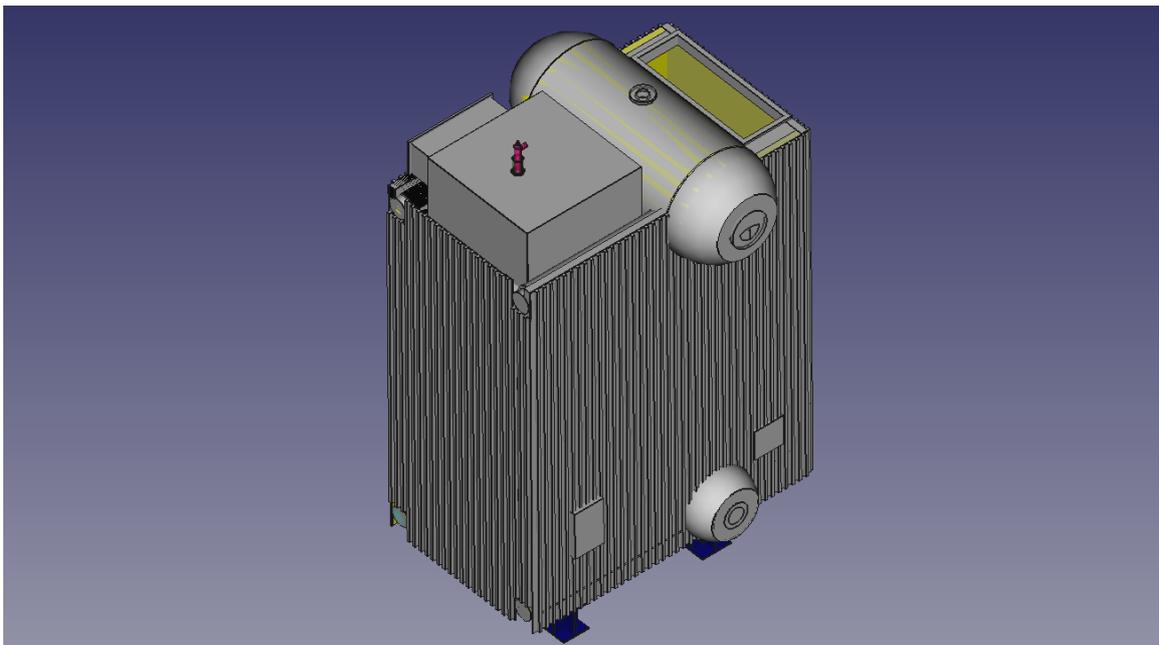
### 3.4.2 Aislamiento térmico



**Figura 3.5:** Aislamiento térmico del generador

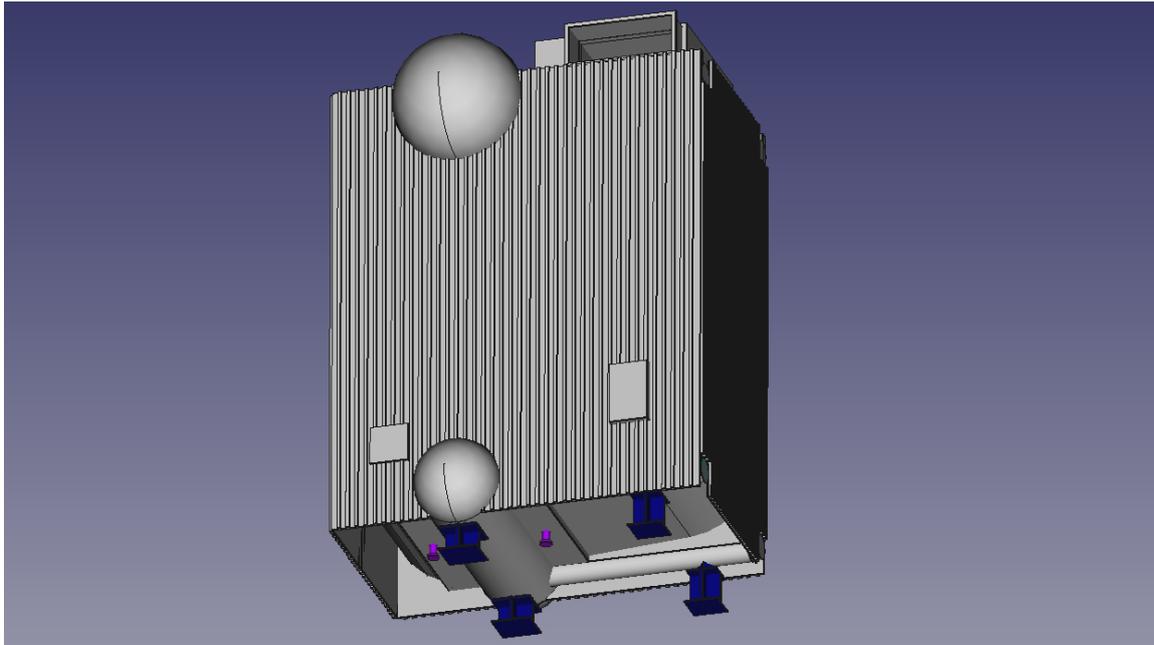
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Carcasa



**Figura 3.6:** Carcasa parte superior del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.7:** Carcasa parte inferior del generador

Fuente: Elaboración propia

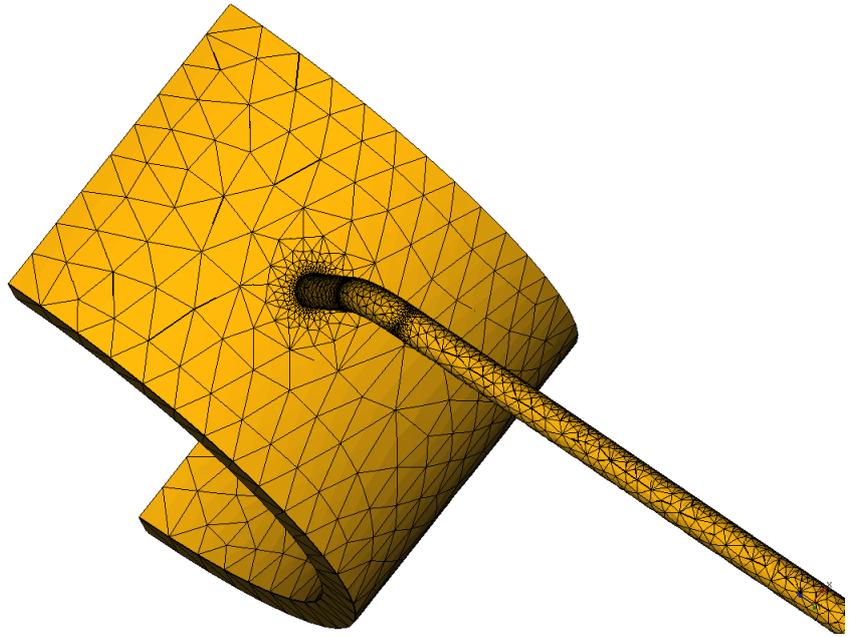
En la **fig.3.4** se muestra el conexionado de los haces tubulares con los colectores. Para una mejor visualización, se le aplicó un color amarillo al aislamiento térmico que recubre el generador de vapor (**fig.3.5**). Por último, en las **fig.3.6 y 3.7** se observa el exterior de la caldera (tomadas de muestra, compuertas de acceso, salida de gases, entrada de aire, bancada).

### 3.5 Método de elementos finitos

Es un método numérico de resolución de problemas que se utiliza en la ingeniería mecánica. Es una herramienta de cálculo muy potente que ayuda a resolver problemas complejos en cuerpos sólidos. No proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que en realidad, ofrece una solución aproximada, siendo más que suficiente para la resolución de problemas prácticos. Dicho método se basa en dividir un sólido diseñado (al que se someterá a un sistema de cargas y restricciones) en pequeñas partes conectadas entre sí, lo que se conoce como *mallado*, con el fin de realizar el estudio termomecánico [6].

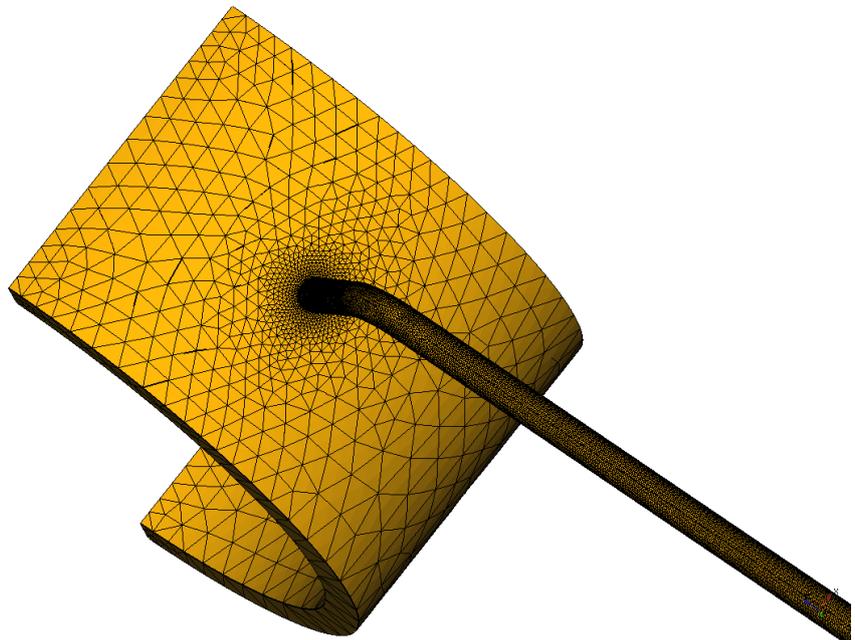
Existen seis tipos diferentes de parámetros para el mallado del objeto (muy burdo, grueso, moderado, fino, muy fino y definido por el usuario), y dependiendo del que se escoja, se representará mayor o menor número de nodos o triángulos. Para este análisis se usó un mallado fino, ya que fue el único capaz de ejecutarse sin producir errores de cálculo. El número de nodos y triángulos a calcular en la malla aumenta cuanto más fino es el nivel seleccionado y también aumenta el tiempo de cálculo del programa, lo que hace que se consiga un resultado más fiable aunque con mayor tiempo de procesado. En las figuras **3.8 y 3.9** se puede observar la diferencia entre dos mallas distintas.

Un problema importante que surgió en la elaboración del presente estudio fue el mallado del generador de vapor, ya que el software, que está en desarrollo, fue incapaz de mallar toda la caldera (colectores y tubos). Se tuvo que ir reduciendo el área seleccionada, hasta conseguir tener un tubo de unión y parte de los colectores para el estudio.



**Figura 3.8:** Parámetro de mallado (muy burda)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.9:** Parámetro de mallado (fino)

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el método de elementos finitos denominado como mallado del sólido sin errores de cálculo, se realizará el análisis termomecánico donde se podría determinar de una forma aproximada, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

| Símbolo   | Nombre                  | Función   |
|---|-------------------------|---|
|    | Análisis mecánico nuevo | Crea un contenedor para un nuevo análisis.  |
|    | Solucionador            | Crea un nuevo solucionado para el estudio.  |
|    | Mallado                 | El mallado utilizado es el Netgen. Existen varios tipos de precisión, por lo tanto según la que se elija será la calidad del mallado. |
|    | Material                | Para seleccionar el material a utilizar desde la base de datos, o la posibilidad de crear un nuevo material con sus propiedades.      |
|    | Restricción estática    | Define una restricción de fijación de puntos, ejes o superficies.   |
|    | Temperatura ambiente    | Restricción necesaria para un análisis termomecánico, la cual introduce la temperatura inicial del cuerpo de trabajo.                 |
|    | Flujo térmico           | Define el flujo térmico en las caras seleccionadas del objeto.  |
|    | Carga térmica           | Restricción que define la temperatura limite en puntos, bordes y caras.   |
|    | Resultados              | Expone los resultados obtenidos en el análisis activo (tensión de Von Misses, tracción).  |
|    | Canalizador             | Canaliza los resultados para visualizarlos de forma más detallada.  |
|  | Filtro escalar          | Crea una esfera en la que se podrán ver los resultados de una zona determinada recortada del cuerpo.                                  |

**Tabla 3.1:** Herramientas del modulo FEM

Fuente: [1]

### 3.6 Módulo FEM

El módulo FEM, proporciona un flujo de trabajo práctico para realizar el análisis de elementos finitos dentro de FreeCAD. Combina varias herramientas en una sola interfaz gráfica de usuario. Aunque aún esté en pleno desarrollo, se puede usar esta herramienta para realizar un análisis termomecánico en el diseño del generador de vapor [11].

En la barra de herramientas de este módulo se trabajará con las opciones que se indican en la **tab.3.1**.

### 3.7 Material: elección y propiedades

Para la elección de materiales de cara a la simulación, se ha tenido en cuenta que los aceros especiales para la construcción de calderas deben cumplir con las especificaciones ASME. El Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME (BPVC) establece normas para el diseño, la fabricación, la inspección de las calderas y los recipientes a presión [2].

Para el análisis termomecánico se escogió un acero inoxidable superaustenítico (altamente aleado), cuya designación numérica es EN 1.4854.

- 1.: indica que es acero
- 48: indica uno de los grupos de aceros inoxidable

| Elementos % |           |
|-------------|-----------|
| Fe          | 33,6-40,6 |
| Cr          | 24-26     |
| Si          | 1,2-2,0   |
| Mn          | 0-2,0     |
| Ni          | 34-36     |
| C           | 0,04-0,08 |
| N           | 0,12-0,2  |
| Ce          | 0,03-0,08 |
| P           | 0-0,04    |
| S           | 0-0,015   |

**Tabla 3.2:** Composición química del acero usado en la modelización

Fuente: [3]

- 54: grado de identificación individual

Y con la designación química X6NiCrSiNCe35-25.

- X: alto grado de aleación
- 6: 100 x % de carbono
- NiCrSiNCe: símbolos químicos de los principales elementos aleados
- 35-25: % de los principales elementos aleados

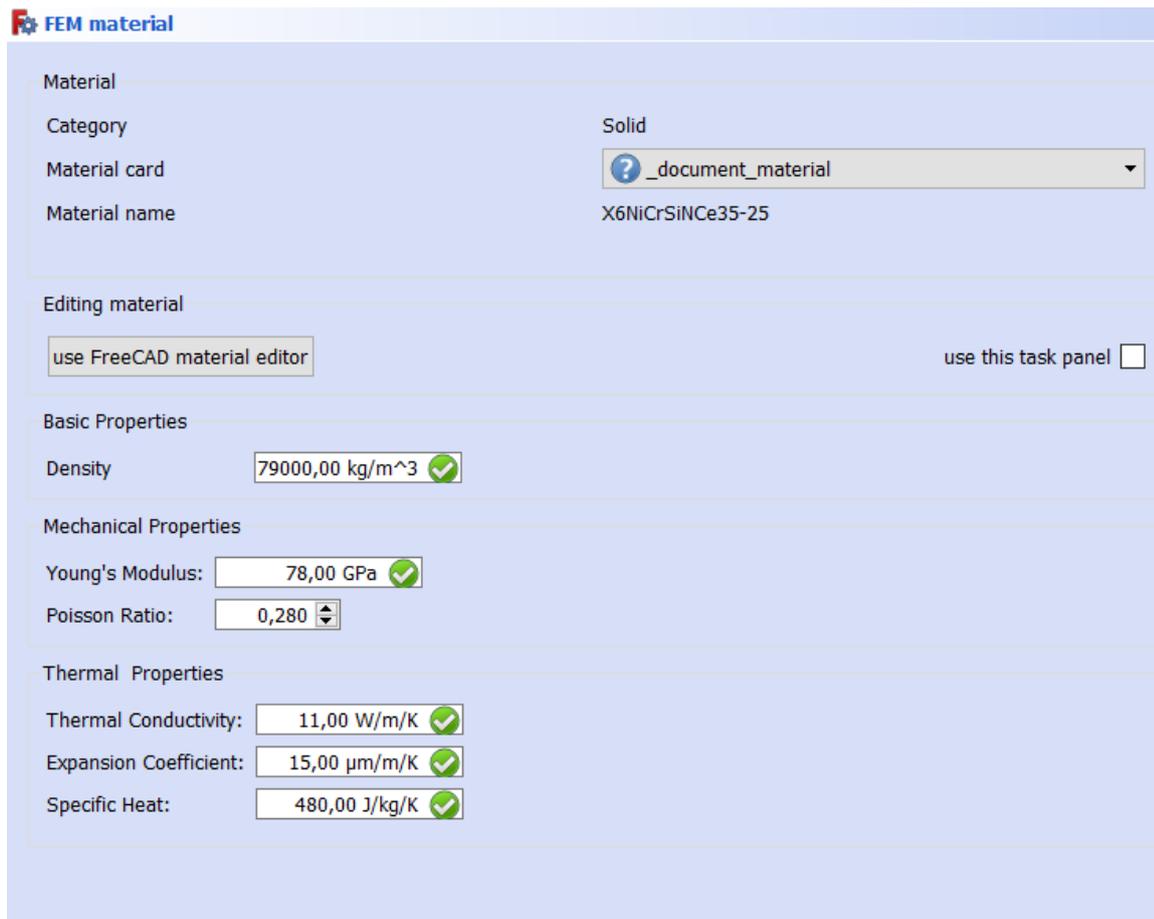
Entre la composición del acero inoxidable EN 1.4854, se destaca la inclusión de cerio (Ce) y contener una cantidad comparativamente alta de silicio (Si). El cerio proporciona una mejor resistencia a la oxidación a altas temperaturas. El contenido de silicio se añade principalmente por problemas de procesamiento metalúrgico, pero también puede mejorar la resistencia a la oxidación. Su composición química viene recogida en la **tab.3.2**. Se caracteriza por:

- Alta resistencia a la fluencia
- Muy buena resistencia a la oxidación isotérmica y cíclica
- Muy buena resistencia a los gases de combustión
- Muy buena resistencia a la carburación
- Buena resistencia a los gases de nitruración
- Buena estabilidad estructural a altas temperaturas
- Buena soldabilidad
- La temperatura máxima de funcionamiento es de aprox. 1170 ° C

Tiene una densidad de  $7.9 \text{ g/cm}^3$ . En la **tab.3.3** se representan sus propiedades mecánicas y en la **tab.3.4** las térmicas. Los parámetros que se introducen del material escogido para el estudio (**fig.3.10**).

### 3.7.1 Módulo de Young

Entre los parámetros necesarios para el estudio del cuerpo está el Módulo de Young E, (módulo elástico), que representa la proporcionalidad entre esfuerzo (fuerza por unidad de área) y deformación unitaria (deformación por unidad de longitud), teniendo cada material su valor característico.



**FEM material**

Material

Category: Solid

Material card: ? \_document\_material

Material name: X6NiCrSiNce35-25

Editing material

use FreeCAD material editor  use this task panel

Basic Properties

Density: 79000,00 kg/m<sup>3</sup> ✓

Mechanical Properties

Young's Modulus: 78,00 GPa ✓

Poisson Ratio: 0,280

Thermal Properties

Thermal Conductivity: 11,00 W/m/K ✓

Expansion Coefficient: 15,00 μm/m/K ✓

Specific Heat: 480,00 J/kg/K ✓

**Figura 3.10:** Parámetros introducidos del material para la simulación

Fuente: Elaboración propia

| Propiedades mecánicas             |         |
|-----------------------------------|---------|
| Módulo de Young (módulo elástico) | 200 GPa |
| Tensión de rotura                 | 940 MPa |
| Resistencia a la fatiga           | 310 MPa |
| Alargamiento a la rotura          | 45 %    |
| Coefficiente de Poisson           | 0,28    |
| Módulo de corte                   | 78 GPa  |
| Resistencia a la cizalladura      | 520 MPa |
| Resistencia a la tracción         | 750 MPa |

**Tabla 3.3:** Propiedades mecánicas del acero elegido

Fuente: [3]

| Propiedades térmicas             |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| Calor latente de fusión          | 330 J/g                    |
| Temperatura máxima: corrosión    | 450 °C                     |
| Temperatura máxima: mecánica     | 1170 °C                    |
| Finalización de fusión (líquido) | 1370 °C %                  |
| Inicio de fusión (sólido)        | 1330 °C                    |
| Capacidad calorífica específica  | 480 J/kgK                  |
| Conductividad térmica            | 11 W/mK                    |
| Expansión térmica                | 15 $\mu\text{m}/\text{mK}$ |

**Tabla 3.4:** Propiedades mecánicas del acero elegido

Fuente: [3]

### 3.7.2 Coeficiente de Poisson

Otro parámetro primordial para el análisis mecánico es el coeficiente de Poisson. Un cuerpo al que se somete a una carga axial experimenta una deformación no sólo en el sentido de la fuerza (deformación primaria  $\epsilon_x$ ), sino también según el eje perpendicular (deformación secundaria  $\epsilon_y$  y  $\epsilon_z$ ).

Por lo tanto, este coeficiente viene expresado por la relación de la deformación perpendicular a la axial.

$$\nu = -\frac{\epsilon_p}{\epsilon_a} \quad (3.1)$$

### 3.7.3 Densidad

Los aceros inoxidable son aleaciones ferro-cromo con un mínimo de 11 % de cromo. Según los elementos que se agreguen a la aleación se puede obtener un amplio conjunto de aceros inoxidables: el cromo, aporta capacidad de resistencia a la corrosión y el níquel, mejora las propiedades mecánicas. Los aceros inoxidables se utilizan principalmente por su resistencia a la corrosión. La densidad del acero puede variar dependiendo de los componentes de la aleación, su rango normal oscila entre 7.750 y 8.050  $\text{kg}/\text{m}^3$  a una temperatura de 20 °C y una presión absoluta de 1 atm.. Se calcula al dividir la masa por el volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

- $\rho$ : densidad del acero  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $m$ : masa del acero en kg
- $V$ : volumen del acero  $\text{m}^3$

### 3.7.4 Conductividad térmica

Es la capacidad de conducir el calor de cada material. El coeficiente de conductividad térmica expresa el flujo de calor que atraviesa, por unidad de tiempo, a través del área de una muestra de un material. Este coeficiente puede variar según la humedad si el material, fuese poroso y con la temperatura a la que se hace la medición, por ello se realizan a unas condiciones fijas generalmente, 288,15 °K (15 °C).

### 3.7.5 Coeficiente de expansión

La mayoría de los materiales, al agregarle calor se expanden, lo que provoca vibraciones de los átomos que forman el material, con lo cual, aumenta la separación entre ellos.

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (3.3)$$

- $\Delta T$ : diferencia de temperatura en °K
- $\alpha$ : coeficiente de expansión lineal del material
- L: longitud del material en m
- $\Delta L$ : cambio en la longitud del material

### 3.7.6 Calor específico

El calor específico se define como la cantidad de calor que hay que entregar a un gramo de sustancia para que su temperatura aumente un 1 °C. Las unidades de calor específico que se usan para este estudio son J/(kg·°K). La cantidad de calor que recibe o cede un cuerpo se expresa como:

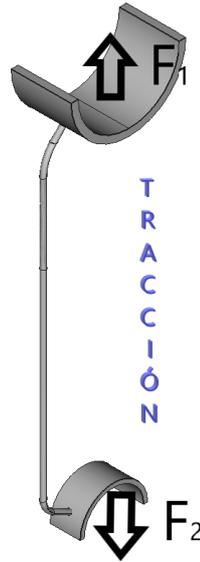
$$Q = mc(T_f - T_i) \quad (3.4)$$

- Q: calor recibido o cedido J
- m: masa del material en kg
- c: calor específico J/(kg·K)
- T<sub>f</sub>: Temperatura final del material K
- T<sub>i</sub>: Temperatura inicial del material K

### 3.7.7 Esfuerzos sufridos por el material

Se exponen a continuación de manera simplificada los esfuerzos a los que se someterá el cuerpo a estudiar [9], teniendo en cuenta que:

- Esfuerzo: toda fuerza externa que actúa sobre un objeto material provocando su posible deformación.
- Deformación: cambio en la forma del cuerpo por la aplicación de los esfuerzos externos.
- Tensión: son fuerzas internas del material que tratan de contrarrestar la acción de las fuerzas externas que actúan sobre el.



**Figura 3.11:** Tracción

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.7.1 Von Mises

El esfuerzo de Von Mises es un valor de estrés sufrido a causa de la energía de distorsión del material estudiado. Con este criterio, un material será seguro siempre que su valor máximo de la tensión de Von Mises a la que se verá sometido sea menor que su tensión de diseño. Principalmente es para materiales dúctiles (no frágiles).

### 3.7.7.2 Máx. Shear Stress (Tensión máxima de cizalladura)

La tensión máxima de cizalladura se genera cuando las fuerzas  $F$  se aplican tangencialmente a una superficie  $A$ , el ángulo de tensión máxima será de  $45^\circ$  produciendo un cambio en la forma del cuerpo pero no en su volumen.

Las unidades del esfuerzo cortante son ( $\frac{N}{m^2}$ ) en el S.I.

El esfuerzo cortante ( $\tau$ ), es la fuerza de corte por unidad de área.

$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad (3.5)$$

### 3.7.7.3 Máx. Principal Stress (Tracción)

Esta tensión es la que se opondrá a una fuerza  $F$  que tiende a estirar el objeto. Para su comprensión, a un cuerpo se le aplican dos cargas de igual dirección  $F_1$  y  $F_2$ , pero en sentido opuestos (**fig.3.11**).

### 3.7.7.4 Mín. Principal Stress (Compresión)

El esfuerzo de compresión se genera cuando aparecen fuerzas externas en un sólido deformable hacia su centro geométrico. Se caracteriza porque en el cuerpo se produce una disminución de volumen, y un acortamiento del cuerpo en determinada dirección (coeficiente de Poisson). En la **fig.3.12** se observan como dos fuerzas externas ( $F_1$  y  $F_2$ ) aplicadas en los colectores, pueden llegar a deformar el cuerpo.



**Figura 3.12:** Compresión

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.7.5 Desplazamiento absoluto

Debido a la acción de fuerzas exteriores un cuerpo puede experimentar cambios tanto en su forma como en su dimensión. En la **fig.3.13** se observa una barra en reposo P, P' es la misma barra a la que se le aplica una fuerza F mayor que la resistencia del material produciendo una deformación del mismo.

## 3.8 Análisis estructural

### 3.8.1 Condiciones de Contorno

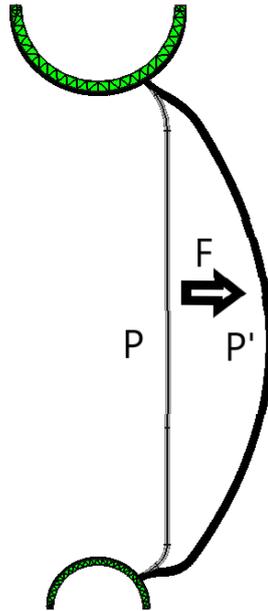
Las condiciones de contorno son las restricciones necesarias para realizar este estudio. Entre ellas están las estáticas para fijar caras del cuerpo en un empotramiento, o las térmicas, que introducen la temperatura a la que se verá sometida la cara seleccionada del cuerpo.

#### 3.8.1.1 Restricciones estáticas

Las restricciones de fijación se aplican en cada una de las caras o ejes seleccionados de la pieza a estudiar. Esta restricción se hace necesaria por la limitación que presenta el software FreeCAD, ya que no es capaz de mallar todo el banco de tubos, más los colectores. Con ella el software fija los extremos de la pieza seleccionada (colector de vapor y colector de agua), ya que el cuerpo original es mayor al estudiado (**fig. 3.14**).

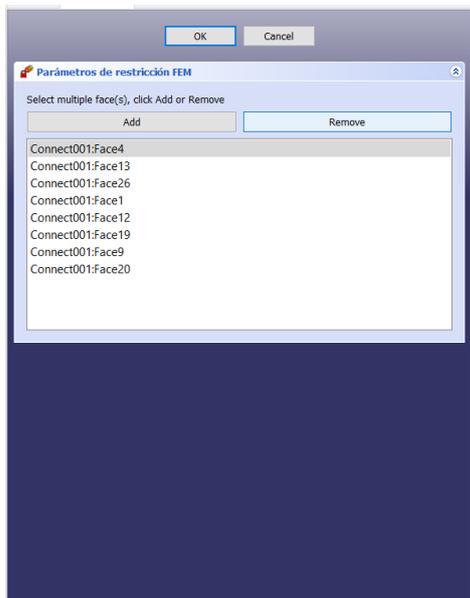
#### 3.8.1.2 Cargas térmicas

Las restricciones térmicas son la base de este estudio (**fig.3.15**). Con ellas se somete al material a un fuerte salto térmico bruscamente. Este estudio está enfocado a la fase de encendido de los generadores de vapor, por ello se parte de que el agua en el interior de los colectores y tubos está a una temperatura de 25°C (298,15°K). Por su parte, para la potencia térmica del generador, se han considerado los siguientes casos:



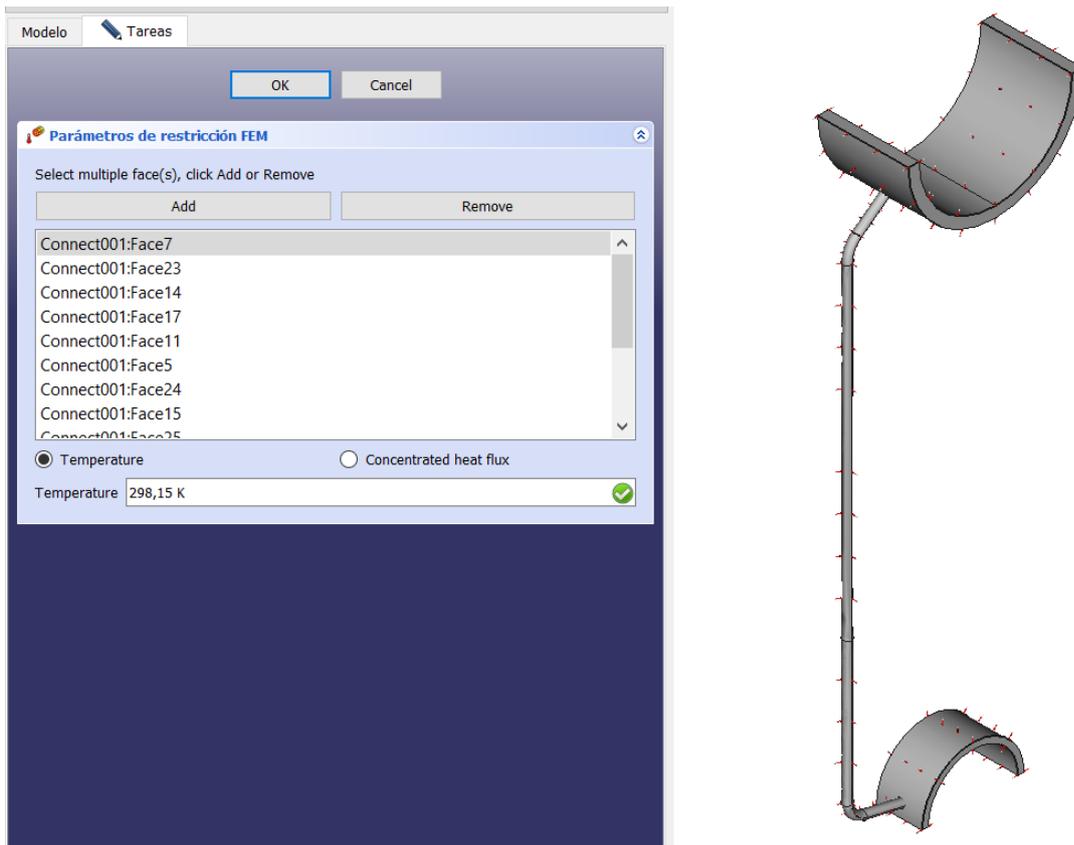
**Figura 3.13:** Desplazamiento absoluto

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.14:** Restricciones estáticas en el generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.15:** Restricciones térmicas en el generador

Fuente: Elaboración propia

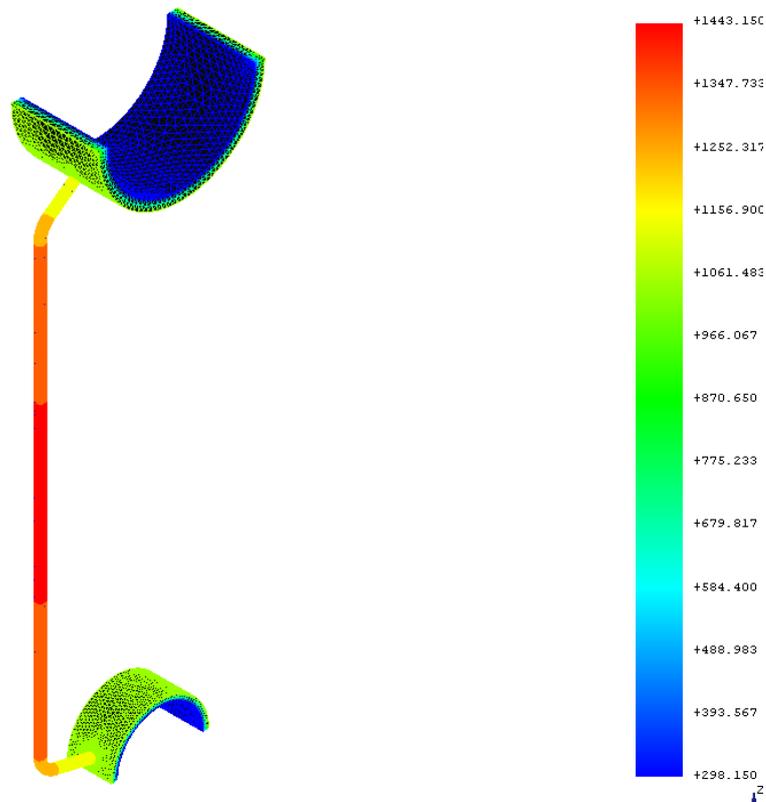
- Carga del quemador del 100 %: con esta carga se producirá la mayor diferencia térmica entre el hogar y el agua. Se asumirá que la temperatura aportada por la llama del quemador es de 1170°C (1443,15 K) en la zona de mayor incidencia de calor, y 767 °C (1040,15 K) en la zona de los colectores. Esta temperatura se aplica para forzar la resistencia del material en la simulación. Como no se pudo conseguir datos sobre la propagación de temperaturas que afecta a cada haz tubular en el interior del generador, se aplicó de forma decreciente temperaturas desde la zona más próxima al quemador hasta la zona de la salida de gases de combustión.
- Carga del quemador del 50 %: se podrá observar la disminución de esfuerzos en el generador. La temperatura aportada por la llama del quemador será de 572,5 °C (845,65 K) en la zona de mayor incidencia de calor y en la zona de los colectores que será de 277,5 °C (550,65 K).
- Carga del quemador del 25 %: la temperatura aportada por la llama del quemador será de 286,25°C (559,4 K) en la zona de mayor incidencia de calor y en la zona de los colectores será de 77,25 °C (350,4 K).

Otra de las limitaciones encontradas en el uso del programa, es que no se ha conseguido simular la transferencia de calor desde una sección del cuerpo al resto de secciones. Por ejemplo, en la **fig.3.16** se le aplica una carga térmica en la parte central del haz tubular de 1443,15 K, esta sección estará sometida a esa carga, pero el resto de secciones no se verán influidas por ella. Por ello, se realizan unas intersecciones en el cuerpo para simular una propagación lo más real posible, con temperaturas decrecientes desde la zona de incidencia de la llama 1443,15 K hacia los colectores 1040,15 K (**fig.3.17**).



**Figura 3.16:** Aplicación de temperatura (K) en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.17:** Simulación de propagación de calor (K) del haz tubular del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



# 4 Características del generador de vapor

Los generadores de vapor son máquinas estancas diseñadas para el calentamiento del agua hasta su punto de ebullición, la energía térmica contenida en el vapor se usa tanto para calefacción como potencia en infinidad de sectores terrestres y marinos.

Este estudio se realizará sobre una caldera acuatubular de vapor saturado. En estas calderas el agua pasa por el interior de los tubos y los gases de la combustión por el exterior. El agua recibe el aporte térmico a través de los gases generados por la llama producida desde el quemador, alcanzando su temperatura de ebullición, produciendo vapor para su utilización. Esta clase de caldera puede operar con un alto rango de presiones de hasta 350 bar y producciones de vapor de hasta 2.000 t/h. La caldera seleccionada es la Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS.

## 4.1 Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS

Su construcción se compone principalmente de un colector de vapor y otro de agua, así como también de tubos de unión de los dos colectores, equipo de encendido, carcasa y otros accesorios (**fig.4.1**).

La estructura de la caldera se apoya en el colector de agua y unos soportes inferiores. Está diseñada para que sea capaz de soportar el balanceo y cabeceo del buque, prestándose especial atención al movimiento por expansión térmica de la caldera.

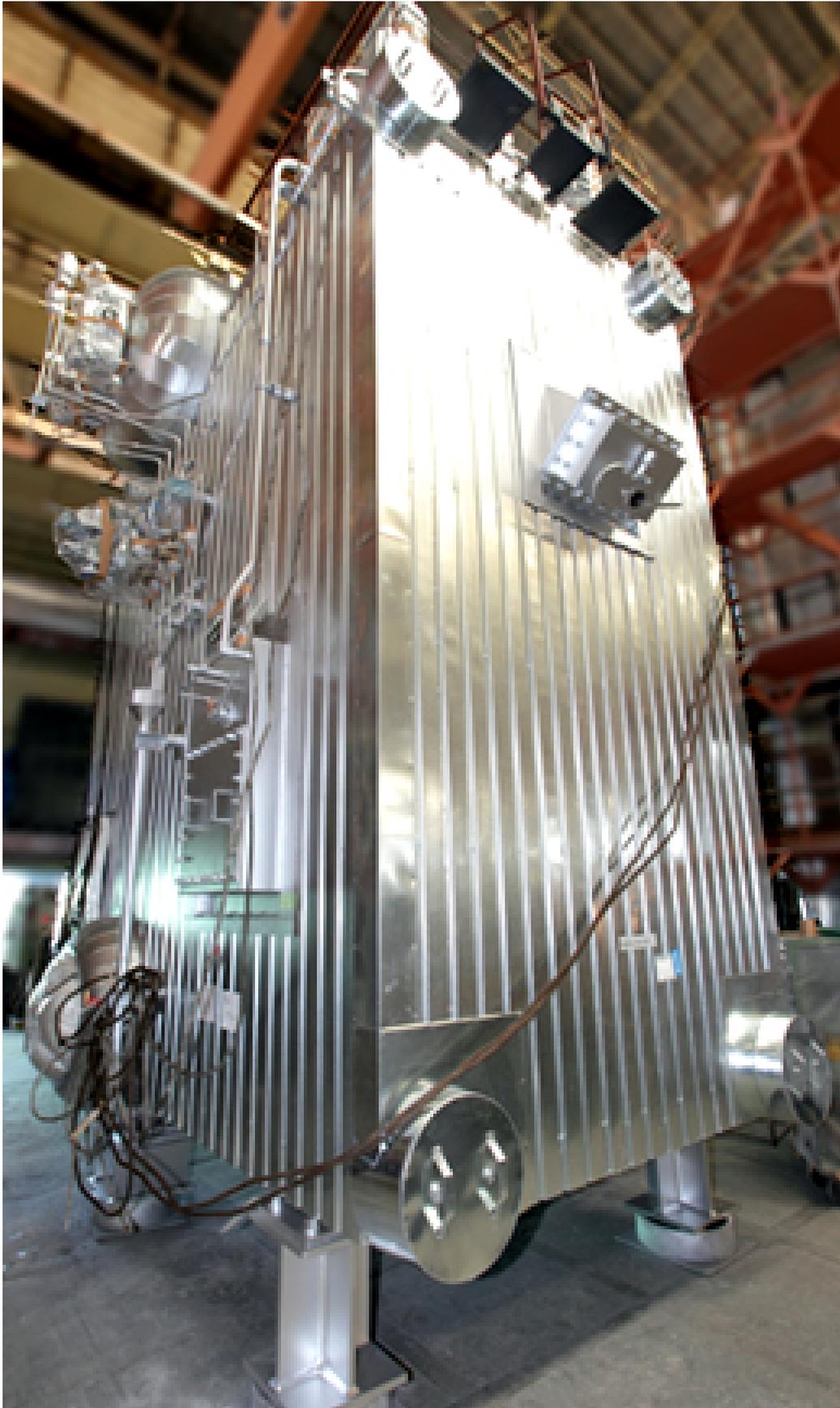
Los gases de combustión fluyen a través de la caldera en un flujo de retorno, facilitando el intercambio de calor. Está provista de compuertas que permiten el acceso de personas para su inspección.

En el hogar, los tubos de agua están bastante separados alrededor de la llama, excepto en la abertura del quemador y la pared frontal, tienen un diámetro exterior de 72,6 mm. La separación entre ellos y su diámetro aumenta la absorción de calor en el hogar así como hacerlo lo suficientemente fuerte como para soportar vibraciones.

El agua que entra en el colector de agua sube a través de los tubos hacia el colector de vapor, en su ascenso va aumentando su temperatura hasta llegar a la temperatura de saturación, comenzando a producirse el vapor en el colector de vapor.

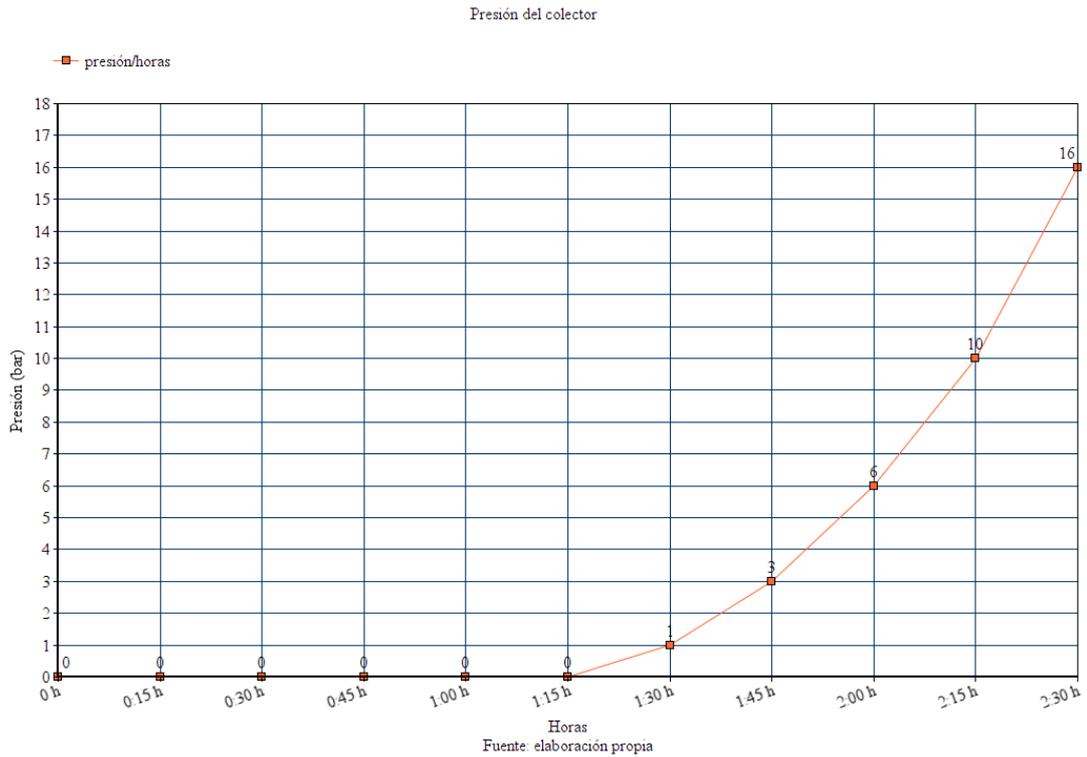
Los tubos soldados del techo, las paredes laterales y la parte inferior del hogar conectan el colector de agua y el de vapor, quedando completamente hermético a los gases. El aislamiento se aplica a la superficie exterior de las paredes de tubos de agua y la superficie más externa del aislamiento está cubierta con una carcasa de acero galvanizado.

Los colectores están fabricados utilizando un acero especial para calderas aprobado por la Sociedad de Clasificación de Buques correspondiente. Son de construcción soldada a la pared, y las uniones se producen de acuerdo con los procedimientos aprobados por la Sociedad de Clasificación de Buques. En el colector de vapor, tiene una placa amortiguadora multiperforada que cubre toda la superficie de evaporación del vapor, esta se utiliza para prevenir la generación de vapor de agua saturado. Además, en el compartimento de vapor tiene un separador de vapor que elimina completamente la humedad. El compartimento de agua está provisto de varias tuberías: la tubería interna de agua de alimentación, la de expulsión de la superficie interna, la interna de alimentación para introducir los productos químicos y la tubería de toma de muestras.



**Figura 4.1:** Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS

Fuente: [4]



**Figura 4.2:** Presión del colector

Fuente: [8]

El fabricante de este tipo de generador de vapor recomienda, que durante la puesta en marcha inicial de una caldera, el tiempo de encendido debe ser más largo que el estándar para su calentamiento y elevación de la presión, con ello se podrá realizar una inspección cuidadosa de los movimientos de expansión y los espacios libres de varias partes del interior del hogar. Una velocidad de encendido adecuada, requiere que el aumento de temperatura de saturación debe ser de  $67\text{ }^{\circ}\text{C}$  por hora en el hogar [8].

#### 4.1.1 Datos de diseño

| Localización                                | Nº de tubos | D ext mm | Espesor mm |
|---|-------------|----------|------------|
| Banco de tubos traseros                     | 465         | 50,8     | 2,9        |
| Muro de tubos frontales                     | 24          | 76,2     | 4,0        |
| Muro de tubos traseros                      | 24          | 76,2     | 4,0        |
| Banco de tubos frontales                    | 30          | 76,2     | 4,0        |
| Muro de tubos, techo, suelo y lateral       | 23          | 76,2     | 4,5        |
| Tubos laterales frontal del banco trasero   | 15          | 76,2     | 4,0        |
| Tubos laterales posterior del banco trasero | 15          | 76,2     | 4,0        |
| Tubos de pared de salida de los gases       | 15          | 76,2     | 4,5        |

**Tabla 4.1:** Datos de tubos del generador de vapor

| <b>Presión <math>kg/cm^2g</math></b>                   |                |
|--|----------------|
| Diseño   | 27             |
| Operación  | 25             |
| Test hidrostático                                      | 40,5           |
| Ajuste de la válvula de seguridad                      | 27             |
| <b>Temperatura <math>^{\circ}C</math></b>              |                |
| Colector de vapor                                      | 225 (Saturado) |
| Agua de alimentación                                   | 60             |
| Aire del quemador                                      | 38             |
| <b>Evaporación <math>kg/h</math></b>                   |                |
| Modo de caldera max 25 k                               | 30.000         |
| <b>Superficie de calentamiento <math>m^2</math></b>    | 436            |
| <b>Volumen del hogar <math>m^3</math></b>              | 20             |
| <b>Peso del agua en la caldera <math>kg</math></b>     |                |
| Agua fría total para llenar la unidad completamente    | 13.110         |
| Agua fría para llenar la caldera hasta el nivel normal | 10.660         |
| Agua de operación                                      | 9.177          |
| <b>Peso de la caldera <math>kg</math></b>              |                |
| Caldera seca con quemador y soplador de hollín         | 38.000         |
| Operación total  | 47.177         |

**Tabla 4.2:** Datos de diseño del generador de vapor

#### 4.1.2 Planos constructivos

Los planos para la modelización del generador de vapor saturado Mitsubishi Marine Water Tube Boiler MAC-30BS (**anexo A**). En ellos se puede observar la estructura interna y externa del generador. Hubo problemas para la obtención de las medidas exactas, ya que la calidad de los planos no es la idónea, con lo que fue imposible la extracción de algunos datos, no se apreciaba su valor exacto, para su obtención aproximada se midió con una regla y mediante fórmulas matemáticas fue calculado.

#### 4.1.3 Datos característicos de la caldera en relación a la carga

| <b>Rendimientos</b>                 |        |        |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Carga                               | 1/4    | 2/4    | 3/4    | B.MAX  |
| Evaporación $kg/h$                  | 7.500  | 15.000 | 22.500 | 30.000 |
| Presión del colector $kg/cm^2g$     | 25     | 25     | 25     | 25     |
| T agua de alimentación $^{\circ}C$  | 60     | 60     | 60     | 60     |
| T vapor saturado $^{\circ}C$        | 225,0  | 225,0  | 225,0  | 225,0  |
| Eficiencia de la caldera %          | 81,1   | 81,8   | 80,9   | 79,5   |
| Valor calorífico HHV $kcal/kg$      | 10.280 | 10.280 | 10.280 | 10.280 |
| Valor calorífico LHV $kcal/kg$      | 9.500  | 9.500  | 9.500  | 9.500  |
| Consumo fuel oil $kg/h$             | 593    | 1.175  | 1.782  | 2.418  |
| Tasa de exceso de aire %            | 31     | 16     | 15     | 15     |
| Tasa de $O_2$ %                     | 5,0    | 3,0    | 2,9    | 2,9    |
| Flujo de aire de combustión $kg/h$  | 10.880 | 19.090 | 28.690 | 38.930 |
| Flujo de gases de combustión $kg/h$ | 11.470 | 20.260 | 30.480 | 41.350 |
| T ambiente del aire $^{\circ}C$     | 38     | 38     | 38     | 38     |

**Tabla 4.3:** Datos característicos de la caldera en relación a la carga

## 4.2 Transferencia de calor en el generador de vapor

Puesto que se va a hacer un análisis termomecánico, es conveniente mencionar de forma sencilla como se propaga el calor producido por la llama del quemador, en el interior del hogar, hacia el agua en el interior de los tubos. La diferencia de temperatura produce el intercambio de calor de la parte con mayor temperatura a la de menor. En el generador se produce transferencia mixta de calor, incluyendo las tres formas de transferencia: radiación, convección y conducción [7]. En cada caso se plantean las variables de las que depende la transferencia térmica y que afectarán a los esfuerzos mecánicos.

### 4.2.1 Radiación

En esta transferencia de calor no existe contacto entre los materiales y tampoco fluido que transfiera el mismo. El calor es transferido desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones, la energía se propaga mediante ondas electromagnéticas en el espacio. Esto sucede cuando la energía interna se convierte en energía radiante. Existen dos factores importantes para que la radiación ocurra, primero la temperatura absoluta y segundo las propiedades ópticas del emisor. En el hogar, esta transferencia se produce por la carga térmica de la llama del quemador hasta los tubos y colectores, sin que haya contacto entre ellos (**fig.4.3**). Un cuerpo a temperatura superior al cero absoluto desprende energía radiante, por lo que el cuerpo emitirá ondas, esto produce que su temperatura disminuya. Son los rayos infrarrojos, que como cualquier fenómeno ondulatorio se caracteriza por la relación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.1)$$

$\nu$ : frecuencia de oscilación, Hz

$c$ : velocidad de propagación igual a la de la luz,  $\frac{m}{s}$

$\lambda$ : longitud de onda, m

El medio que se puede encontrar entre dos cuerpos puede ser transparente a la radiación térmica o no. Los gases compuestos por átomos del mismo tipo son transparentes a la radiación térmica ( $O_2, N_2$ ), sin embargo los que tienen átomos distintos son absorbentes selectivos. En las aplicaciones prácticas, el medio absorbente está compuesto por los gases de la combustión, estos contienen  $CO_2$  y  $H_2O$ , los dos son absorbentes selectivos de la radiación térmica. Para el cálculo del flujo de calor intercambiado entre un gas absorbente de la radiación y una pared sólida, se emplea la expresión:

$$q = \epsilon_{red} \sigma_0 A (\epsilon_g T_g^4 - A_g T_c^4) \quad (4.2)$$

$\epsilon_{red}$ : coeficiente de emisividad reducido o índice de ennegrecimiento, adimensional. Se calcula como:

$$\epsilon_{red} = \frac{\epsilon_c + 1}{2} \quad (4.3)$$

$\epsilon_c$ : coeficiente de emisividad de la pared sólida, adimensional

$\epsilon_g$ : coeficiente de emisividad reducido de los gases de combustión, adimensional

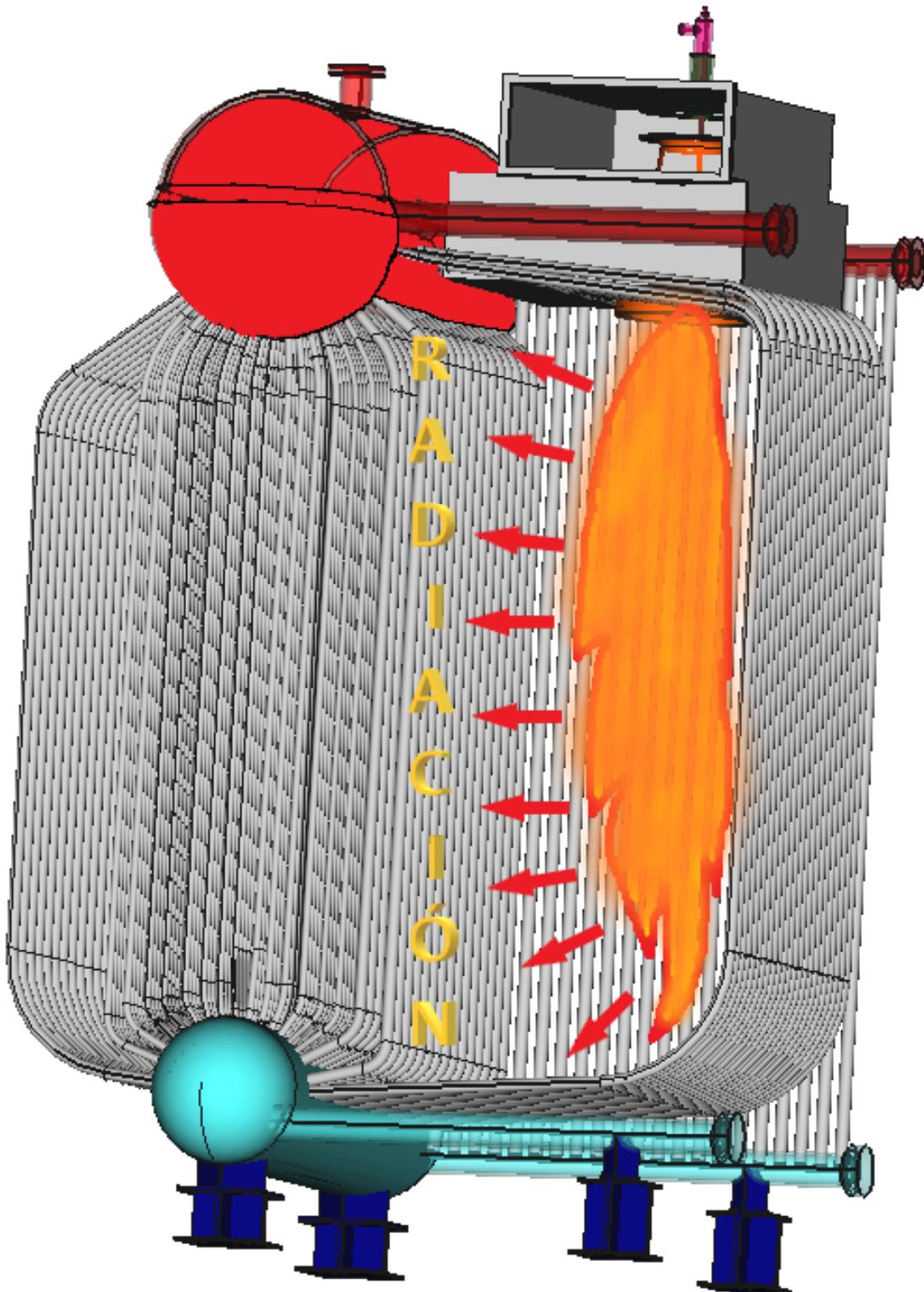
$$\epsilon_g = \epsilon_{CO_2} + \beta \epsilon_{H_2O} \quad (4.4)$$

$\epsilon$ : coeficiente de emisividad del  $CO_2$ , adimensional, depende de la presión parcial del gas y de la trayectoria recorrida por la radiación térmica en el seno de este ( $\epsilon_{CO_2} = f(p_{CO_2}, l)$ ).

$\epsilon_{H_2O}$ : coeficiente de emisividad del  $H_2O$ , adimensional, que depende de la presión parcial del gas y de la trayectoria recorrida por la radiación térmica en el seno de este ( $\epsilon_{H_2O} = f(p_{H_2O}, l)$ ).

$\beta$ : coeficiente de corrección para el vapor de agua, adimensional

$A_g$ : coeficiente de absorción de los gases, adimensional



**Figura 4.3:** Radiación en el interior del hogar

Fuente: Elaboración propia

$$A_g = \epsilon_{CO_2} \left( \frac{T_g}{T_c} \right)^{0,65} + \beta \epsilon_{H_2O} \quad (4.5)$$

$T_g$ : temperatura media de los gases, K

$T_c$ : temperatura media de la pared sólida (p.ej.: hogar de la caldera), K

El cálculo para la trayectoria que recorre la radiación térmica,  $l$ , se materializa con expresiones particulares para la geometría considerada. Para el hogar de una caldera:

$$l = 3,6 \frac{V}{A} \quad (4.6)$$

$l$ : trayectoria promedio recorrida por la radiación térmica en el espacio encerrado por la pared que rodea al gas emisor, m

$V$ : volumen del hogar,  $m^3$

$A$ : superficie interior del hogar,  $m^2$

## 4.2.2 Convección

En esta forma de transferencia interviene un fluido (gas o líquido), que se moverá entre zonas con diferentes temperaturas. Por ejemplo, al generarse la energía térmica que provoca la llama del quemador, los tubos del generador de vapor comenzarán a calentarse. Al estar en contacto con un fluido (agua), provocará que ocurran cambios de densidad que originan movimientos del fluido y, por tanto, flujos de calor (**fig.4.4**). Existen dos formas en esta transferencia:

- Natural: el fluido se mueve por diferencia de densidades originada por un gradiente de temperaturas en el seno del fluido. Es el caso de la caldera estudiada.
- Forzada: el fluido es impulsado por un medio externo (ventilador, bomba).

La ley de enfriamiento de Newton dice que un flujo de calor por convección es proporcional al área de la superficie de intercambio térmico  $A$ , y al gradiente de temperaturas entre el sólido y el fluido ( $t_a - t_b$ ):

$$q = \alpha A(t_a - t_b) \quad (4.7)$$

$q$ : coeficiente de convección en  $\frac{W}{m^2K}$

$\alpha$ : coeficiente de proporcionalidad de convección según Newton,  $\frac{W}{m^2C}$

$A$ : superficie que entrega el calor al fluido  $m^2$

$t_a$ : temperatura del cuerpo en K

$t_b$ : temperatura del fluido en K

## 4.2.3 Conducción

Esta transferencia de calor se genera por el intercambio de energía cinética molecular. El calor fluye a través de un cuerpo o entre cuerpos en contacto. Se debe a un gradiente de temperaturas, el calor es transferido del cuerpo con mayor temperatura al de menor. Los mejores conductores de calor son los cuerpos metálicos. Por tanto, en la caldera está asegurado. La transferencia de calor viene expresada por la ley de la conducción de Fourier.

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (4.8)$$

$dQ$ : calor transferido del punto a mayor temperatura al menor

$dt$ : tiempo que tarda el calor en ser transferido

$\lambda$ : conductividad térmica del cuerpo en  $\frac{W}{mK}$

$dT/dx$ : gradiente de temperatura en  $\frac{K}{m}$

$A$ : área del cuerpo en  $m^2$ .

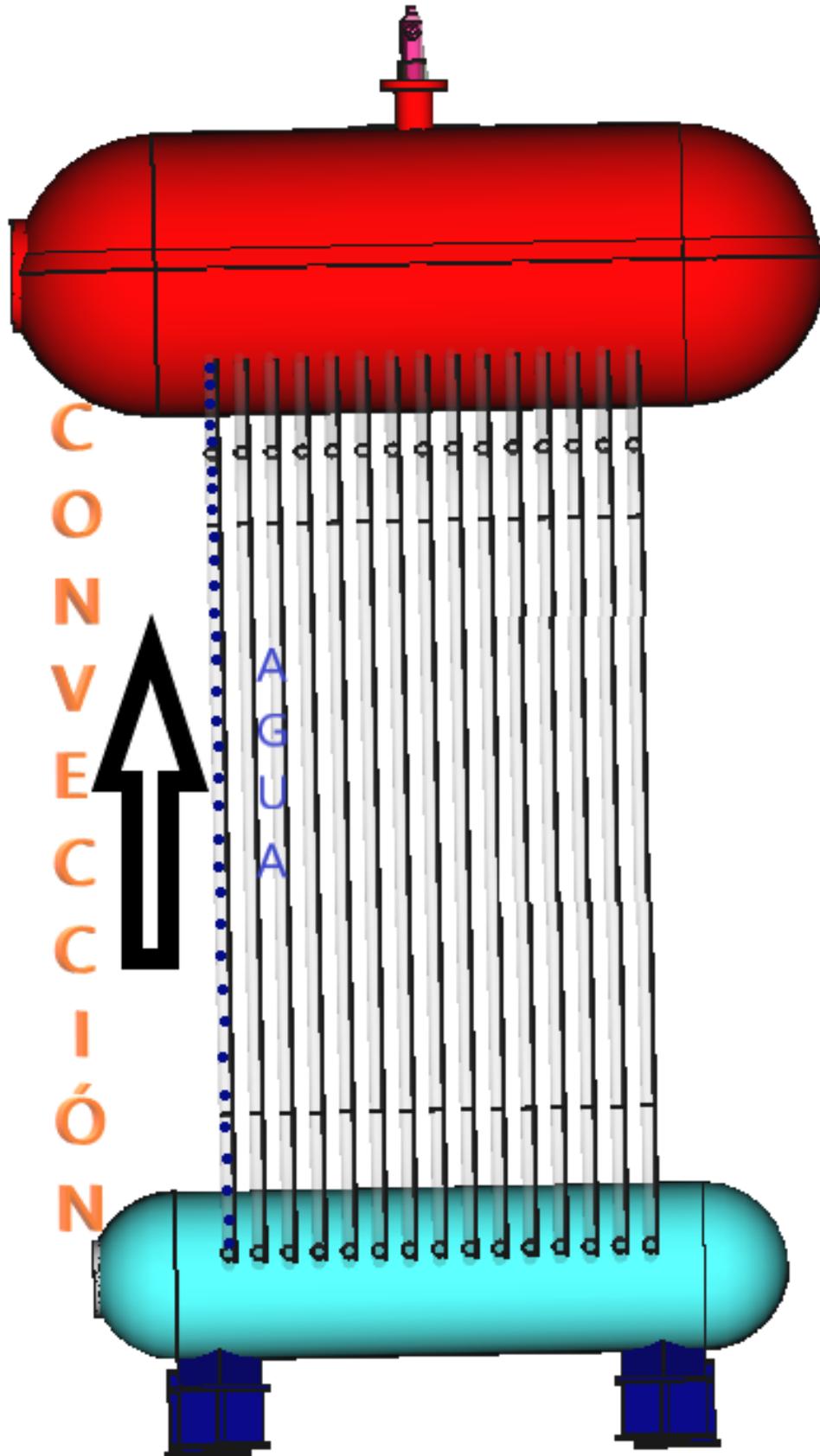
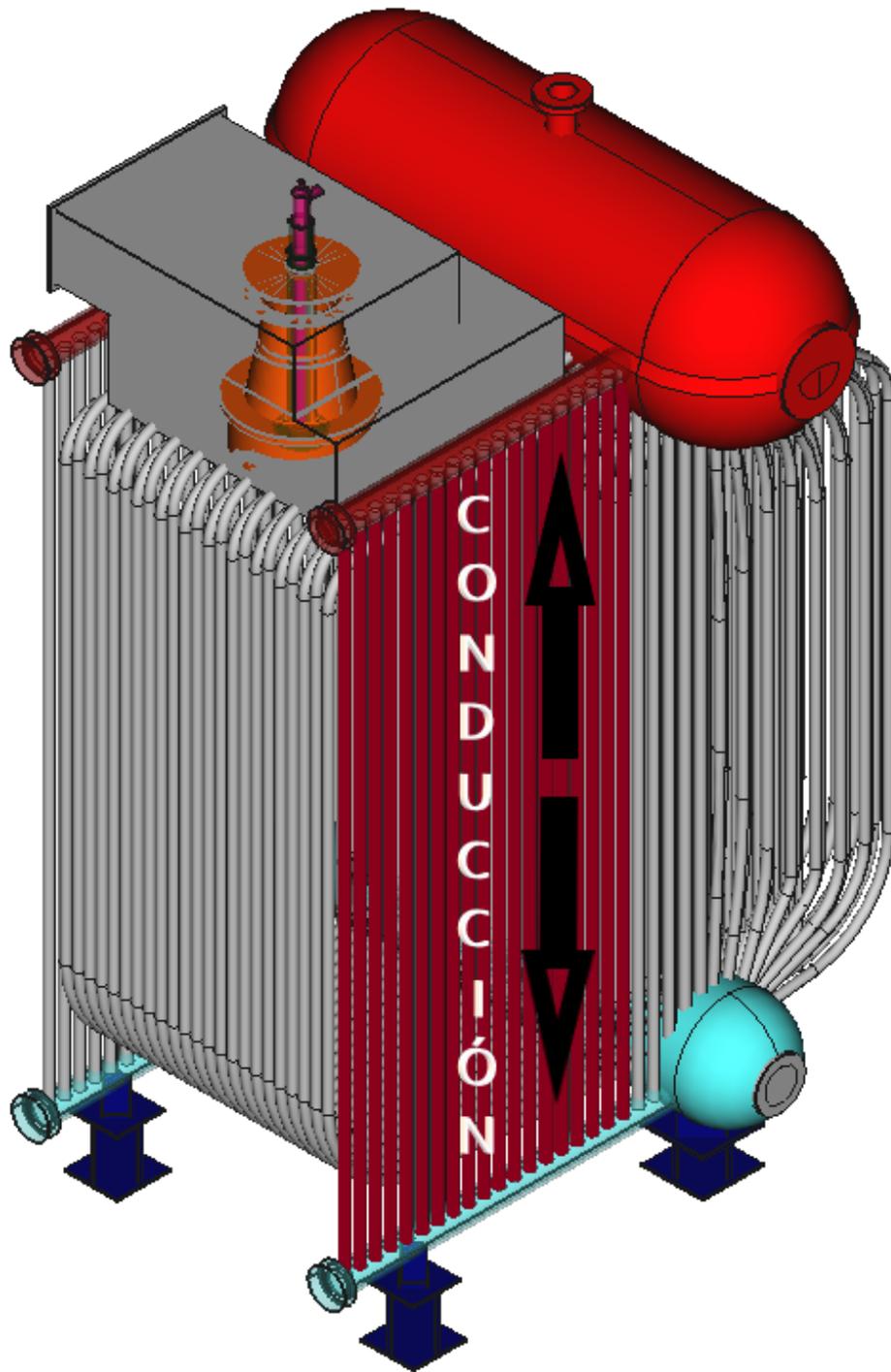


Figura 4.4: Transferencia térmica por convección en el generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.5:** Conducción en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

En un generador de vapor se produce a través del metal de los tubos y sus planchas (**fig.4.5**). Para este caso en concreto, en que las paredes son curvas y la superficie interior y exterior tienen distinta área, la dirección del flujo es radial. Para un tubo de longitud axial  $l$ , y cuya área desarrollada media es  $A_m$ , el flujo de calor valdrá:

$$q = \lambda \frac{A_m}{L} (t_a - t_b) \quad (4.9)$$

$q$ : flujo de calor transmitido

$\lambda$ : coeficiente medio de conductibilidad térmica a la temperatura media  $t_m$

$A_m = 2\pi r_m l$ : área de propagación del calor, descontando las bases del cilindro

$l$ : longitud del tubo

$r_m$ : radio medio para calcular el calor transmitido

$L = r_2 - r_1$ : espesor del tubo

$t_a$ : temperatura de la superficie más caliente

$t_b$ : temperatura de la superficie más fría

El flujo de calor queda:

$$q = \lambda \frac{2\pi r_m l}{r_2 - r_1} (t_a - t_b) \quad (4.10)$$

# 5 Resultados

Tras realizar el análisis termomecánico, mediante el módulo FEM se obtiene un procesado rápido con FreeCAD de los esfuerzos a los que se verá sometido el material. Para una mejor visualización, aporta una escala de colores en el mallado que sirve para observar los valores obtenidos, siendo el color verde el de menor esfuerzo y el rojo máximo. Otra de las opciones que permite FreeCAD es un postprocesado de los resultados con la herramienta VTK, siendo muy útil tanto para análisis avanzados como para fines de ilustración. Entre sus presentaciones están: superficie con bordes, armazón, superficie y nodos.

## 5.1 Banco de tubos frontal con una carga del quemador del 100 %

Esté banco de tubos es el más próximo a la llama del quemador (**fig.5.1**), por lo que se considera que sufrirá los mayores esfuerzos termomecánicos. Se compone de 15 tubos en paralelo que unen los dos colectores, tienen un diámetro exterior de 76,2 mm y un espesor de 4,0 mm.

### 5.1.1 Aplicación de temperaturas en el generador de vapor

Expone el rango de temperaturas aplicadas en las secciones del cuerpo para la realización del estudio termomecánico (**fig.5.2**). El agua se representa en color azul, en el interior del tubo y de los colectores. Mientras que el color rojo se observa en la parte central del tubo donde recibe mayor aporte térmico de la llama del quemador.

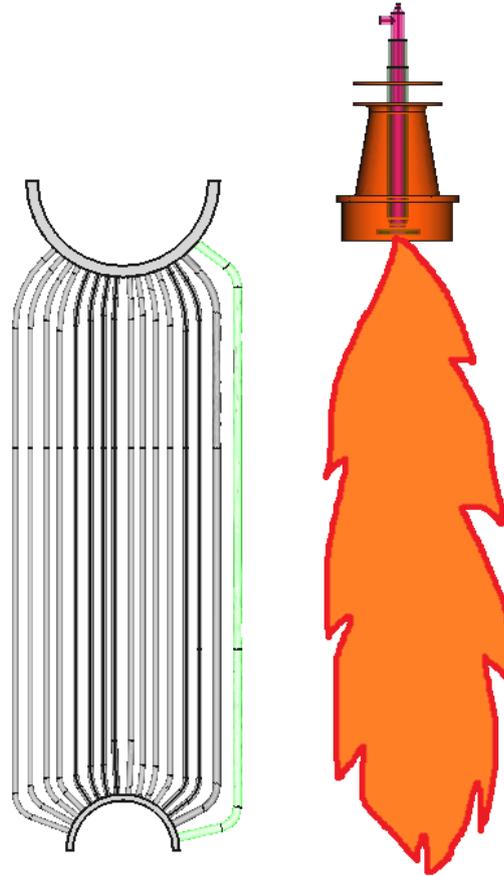
### 5.1.2 Esfuerzos Von Misses

Con la diferencia térmica a la que se ha sometido al material durante la fase de encendido, con una llama del quemador con carga del 100 % y la temperatura del agua a 25°C, de las **fig.5.3** y **tab.5.1** se observa que:

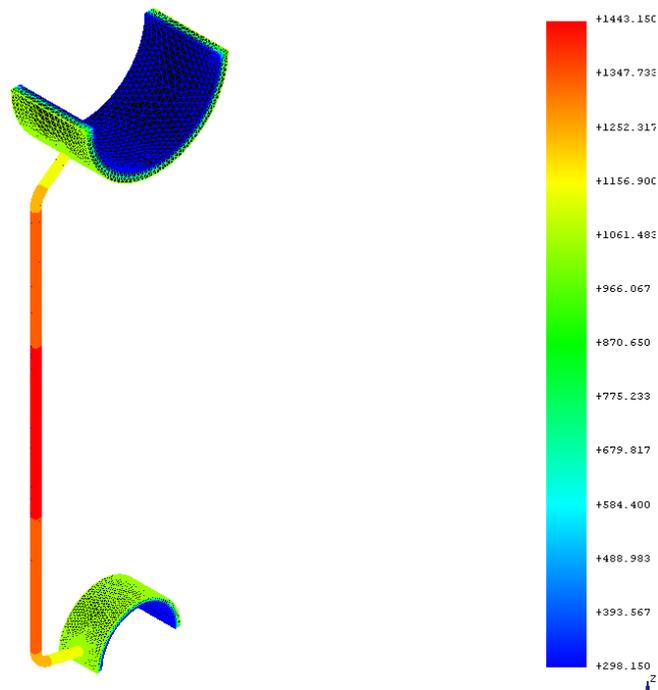
- El resultado de la tensión máxima de Von Misses es de 2965,82 MPa.
- El lugar de mayor tensión se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es mayor que la tensión de rotura del material (940 MPa).

| Escala tensión |             |
|----------------|-------------|
| Mínimo         | 13,64 kPa   |
| Medio          | 602,60 MPa  |
| Máximo         | 2965,82 MPa |

**Tabla 5.1:** Tensión de Von Misses del generador en la simulación

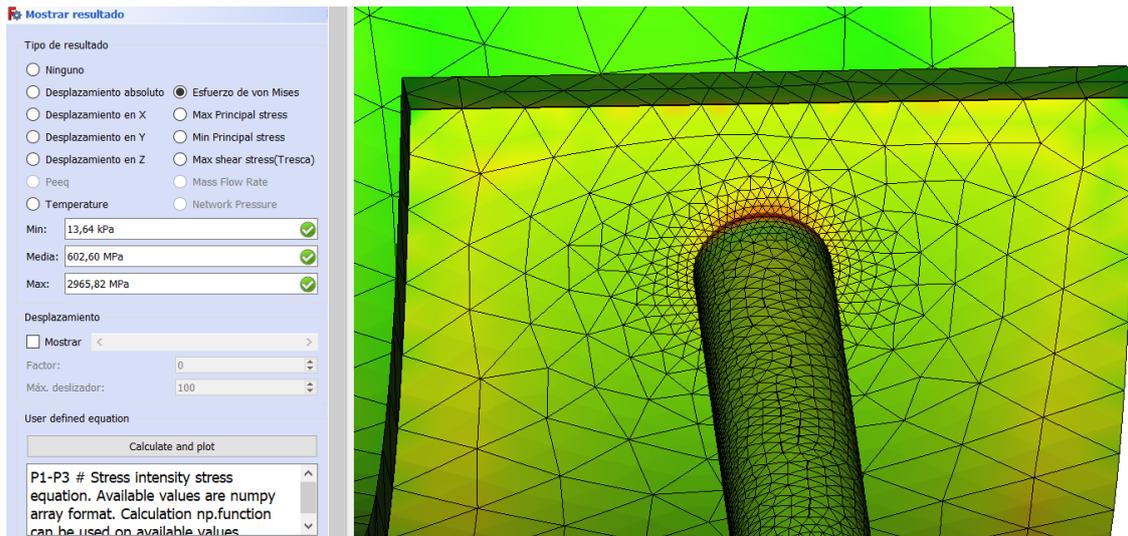


**Figura 5.1:** Banco de tubos del generador  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.2:** Presentación VTK de temperaturas (K) en el generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.3:** Esfuerzos Von Misses del generador en la simulación

Fuente: Elaboración propia

| Valor desplazamiento absoluto (mm) |       |
|------------------------------------|-------|
| Mínimo                             | 0,00  |
| Medio                              | 43,83 |
| Máximo                             | 82,68 |

**Tabla 5.2:** Desplazamiento absoluto del generador en la simulación

- Con lo que el material no aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.

Por ello, cabe destacar las importantes recomendaciones de los fabricantes de un encendido progresivo para disminuir las tensiones de los elementos mecánicos del generador de vapor.

En la representación VTK (fig.5.4), se visualiza mejor las altas concentraciones de tensión que pueden causar las uniones de los materiales a altas cargas térmicas [10].

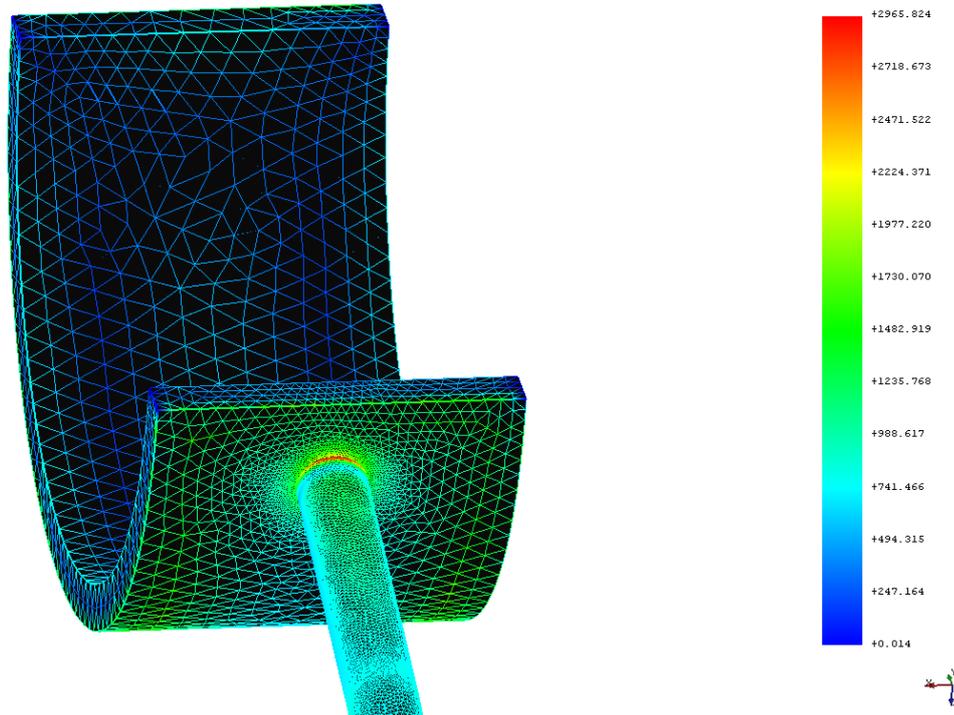
### 5.1.3 Desplazamiento absoluto

La deformación debida al desplazamiento del cuerpo, se muestra de forma exagerada al aplicar un factor de desplazamiento de 10 sobre 10 para facilitar su visualización (fig.5.5). Esta es una propiedad de visualización que tienen los resultados obtenidos para representar la deformación del cuerpo. Los resultados se observan para su análisis en tab.5.2.

La parte del cuerpo que sufrirá la mayor deformación se localiza en la parte central del haz tubular en rojo (fig.5.6), está zona experimentará un cambio en la forma del cuerpo original por la aplicación de los esfuerzos externos.

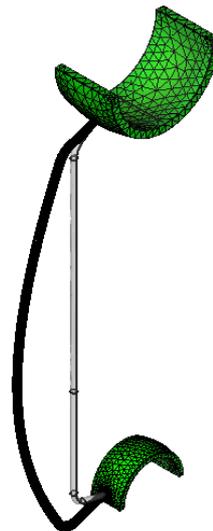
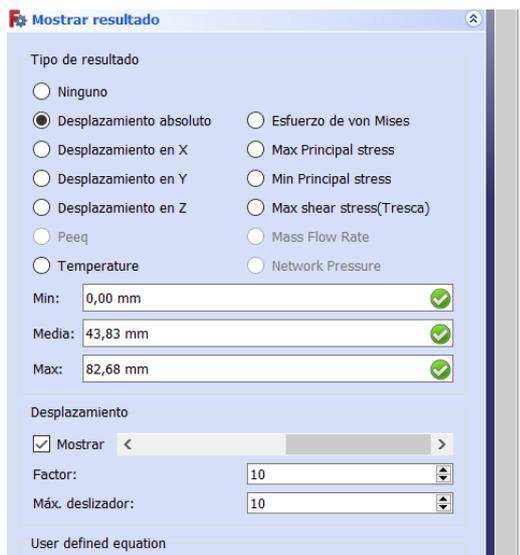
### 5.1.4 Máx. Shear Stress (esfuerzos cortantes)

Como en el esfuerzo de Von Misses, la zona mas sensible a este esfuerzo se localiza en la unión del haz tubular con los colectores (fig.5.7), en la fig.5.8 se observa la parte interna del tubo.



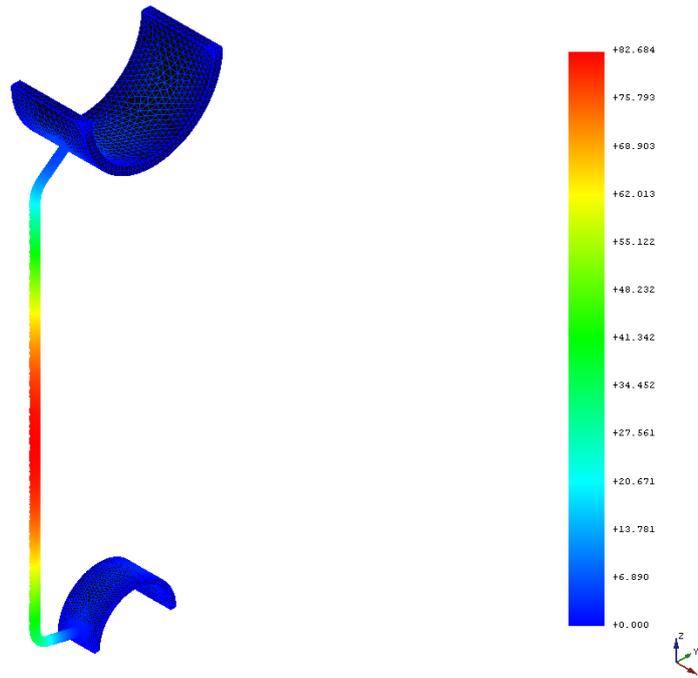
**Figura 5.4:** Representación VTK de los esfuerzos de Von Mises (MPa) en el generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.5:** Sección de mayor desplazamiento del generador en la simulación

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.6:** Representación VTK de la zona que experimenta la mayor deformación (mm) en el generador

Fuente: Elaboración propia

| Valor Max Shear Stress (esfuerzos cortantes) |             |
|--|-------------|
| Mínimo                                       | 6966,76 kPa |
| Medio  | 316,60 MPa  |
| Máximo                                       | 1635,32 MPa |

**Tabla 5.3:** Esfuerzos cortantes del generador en la simulación

De los resultados obtenidos en la simulación (**tab.5.3**) se destaca que:

- El resultado de la tensión máxima de los esfuerzos cortantes es de 1635,32 MPa.
- El lugar de mayor tensión se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es mayor que la resistencia a la cizalladura del material (520 MPa).
- Con lo que el material no aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.

Con el posprocesamiento VTK se consigue examinar mejor la zona de mayor influencia en el cuerpo analizado (**fig.5.9 y 5.10**). Entre sus características más importantes, está la función de clip escalar, con ella se puede mostrar de forma clara dónde suceden ciertos tipos de tensiones o temperaturas (**fig.5.11**). Esta función es muy importante para representar qué tensiones están por encima de las tensiones de diseño en un área delimitada.

### 5.1.5 Máx. Principal Stress (Tracción)

En los resultados que aporta la simulación (**fig.5.12**), su valor máximo está en la misma zona que la tensión de Von Mises, pero en la parte interna del tubo. Los valores obtenidos se plasman en la **tab.5.4**.

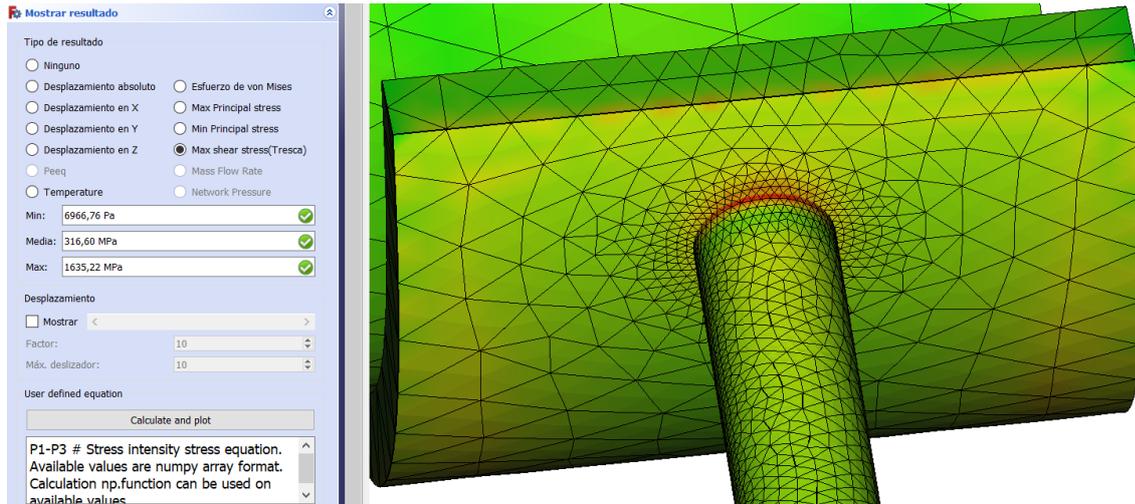


Figura 5.7: Esfuerzos cortantes del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

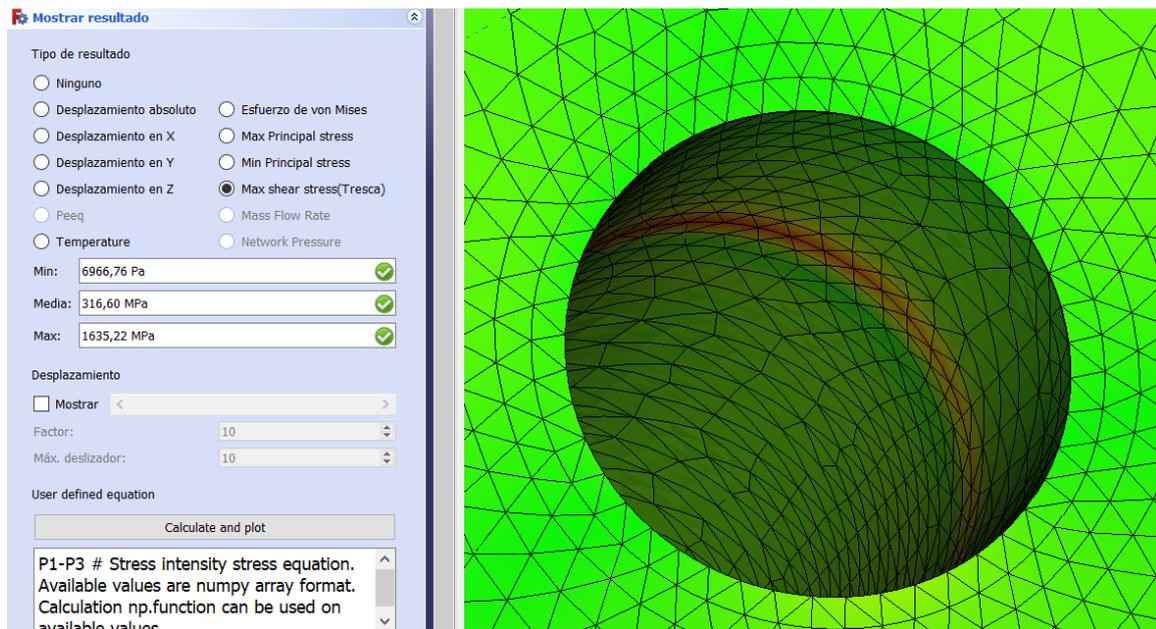


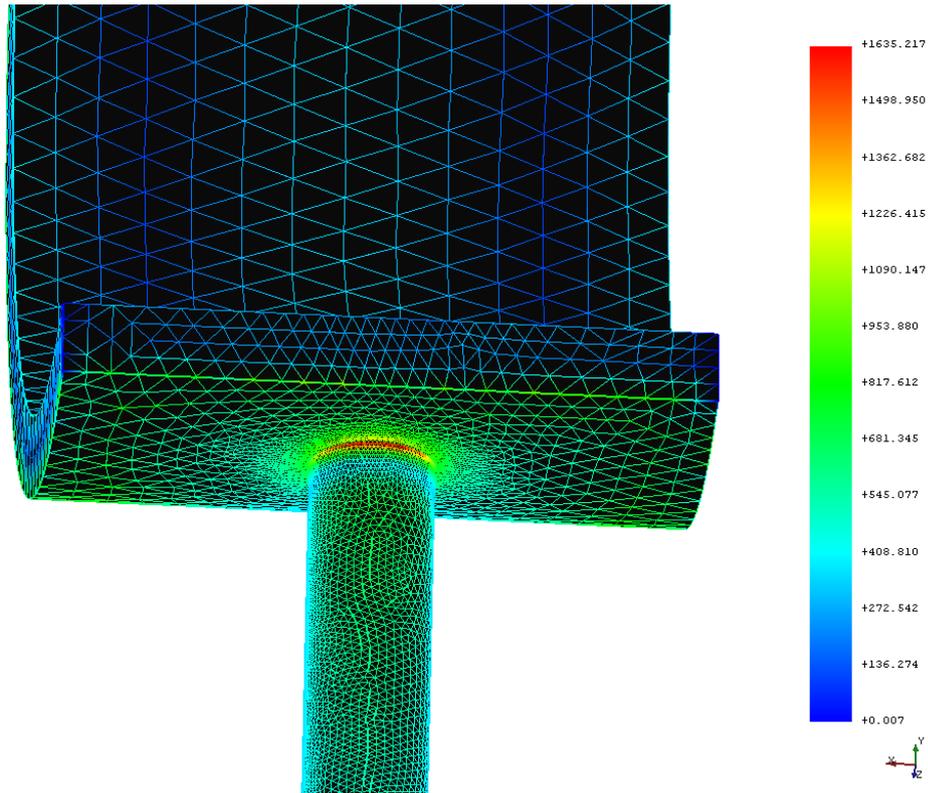
Figura 5.8: Esfuerzos cortantes en la parte interna del generador

Fuente: Elaboración propia

**Valor Max Principal Stress (Tracción)**

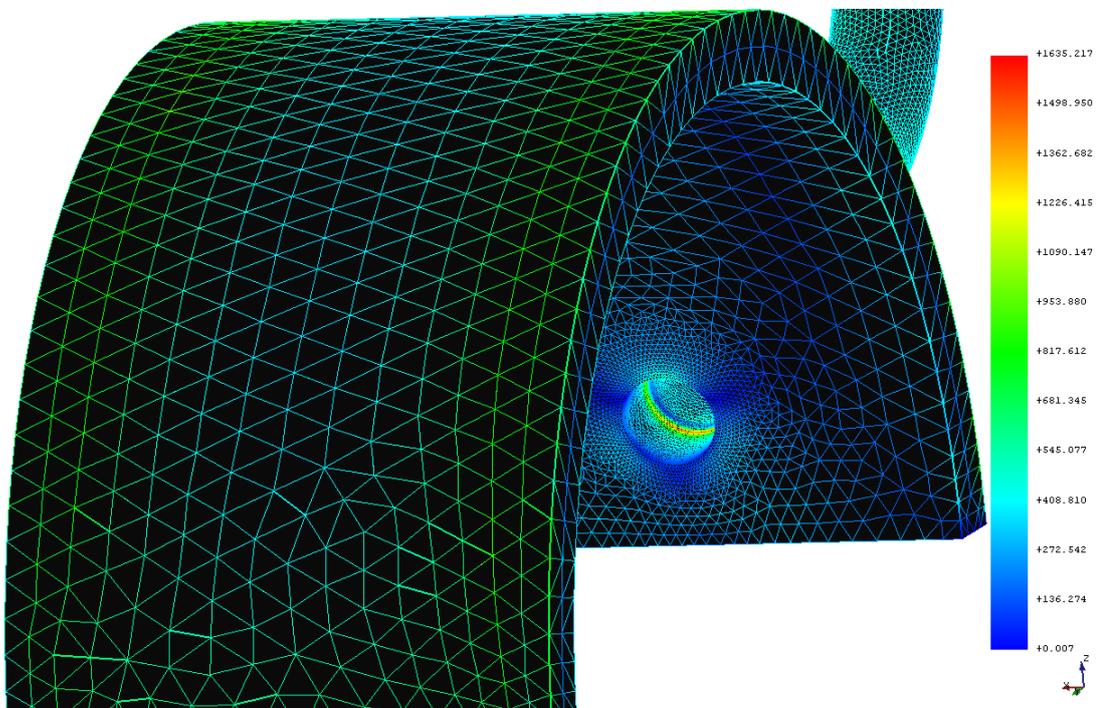
|        |              |
|--------|--------------|
| Mínimo | -1976,01 MPa |
| Medio  | 285,51 MPa   |
| Máximo | 2253,21 MPa  |

Tabla 5.4: Tracción del generador en la simulación



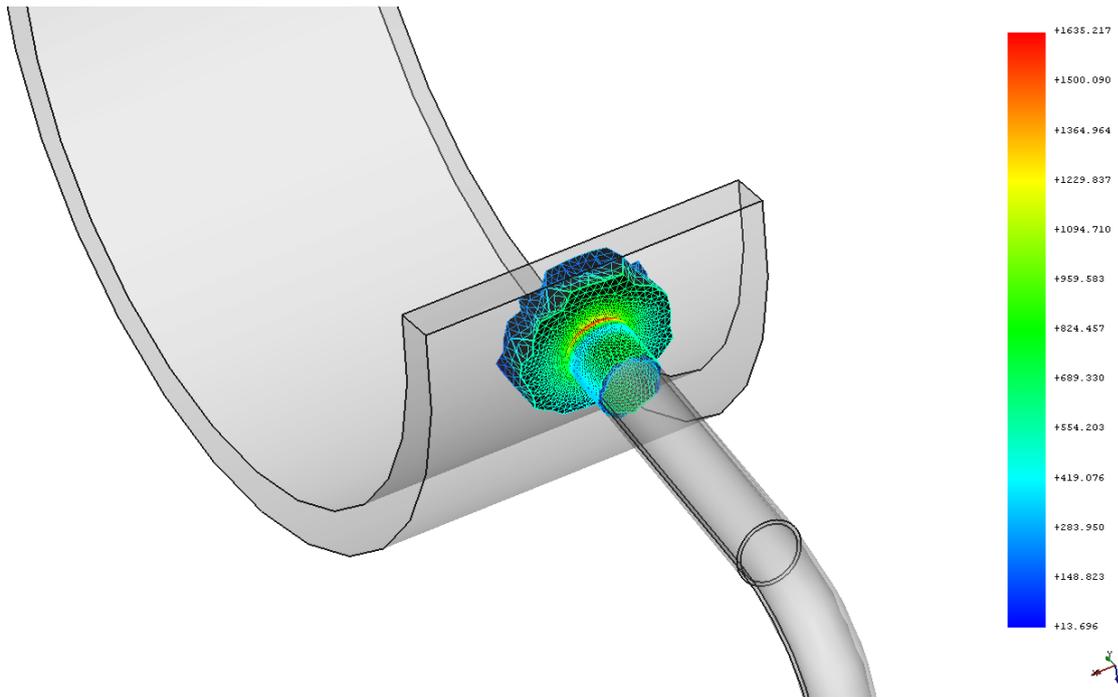
**Figura 5.9:** Representación VTK de los esfuerzos cortantes (MPa) del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.10:** Presentación VTK de los esfuerzos cortantes (MPa) del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.11:** Representación VTK con el clip escalar de los esfuerzos cortantes (MPa) del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

**Valor Mín Principal Stress (Compresión)**

|        |              |
|--------|--------------|
| Mínimo | -3648,15 MPa |
| Medio  | -347,69 MPa  |
| Máximo | 458,37 MPa   |

**Tabla 5.5:** Compresión del generador en la simulación

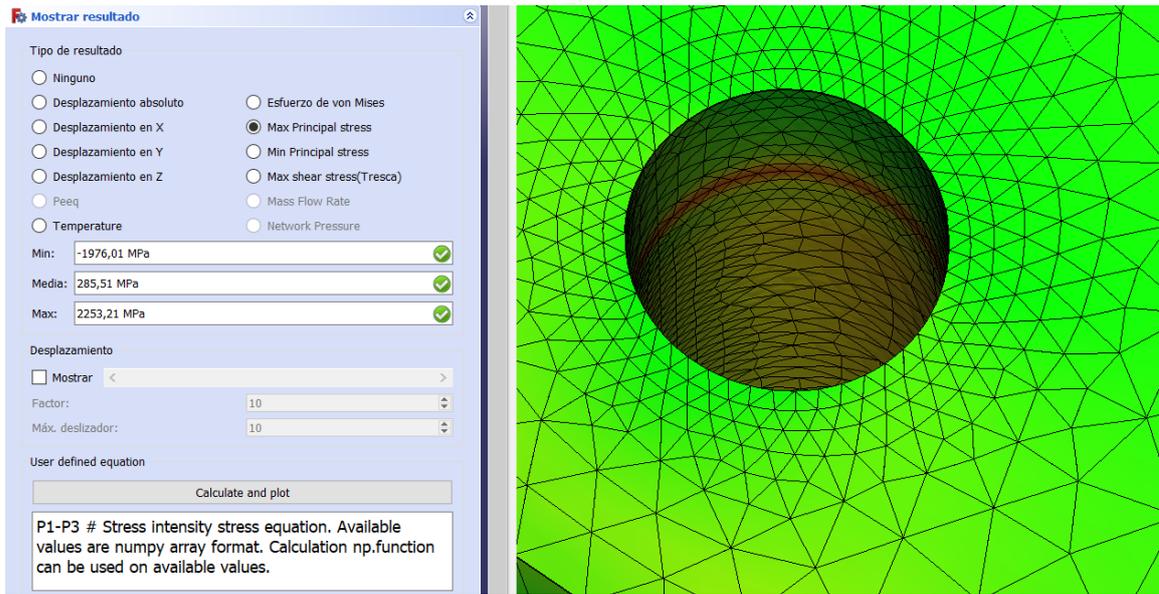
Con el posprocesado VTK se visualiza mejor la zona de mayor esfuerzo (fig.5.13); la parte interna del haz tubular sufrirá los mayores esfuerzos (fig.5.14). De la simulación se destaca que:

- El resultado de la tracción máxima es de 5277,42 MPa.
- El lugar de máxima tracción se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es mayor que la resistencia a la tracción del material (750 MPa).
- Con lo que el material no aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.

### 5.1.6 Mín. Principal Stress (Compresión)

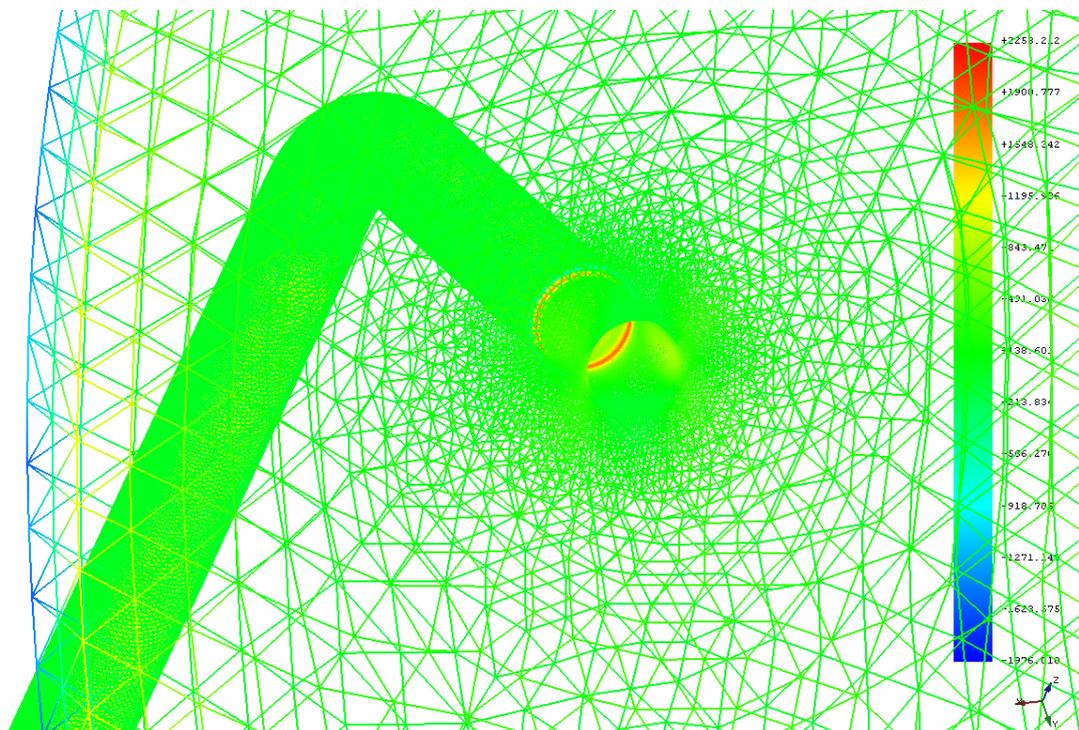
En los resultados aportados por el análisis realizado, se observa que la zona que sufre el mayor impacto por el esfuerzo de compresión se sitúa en las caras internas de los colectores (fig.5.15 y tab.5.5). Cabe destacar que están cerca de las zonas en las que se aplicaron las restricciones estáticas, quedando esas caras fijas. Esta simulación presenta datos confusos, puesto que esas caras no son fijas y la dimensión de los colectores es mayor a la estudiada por la limitación del software.

En la fig.5.16, con la aplicación del posprocesado VTK, se presenta de forma clara las zonas de mayor influencia de esta tensión. Estas se generan en el interior de los colectores del generador de vapor estudiado.



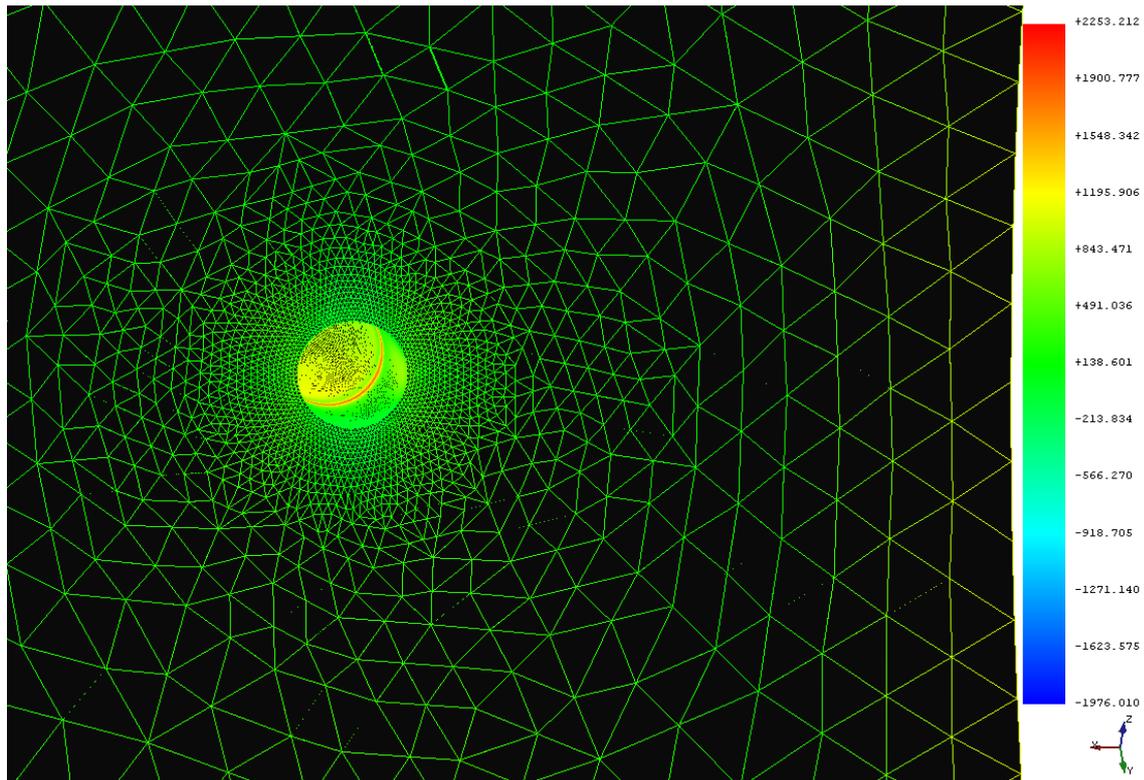
**Figura 5.12:** Esfuerzo de tracción del generador de vapor en la simulación

Fuente: Elaboración propia



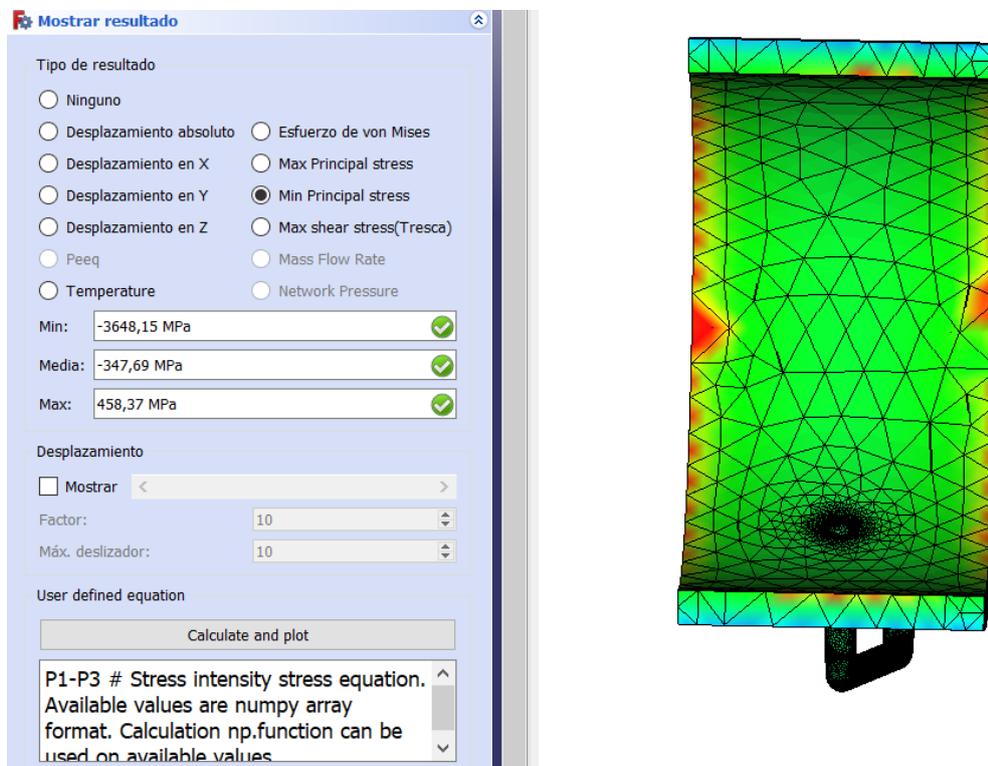
**Figura 5.13:** Presentación VTK del esfuerzo de tracción (MPa) del generador

Fuente: Elaboración propia



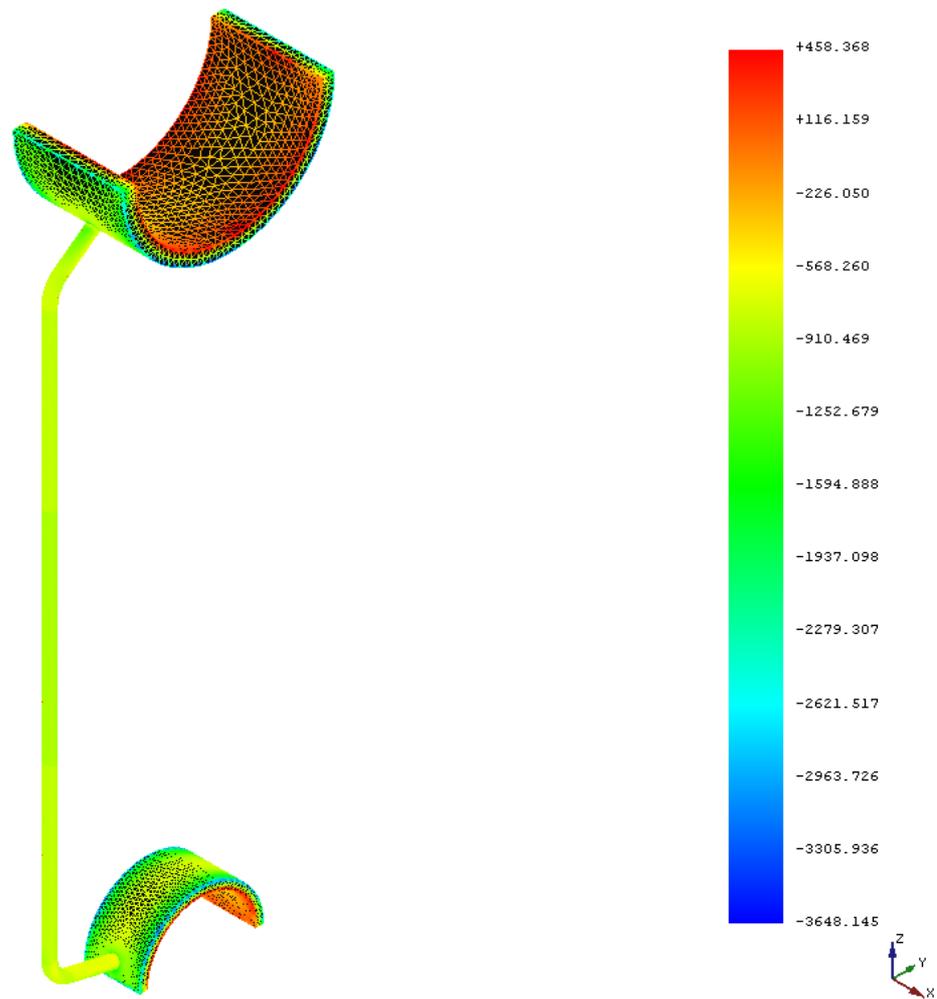
**Figura 5.14:** Representación VTK de los esfuerzo de tracción (MPa) en el interior del tubo del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



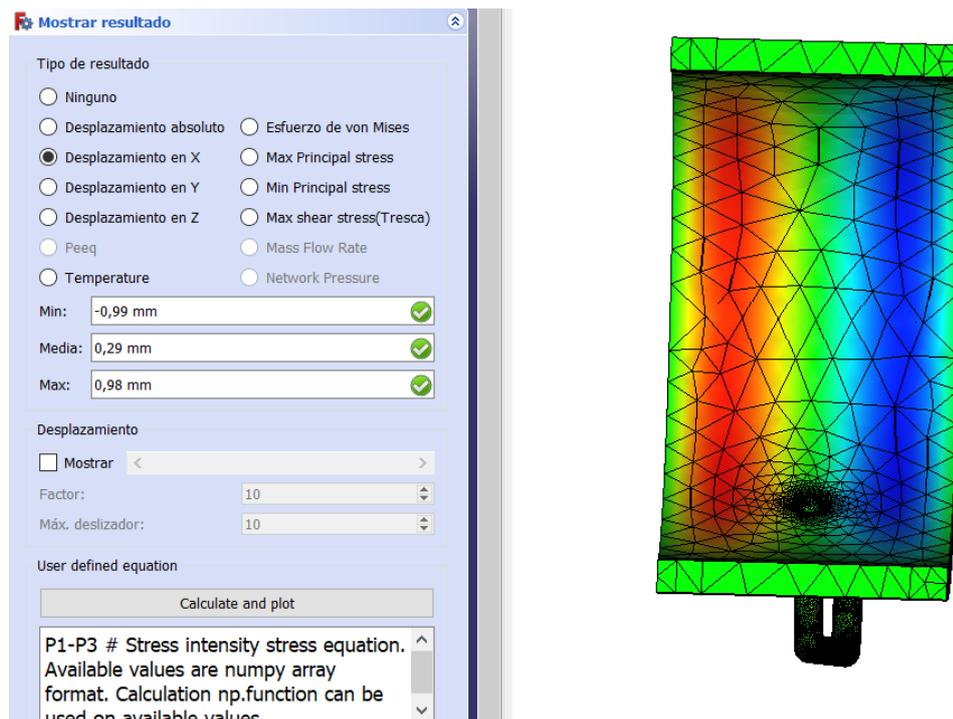
**Figura 5.15:** Esfuerzo de compresión del generador en la simulación

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.16:** Esfuerzo de compresión (MPa) del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.17:** Deformación en el eje X del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

**Valor deformación en el eje X (mm)**

|        |       |
|--------|-------|
| Mínimo | -0,99 |
| Medio  | 0,29  |
| Máximo | 0,98  |

**Tabla 5.6:** Deformación en el eje X para una carga del quemador del 100 %

### 5.1.7 Deformación en la dirección de los ejes X, Y, Z

El valor de deformación máxima que se obtiene en el eje X (**fig.5.17 y tab.5.6**). Se aprecia que la zonas de mayor deformación se encuentran en la sección interna de los colectores, tanto la máxima como la mínima.

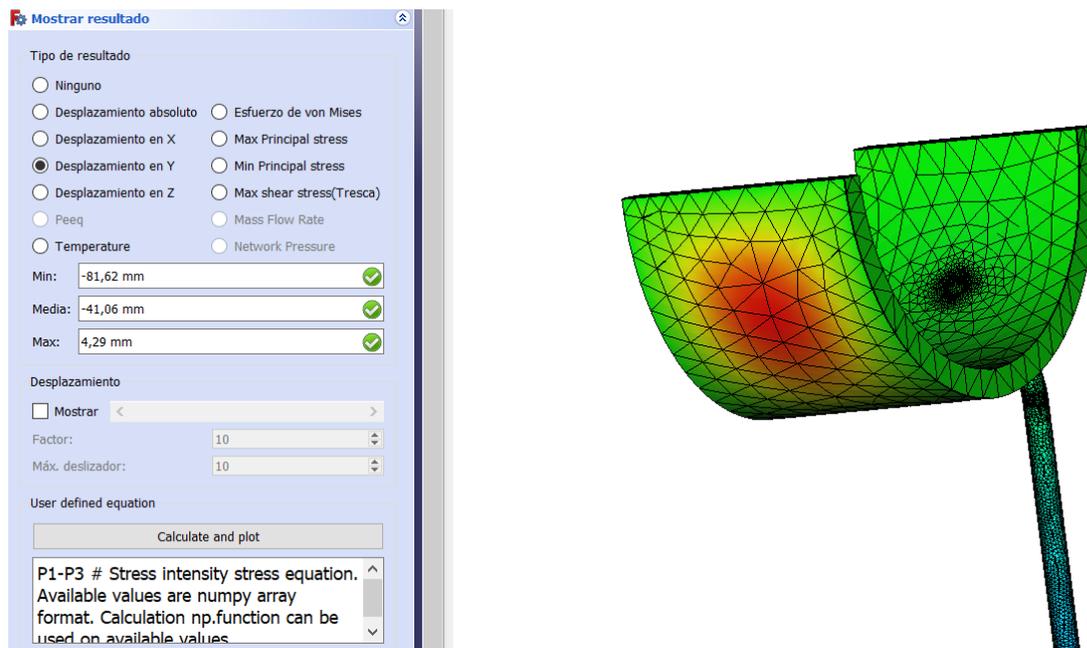
En cuanto al valor de deformación máxima que se obtiene en el eje Y (**fig.5.18 y tab.5.7**). Se observa que la sección de mayor deformación se ubica en la sección central de los colectores, tanto en la parte interna y como en la externa.

Por último, el valor de deformación máxima que se obtiene en el eje Z (**fig.5.19 y tab.5.8**), se visualiza que esta deformación se presenta en la región curva del haz tubular del generador de vapor.

**Valor deformación en el eje Y (mm)**

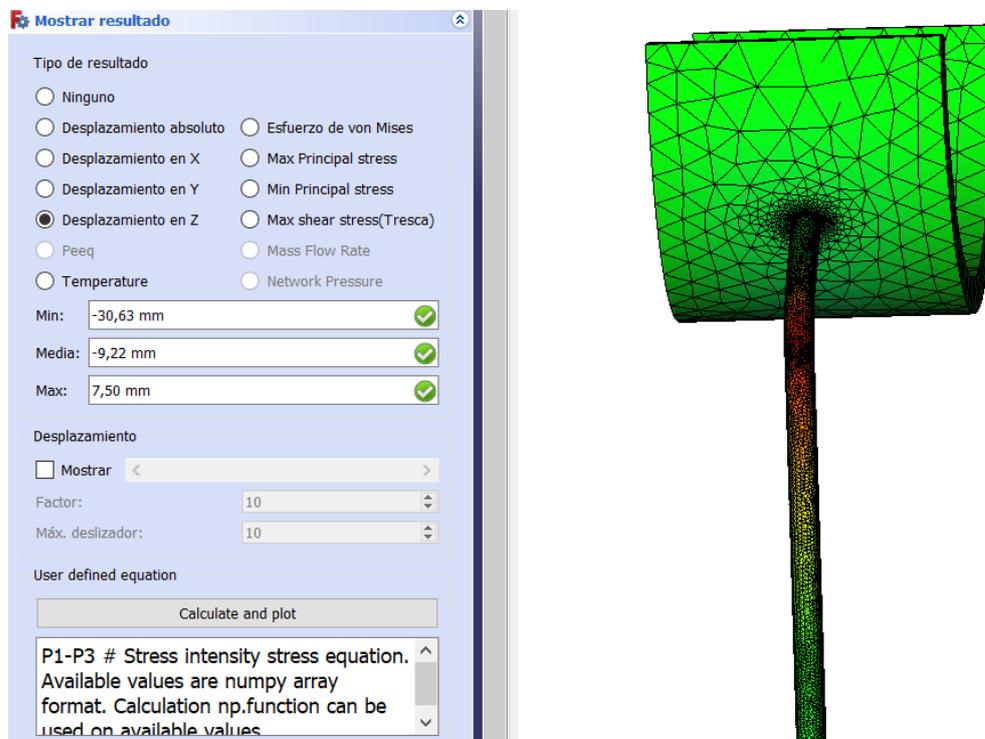
|        |        |
|--------|--------|
| Mínimo | -81,62 |
| Medio  | -41,06 |
| Máximo | 4,29   |

**Tabla 5.7:** Deformación en el eje Y para una carga del quemador del 100 %



**Figura 5.18:** Deformación en el eje Y del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

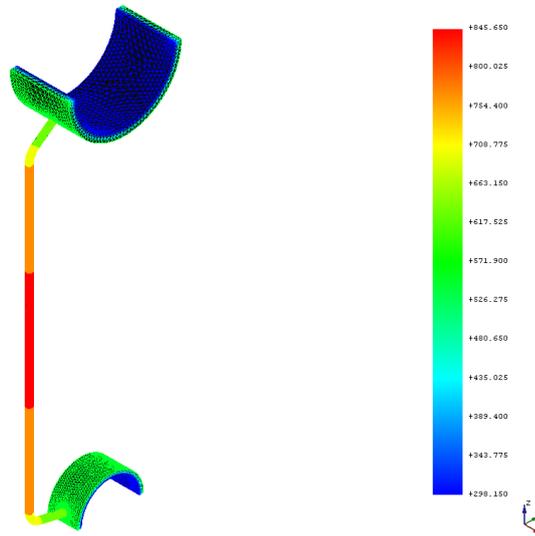


**Figura 5.19:** Deformación en el eje Z del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

| Valor deformación en el eje Z (mm) |        |
|------------------------------------|--------|
| Mínimo                             | -30,63 |
| Medio                              | -9,22  |
| Máximo                             | 7,50   |

**Tabla 5.8:** Deformación en el eje Z para una carga del quemador del 100 %



**Figura 5.20:** Presentación VTK de la propagación de la temperatura (K) en el generador

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 Banco de tubos frontal con una carga del quemador del 50 %

Esté banco de tubos es el mismo que el anterior estudiado, pero con una carga de la llama del quemador de 50 %, por lo que sufrirá menos esfuerzos termomecánicos que con la carga al 100 %.

### 5.2.1 Aplicación de temperaturas en el generador de vapor

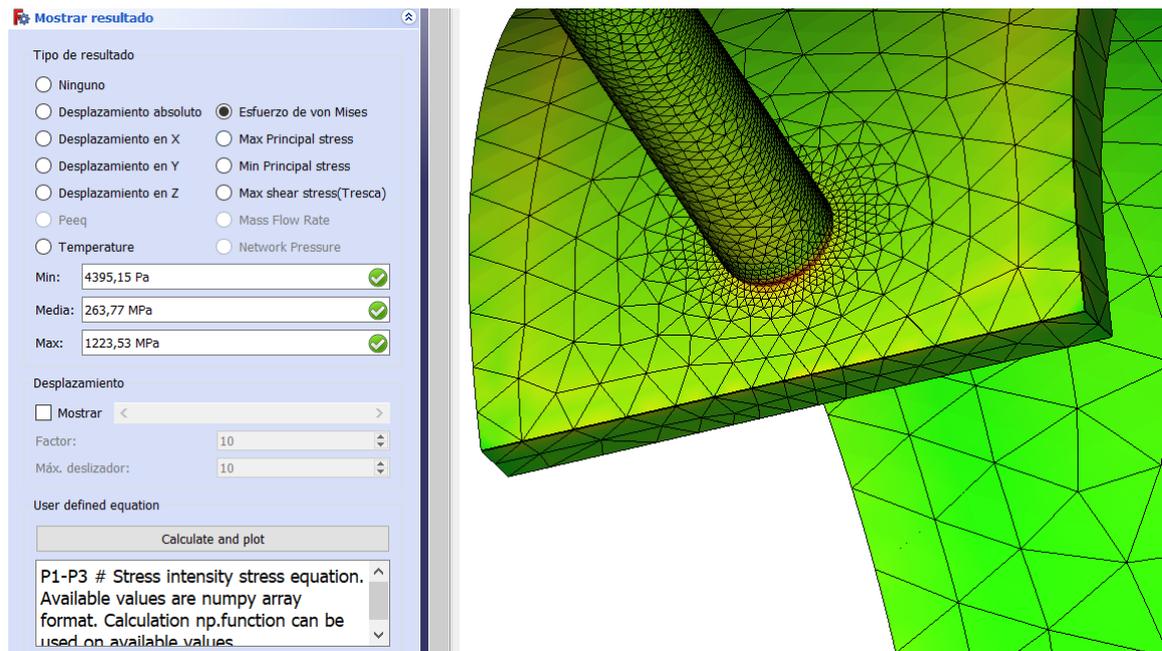
Muestra las temperaturas que se han aplicado en las secciones del cuerpo para la realización del estudio termomecánico (fig.5.20).

### 5.2.2 Esfuerzos Von Misses

En la fig.5.21 se representa el esfuerzo sufrido por el generador, la presentación de la fig.5.22 se visualiza mejor el esfuerzo al que se encuentra sometido. En la tab.5.9 se muestran los resultados obtenidos de donde se concluye que:

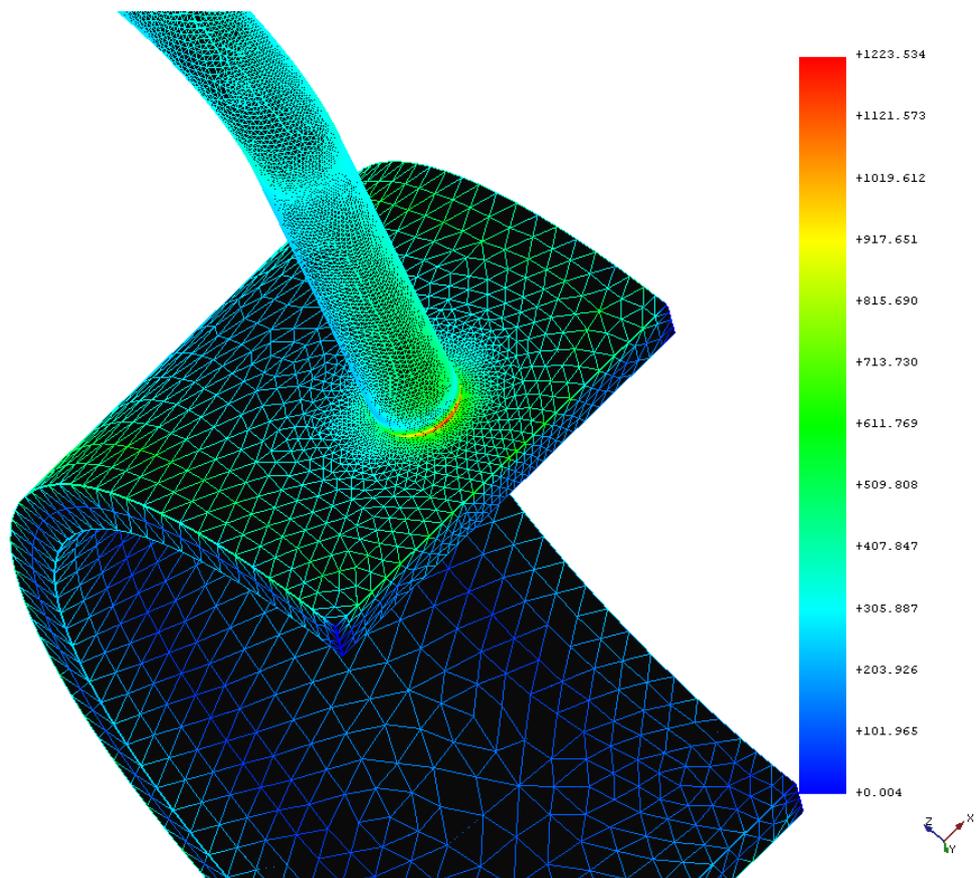
| Escala tensión |             |
|----------------|-------------|
| Mínimo         | 4395,15 Pa  |
| Medio          | 263,77 MPa  |
| Máximo         | 1223,53 MPa |

**Tabla 5.9:** Tensión de Von Misses del generador en la simulación



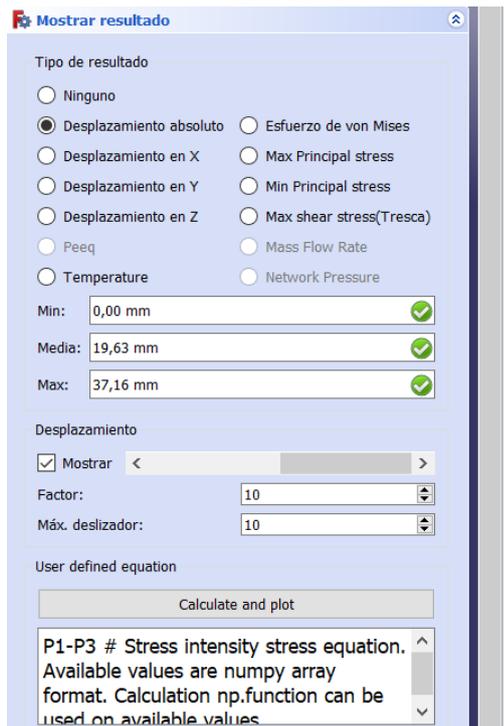
**Figura 5.21:** Esfuerzos Von Misses en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.22:** Presentación VTK del esfuerzo de Von Misses (MPa) sufrido por el generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.23:** Desplazamiento del haz tubular del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

| Valor desplazamiento absoluto (mm) |       |
|------------------------------------|-------|
| Mínimo                             | 0,00  |
| Medio                              | 19,63 |
| Máximo                             | 37,16 |

**Tabla 5.10:** Desplazamiento absoluto del generador en la simulación

- El resultado de la tensión máxima de Von Misses es de 1223,53 MPa.
- El lugar de mayor tensión se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es mayor que la tensión de rotura del material (940 MPa).
- Con lo que el material no aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.
- Los esfuerzo a los que se encontrará sometido el generador, son menores que con una carga del generador del 100 %.

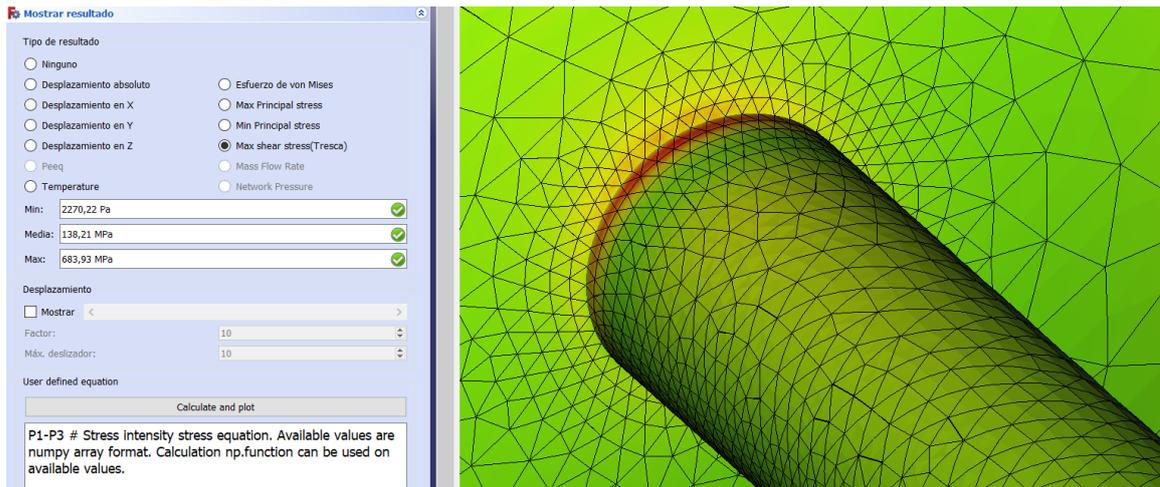
### 5.2.3 Desplazamiento absoluto

La deformación debida al desplazamiento del cuerpo (**fig.5.23**). Aplicándole el mismo factor de desplazamiento y comparándola con el desplazamiento obtenido con una carga del 100 % (**fig.5.5**), se aprecia una disminución en su deformación. En la (**tab.5.10**) se muestran los valores obtenidos.

### 5.2.4 Máx. Shear Stress (esfuerzos cortantes)

El mayor esfuerzo se localiza en la unión del haz tubular y colectores (**fig.5.24**).

De los resultados obtenidos en la simulación (**tab.5.11**) se destaca que:



**Figura 5.24:** Esfuerzos cortantes sufridos en el generador

Fuente: Elaboración propia

**Valor Max Shear Stress (esfuerzos cortantes)**

|        |            |
|--------|------------|
| Mínimo | 2270,22 Pa |
| Medio  | 138,21 MPa |
| Máximo | 683,93 MPa |

**Tabla 5.11:** Esfuerzos cortantes del generador en la simulación

- El resultado de la tensión máxima de los esfuerzos cortantes es de 683,93 MPa.
- El lugar de mayor tensión se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es mayor que la resistencia a la cizalladura del material (520 MPa).
- Con lo que el material no aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.

**5.2.5 Máx. Principal Stress (Tracción)**

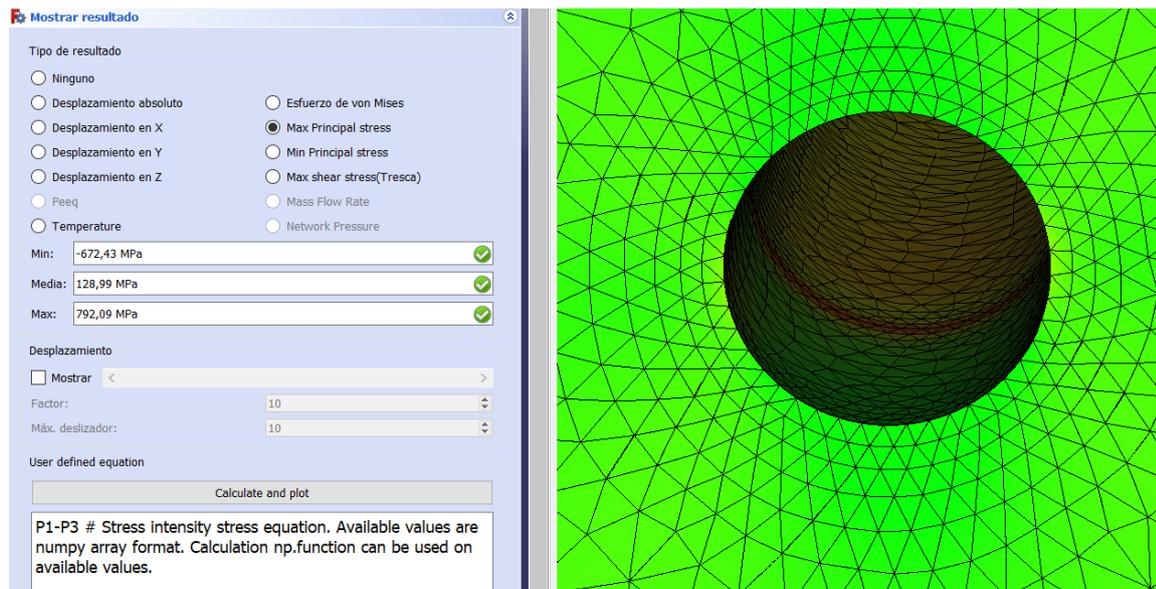
En los resultados que aporta la simulación (**fig.5.25**), el valor máximo de la tensión principal máxima se encuentra en la parte interna del haz tubular y la conexión del tubo con el colector. Los valores obtenidos se detallan en la **tab.5.12**.

- El resultado de la tracción máxima es de 792,09 MPa.
- El lugar de máxima tracción se produce en el interior del haz tubular.
- Esta tensión es mayor que la resistencia a la tracción del material (750 MPa).
- Con lo que el material no aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.

**Valor Max Principal Stress (Tracción)**

|        |             |
|--------|-------------|
| Mínimo | -672,43 MPa |
| Medio  | 128,99 MPa  |
| Máximo | 792,09 MPa  |

**Tabla 5.12:** Tracción del generador en la simulación



**Figura 5.25:** Esfuerzo de tracción en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

| Valor Mín Principal Stress (Compresión) |              |
|---|--------------|
| Mínimo                                  | -1533,15 MPa |
| Medio                                   | -147,43 MPa  |
| Máximo                                  | 155,90 MPa   |

**Tabla 5.13:** Compresión del generador en la simulación

### 5.2.6 Mín. Principal Stress (Compresión)

En los resultados se observa que la zona que sufre la mayor influencia por el esfuerzo de compresión se sitúa en las caras internas de los colectores (**fig.5.26**). En la **tab.5.13** se representan los valores obtenidos.

### 5.2.7 Deformación en la dirección de los ejes X, Y, Z

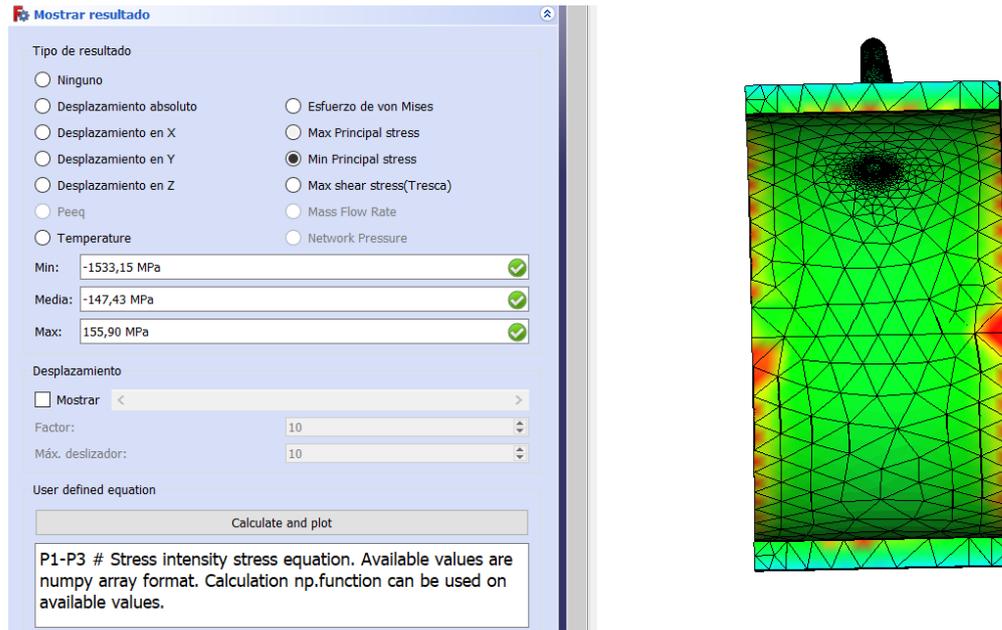
En la **tab.5.14** se recogen los valores de deformación máxima en el eje X, en la **fig.5.27** se aprecia que las zonas de mayor deformación se encuentran en la sección interna de los colectores, tanto la máxima como la mínima.

En cuanto al valor de deformación máxima que se obtiene en el eje Y (**fig.5.28**), se observa que la sección de mayor deformación se ubica en la sección central de los colectores. En la **tab.5.15** se exponen los valores de deformación obtenidos.

Por último, el valor máximo de deformación que se obtiene en el eje Z (**fig.5.29**). Se visualiza que esta deformación se presenta en la región curva del haz tubular del generador de vapor. En la **tab.5.16** se detallan los valores obtenidos.

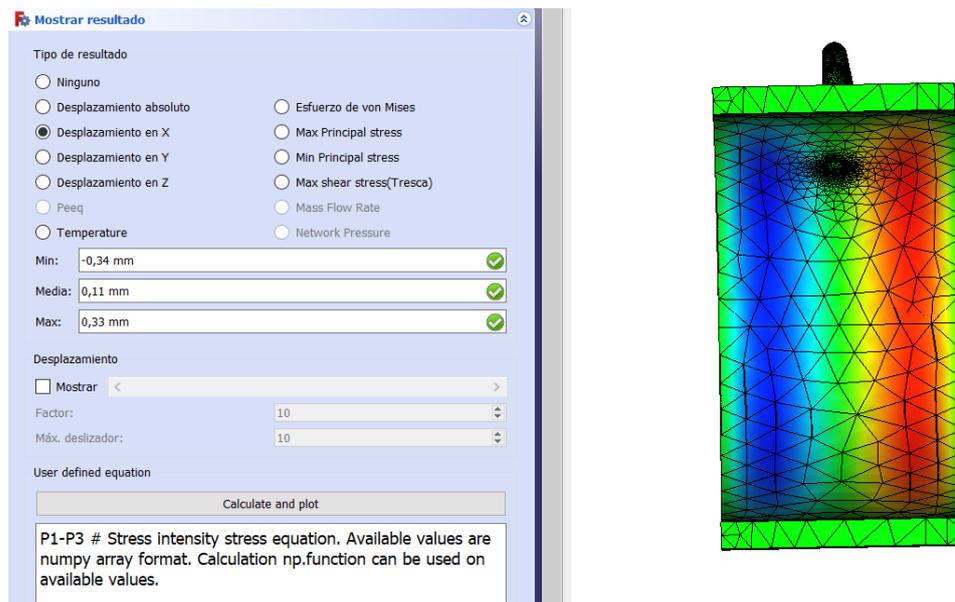
| Valor deformación en el eje X (mm) |       |
|------------------------------------|-------|
| Mínimo                             | -0,34 |
| Medio                              | 0,11  |
| Máximo                             | 0,33  |

**Tabla 5.14:** Deformación en el eje X para una carga del quemador del 50 %



**Figura 5.26:** Esfuerzo de compresión en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

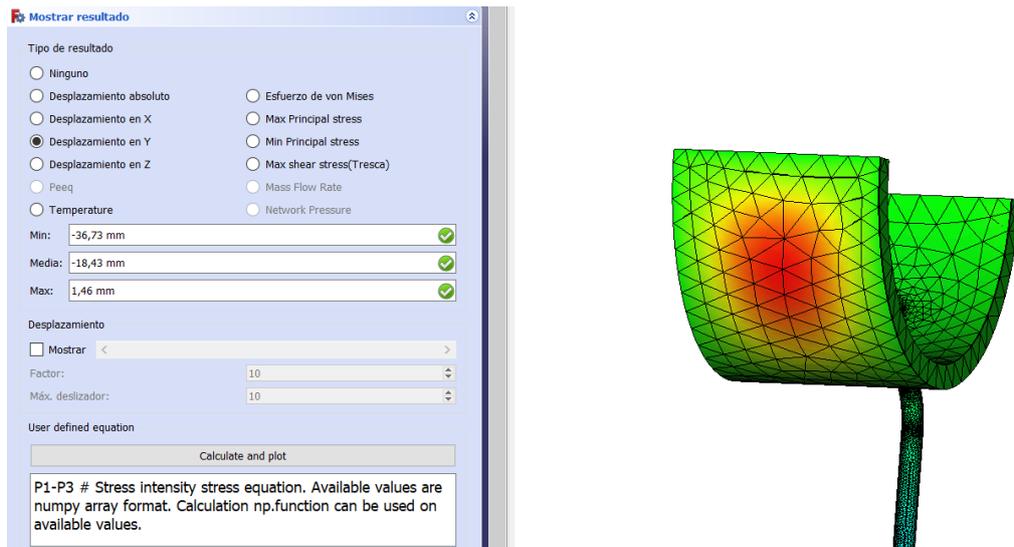


**Figura 5.27:** Deformación en el eje X del generador

Fuente: Elaboración propia

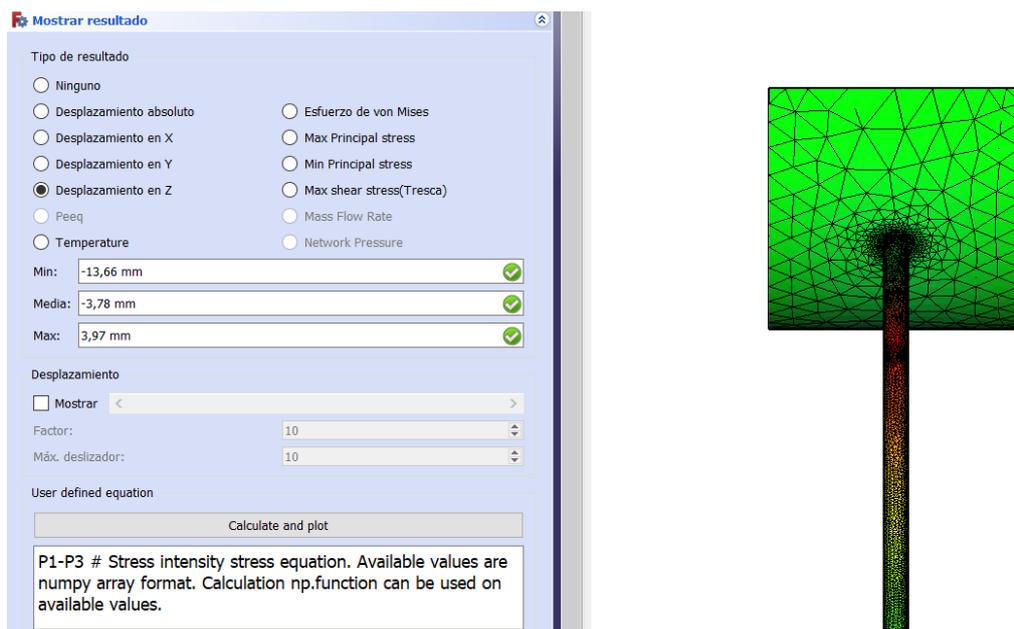
| Valor deformación en el eje Y (mm) |        |
|------------------------------------|--------|
| Mínimo                             | -36,73 |
| Medio                              | -18,43 |
| Máximo                             | 1,46   |

**Tabla 5.15:** Deformación en el eje Y para una carga del quemador del 50 %



**Figura 5.28:** Deformación en el eje Y del generador

Fuente: Elaboración propia



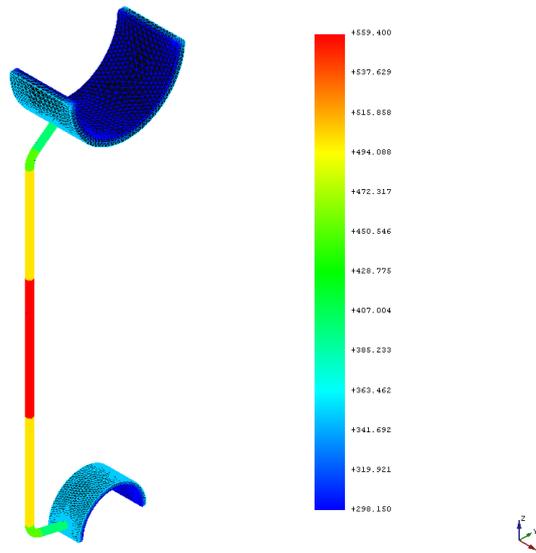
**Figura 5.29:** Deformación en el eje Z del generador

Fuente: Elaboración propia

**Valor deformación en el eje Z (mm)**

|        |        |
|--------|--------|
| Mínimo | -13,66 |
| Medio  | -3,78  |
| Máximo | 3,97   |

**Tabla 5.16:** Deformación en el eje Z para una carga del quemador del 50 %



**Figura 5.30:** Presentación VTK de la propagación de la temperatura (K) en el generador

Fuente: Elaboración propia

| Escala tensión |            |
|----------------|------------|
| Mínimo         | 942,34 Pa  |
| Medio          | 107,33 MPa |
| Máximo         | 412,69 MPa |

**Tabla 5.17:** Tensión de Von Misses del generador en la simulación

## 5.3 Banco de tubos frontal con una carga del quemador del 25 %

Siguiendo con el estudio en la fase de encendido del generador de vapor, se le aplica una carga a la llama del quemador de un 25 %, con esta carga sufrirá menos esfuerzos termomecánicos que con las anteriores, así se comprobará las recomendaciones de los fabricantes en el encendido del generador.

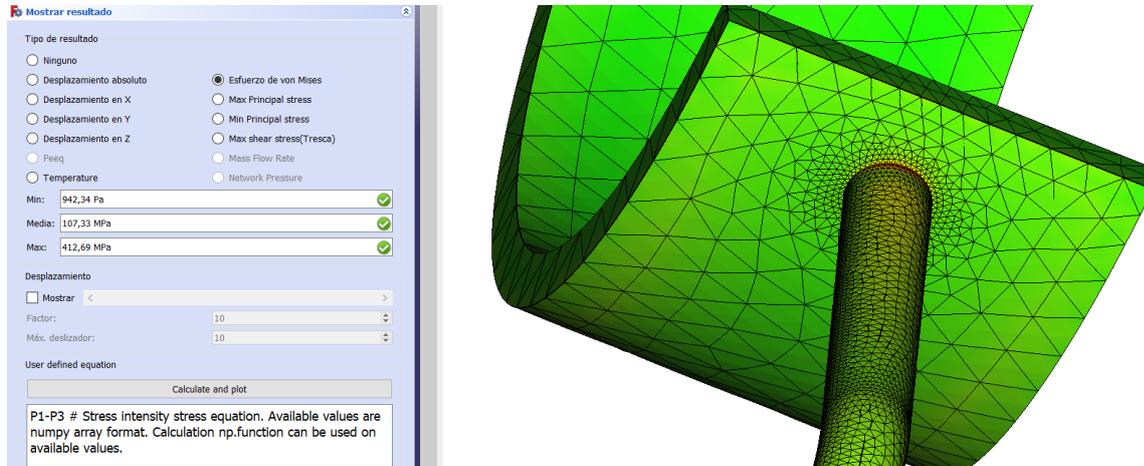
### 5.3.1 Aplicación de temperaturas en el generador de vapor

Temperaturas que se han aplicado en las secciones del cuerpo para la realización del estudio termomecánico (fig.5.30).

### 5.3.2 Esfuerzos Von Misses

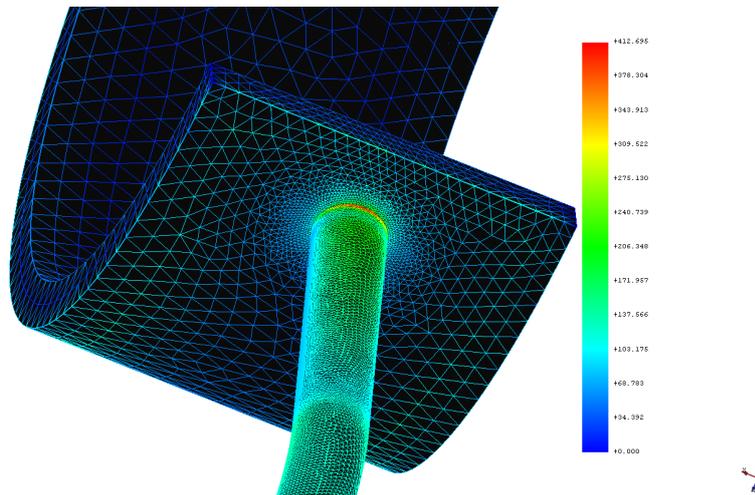
En las fig.5.31 y fig.5.32 se representa el esfuerzo sufrido por el generador. En la tab.5.17 se muestran los resultados obtenidos, de donde se concluye que:

- El resultado de la tensión máxima de Von Misses es de 412,69 MPa.
- El lugar de mayor tensión se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es menor que la tensión de rotura del material (940 MPa).
- Con lo que el material para esta carga del quemador aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.



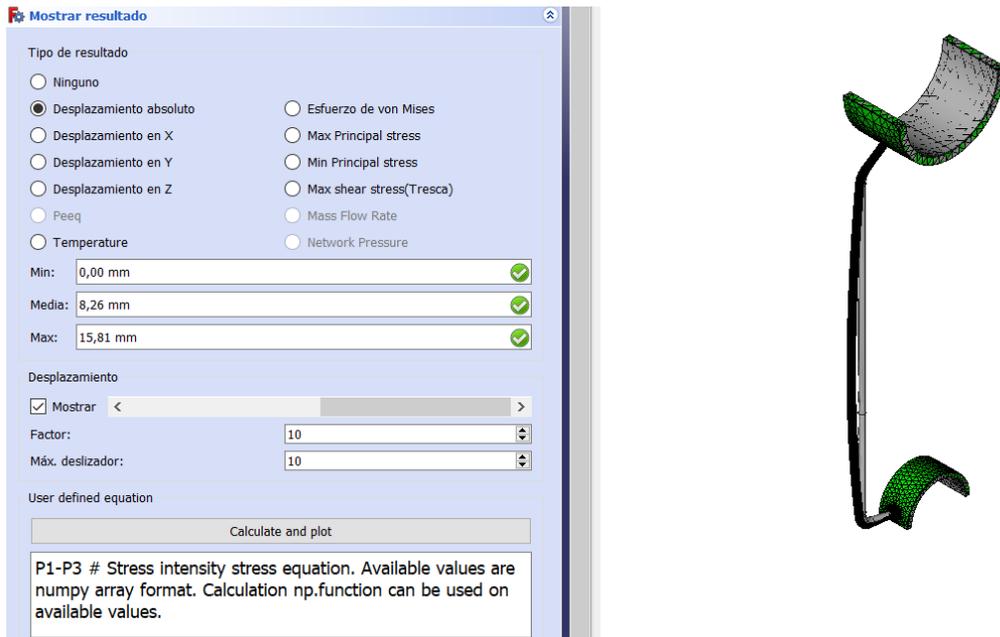
**Figura 5.31:** Esfuerzos Von Misses en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.32:** Presentación VTK del esfuerzo Von Misses (MPa) sufrido por el generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.33:** Desplazamiento del haz tubular del generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

| Valor desplazamiento absoluto (mm) |       |
|------------------------------------|-------|
| Mínimo                             | 0,00  |
| Medio                              | 8,26  |
| Máximo                             | 15,81 |

**Tabla 5.18:** Desplazamiento absoluto del generador en la simulación

De los datos obtenidos en la simulación, se concluye, que los fabricantes ante los esfuerzos que se encuentran sometidos los elementos estructural internos del generador de vapor, recomiendan un encendido progresivo para disminuir las tensiones, con lo que se consigue producir vapor sin riesgos para un correcto funcionamiento del generador.

### 5.3.3 Desplazamiento absoluto

La deformación debida al desplazamiento del cuerpo se muestra en la **fig.5.33**, de lo que se deduce, comparando el desplazamiento mostrado con las carga anteriores (**fig.5.5** y **fig.5.23**), que en este caso la deformación es bastante menor. En la **tab.6.18** se muestran los valores obtenidos.

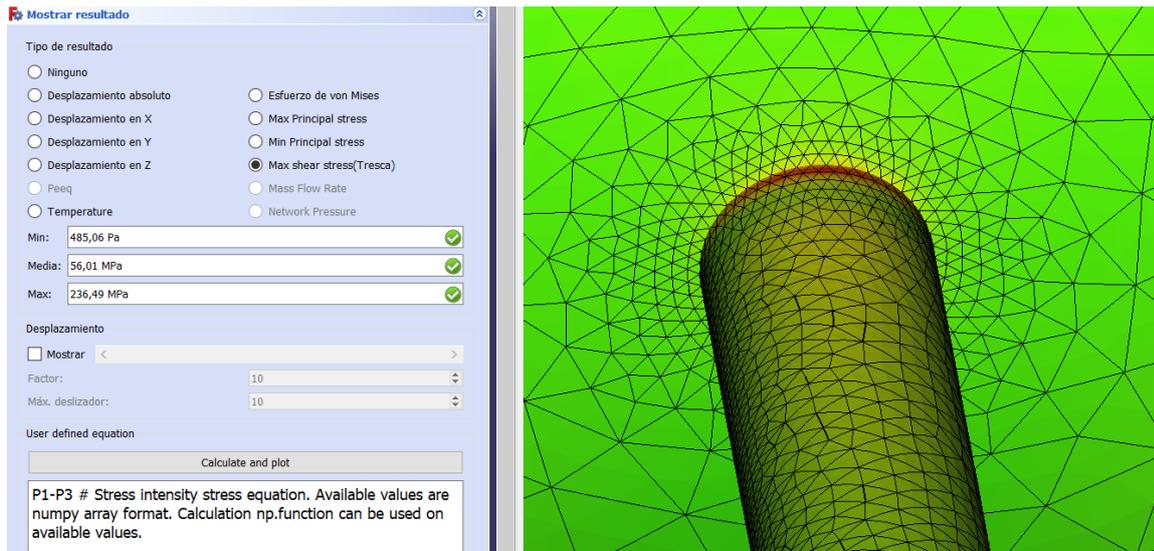
### 5.3.4 Máx. Shear Stress (esfuerzos cortantes)

La zona de máximo esfuerzo se localiza en la unión del haz tubular y colectores (**fig.5.34**).

De los resultados obtenidos en la simulación (**tab.5.19**), de donde se destaca:

| Valor Max Shear Stress (esfuerzos cortantes) |            |
|--|------------|
| Mínimo                                       | 485,06 Pa  |
| Medio  | 56,01 MPa  |
| Máximo                                       | 236,49 MPa |

**Tabla 5.19:** Esfuerzos cortantes del generador en la simulación



**Figura 5.34:** Esfuerzos cortantes sufridos en el generador

Fuente: Elaboración propia

| Valor Max Principal Stress (Tracción) |             |
|---------------------------------------|-------------|
| Mínimo                                | -139,15 MPa |
| Medio                                 | 54,53 MPa   |
| Máximo                                | 241,73 MPa  |

**Tabla 5.20:** Tracción del generador en la simulación

- El resultado de la tensión máxima de los esfuerzos cortantes es de 236,49 MPa.
- El lugar de mayor tensión se produce en la unión entre el colector de vapor y la tubería.
- Esta tensión es menor que la resistencia a la cizalladura del material (520 MPa).
- Con lo que para esta carga el material sí aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le someterá en el interior del generador durante el proceso de calentamiento.

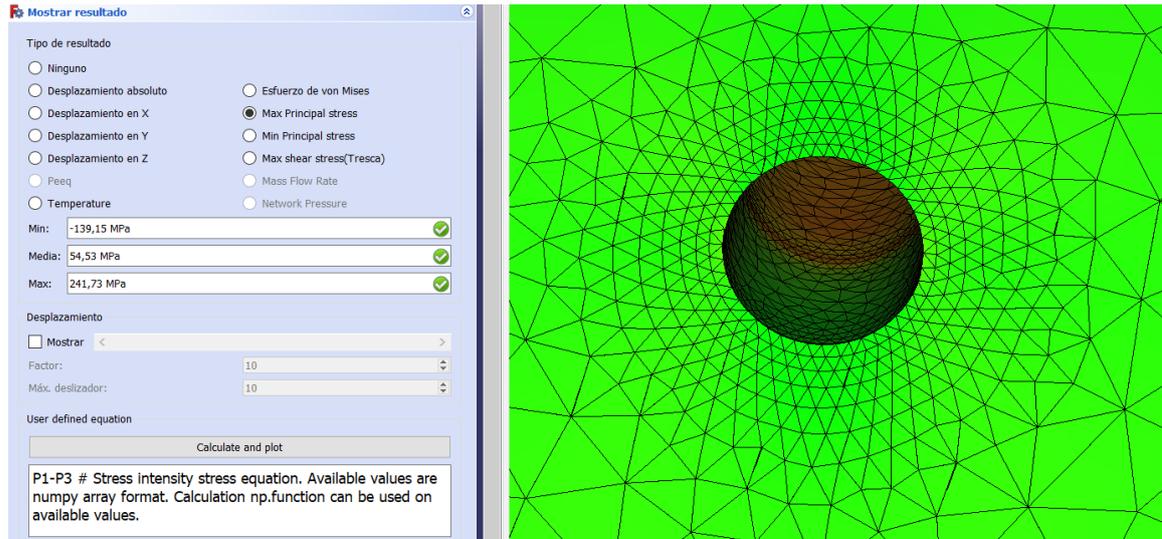
### 5.3.5 Máx. Principal Stress (Tracción)

En los resultados que aporta esta simulación (**fig.5.35**), se observa que el valor máximo de la tensión principal máxima se encuentra en la parte interna del haz tubular y la conexión del tubo con el colector. Los valores obtenidos se detallan en la **tab.5.20**. De los datos se destaca que:

- El resultado de la tracción máxima es de 241,73 MPa.
- El lugar de máxima tracción se produce en el interior del haz tubular.
- Esta tensión es menor que la resistencia a la tracción del material (750 MPa).
- Con lo que el material sí aporta garantías de soportar el esfuerzo termomecánico al que se le ha sometido en el interior del generador.

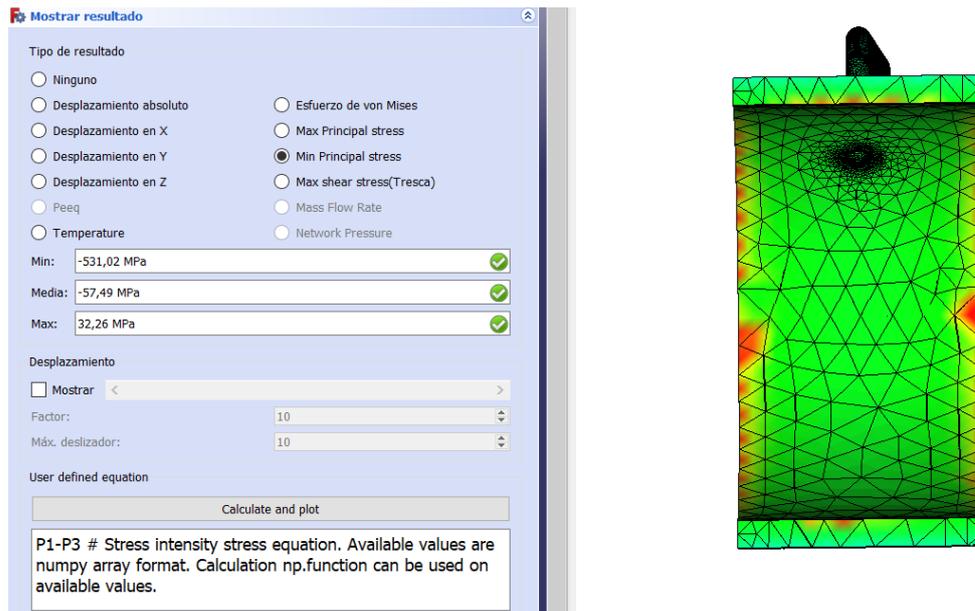
### 5.3.6 Mín. Principal Stress (Compresión)

En los resultados se observa que la zona que sufre la mayor influencia por el esfuerzo de compresión se sitúa en las caras internas de los colectores (**fig.5.36**). En la **tab.5.21** se representan los valores obtenidos.



**Figura 5.35:** Esfuerzo de tracción en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia



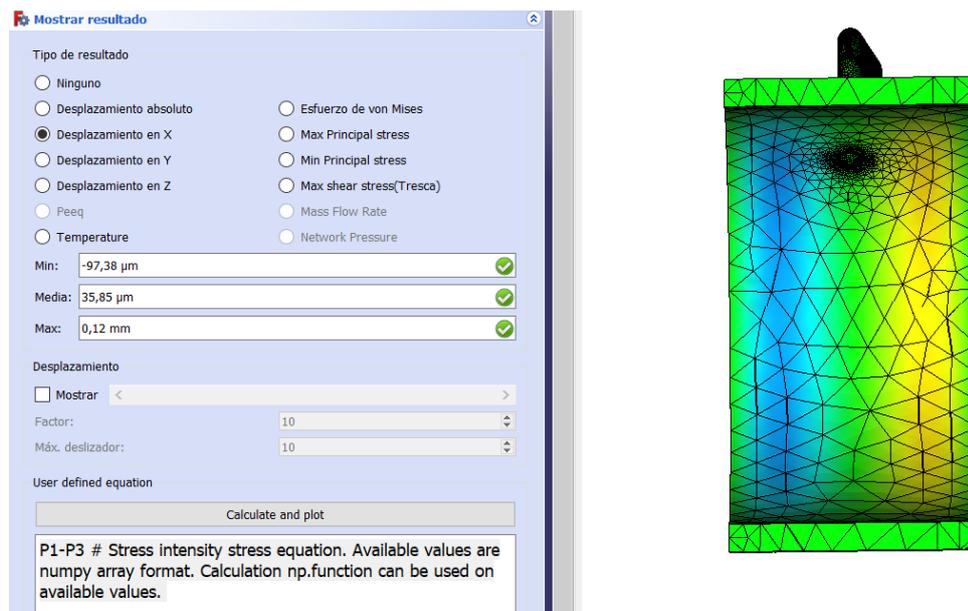
**Figura 5.36:** Esfuerzo de compresión en el generador de vapor

Fuente: Elaboración propia

**Valor Mín Principal Stress (Compresión)**

|        |             |
|--------|-------------|
| Mínimo | -531,02 MPa |
| Medio  | -57,49 MPa  |
| Máximo | 32,26 MPa   |

**Tabla 5.21:** Compresión del generador en la simulación



**Figura 5.37:** Deformación en el eje X del generador

Fuente: Elaboración propia

| Valor deformación en el eje X |                   |
|-------------------------------|-------------------|
| Mínimo                        | $-97,38 \mu m$    |
| Medio                         | $35,85 \mu m$     |
| Máximo                        | $0,12 \text{ mm}$ |

**Tabla 5.22:** Deformación en el eje X para una carga del quemador del 25 %

### 5.3.7 Deformación en la dirección de los ejes X, Y, Z

En la **tab.5.22** se recogen los valores de deformación máxima en el eje X, en la **fig.5.37** se aprecia que las zonas de mayor deformación se encuentran en la sección interna de los colectores, tanto la máxima como la mínima.

En cuanto al valor de deformación máxima que se obtiene en el eje Y (**fig.5.38**), se observa que la sección de mayor deformación se ubica en la sección central-interna de los colectores. En la **tab.5.23** se exponen los valores de deformación obtenidos.

Por último, el valor máximo de deformación que se obtiene en el eje Z (**fig.5.39**), en ella se visualiza que esta deformación se presenta en la región curva del haz tubular del generador de vapor. En la **tab.5.24** se detallan los valores obtenidos.

En los gráficos **fig.5.40**, **5.41** y **5.42**, se realiza un análisis de la tensión de Von Misses, esfuerzos cortantes y tracción que se produce a las distintas cargas del generador. La línea roja representa el máximo esfuerzo que puede soportar el material en cada esfuerzo. Con ellos se comprueba que, para el encendido en frío del generador de vapor, las únicas tensiones admisibles se registran con una carga del quemador de un 25 %.

| Valor deformación en el eje Y (mm) |          |
|------------------------------------|----------|
| Mínimo                             | $-15,66$ |
| Medio                              | $-7,74$  |
| Máximo                             | $0,30$   |

**Tabla 5.23:** Deformación en el eje Y para una carga del quemador del 25 %

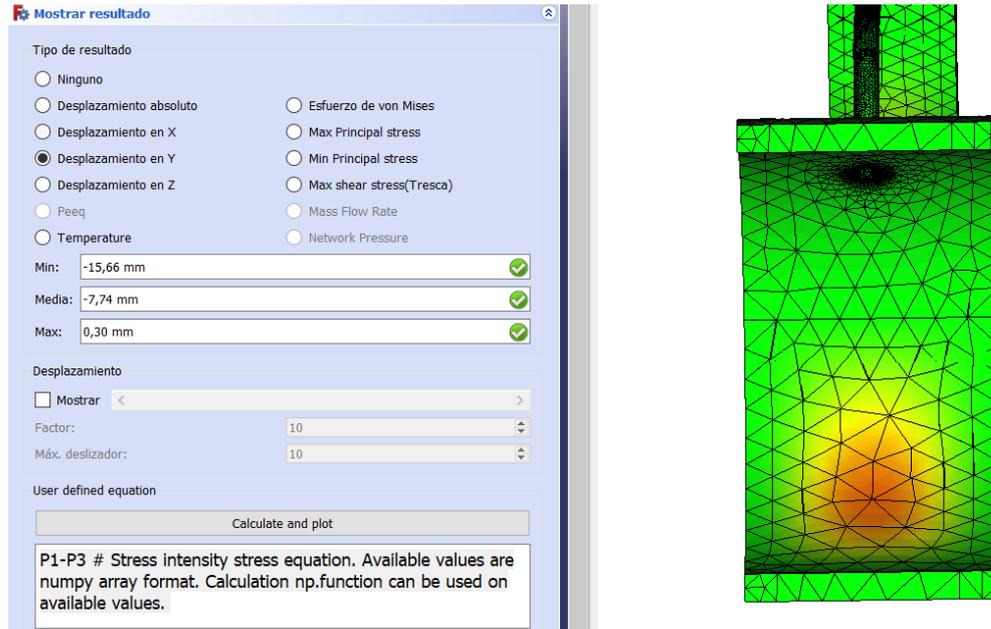


Figura 5.38: Deformación en el eje Y del generador

Fuente: Elaboración propia

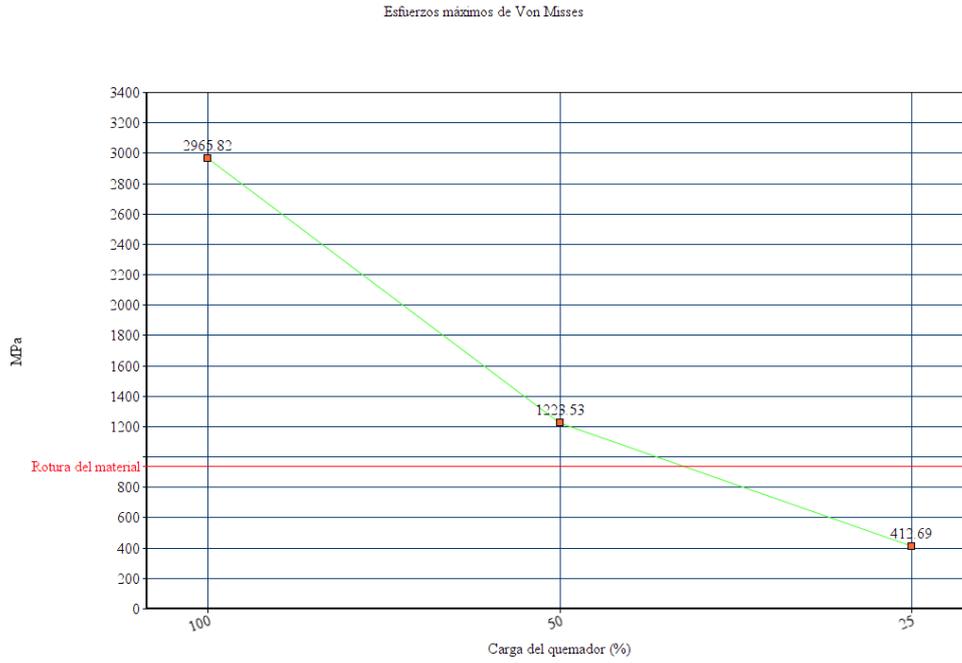


Figura 5.39: Deformación en el eje Z del generador

Fuente: Elaboración propia

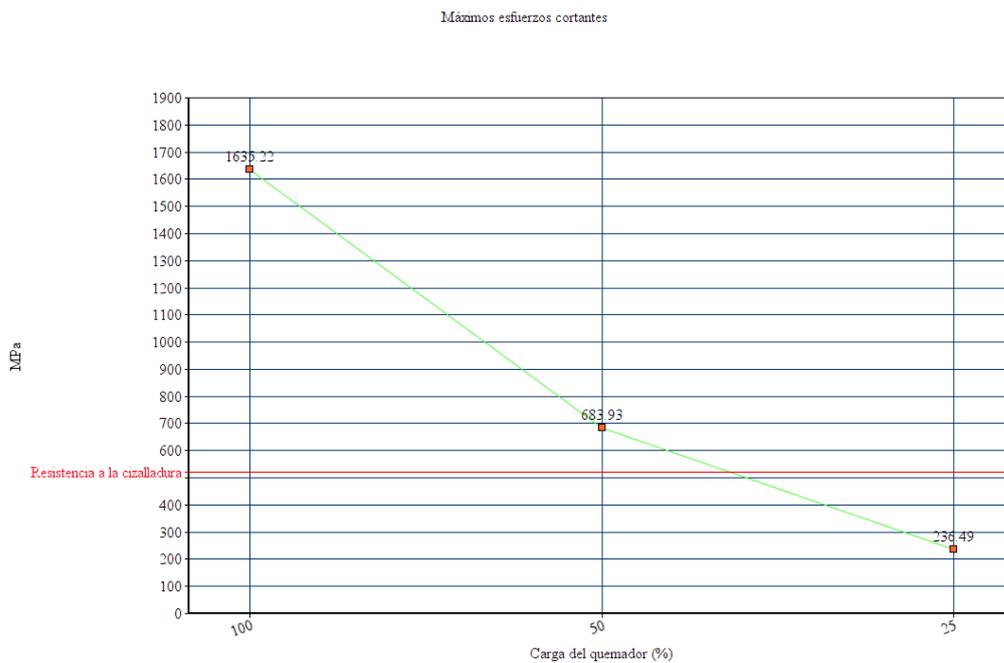
| Valor deformación en el eje Z (mm) |       |
|------------------------------------|-------|
| Mínimo                             | -5,76 |
| Medio                              | -1,39 |
| Máximo                             | 2,11  |

Tabla 5.24: Deformación en el eje Z para una carga del quemador del 25 %



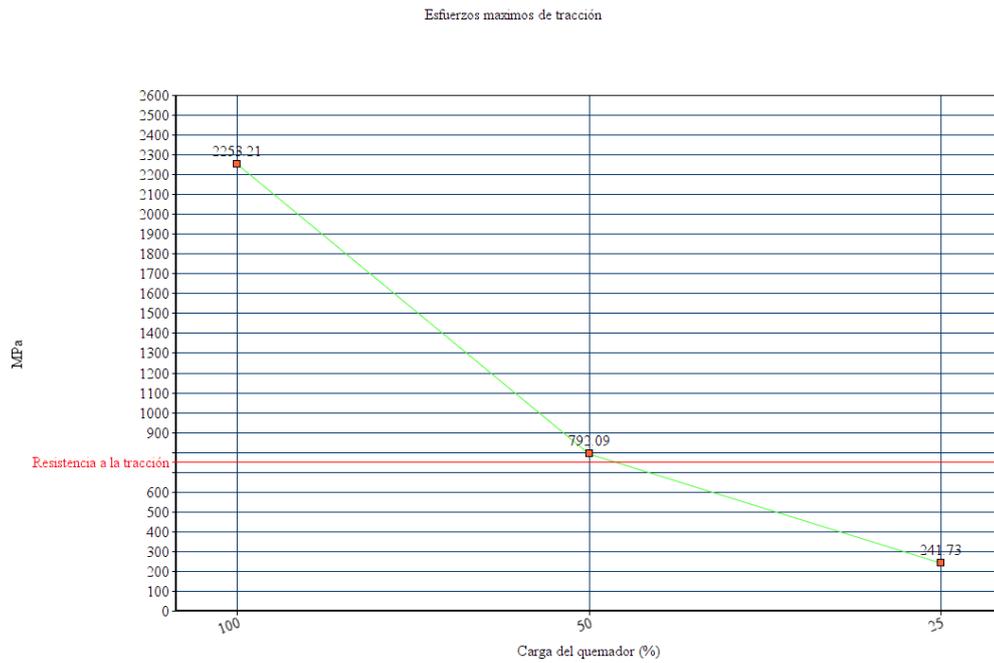
**Figura 5.40:** Gráfico de máximos esfuerzos Von Mises del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.41:** Gráfico de máximos esfuerzos cortantes del generador

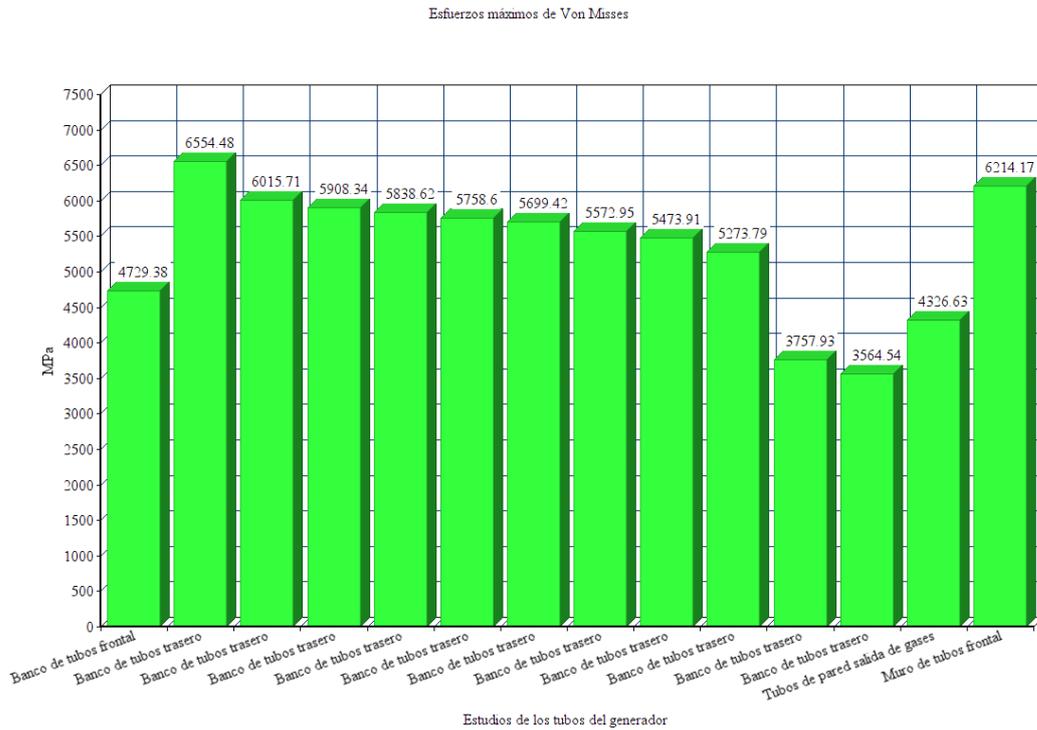
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.42:** Gráfico de máximos esfuerzos de tracción del generador

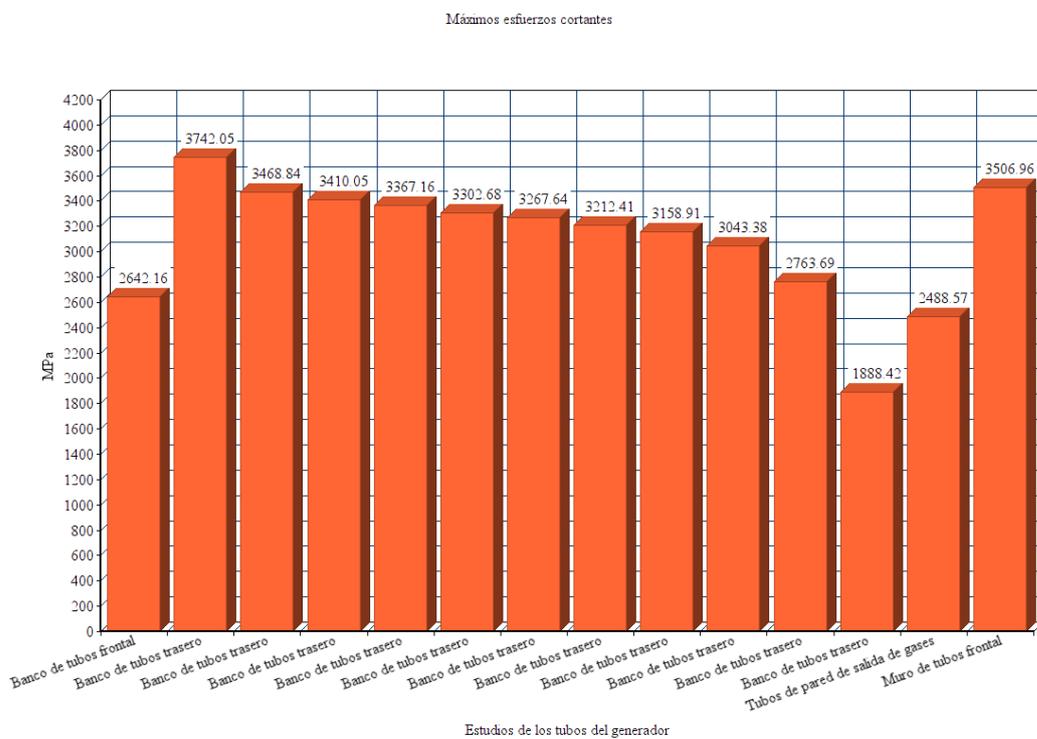
Fuente: Elaboración propia

Se realizó el estudio con una carga del quemador del 100 % en el banco de tubos frontal restante, así como 12 más del banco de tubos trasero, también se hicieron los estudios de los tubos de pared de salida de los gases y del muro de tubos frontal del generador. Estos estudios se realizaron con uno de los aceros proporcionado por FreeCAD y se le aportó un flujo de calor crítico. No se han introducido en los resultados del trabajo por la cantidad a analizar. Para su visualización consultar **anexos B, C, D, E**. Los valores máximos de esfuerzos Von Mises, cortantes y tracción, se recogen en las **fig.5.43, 5.44 y 5.45**. De ellas se puede interpretar que los esfuerzos disminuyen cuanto más alejados se encuentran los haces tubulares estudiados de la llama del quemador.



**Figura 5.43:** Esfuerzos máximos de Von Mises

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.44:** Máximos esfuerzos cortantes

Fuente: Elaboración propia

Máximos esfuerzos de tracción

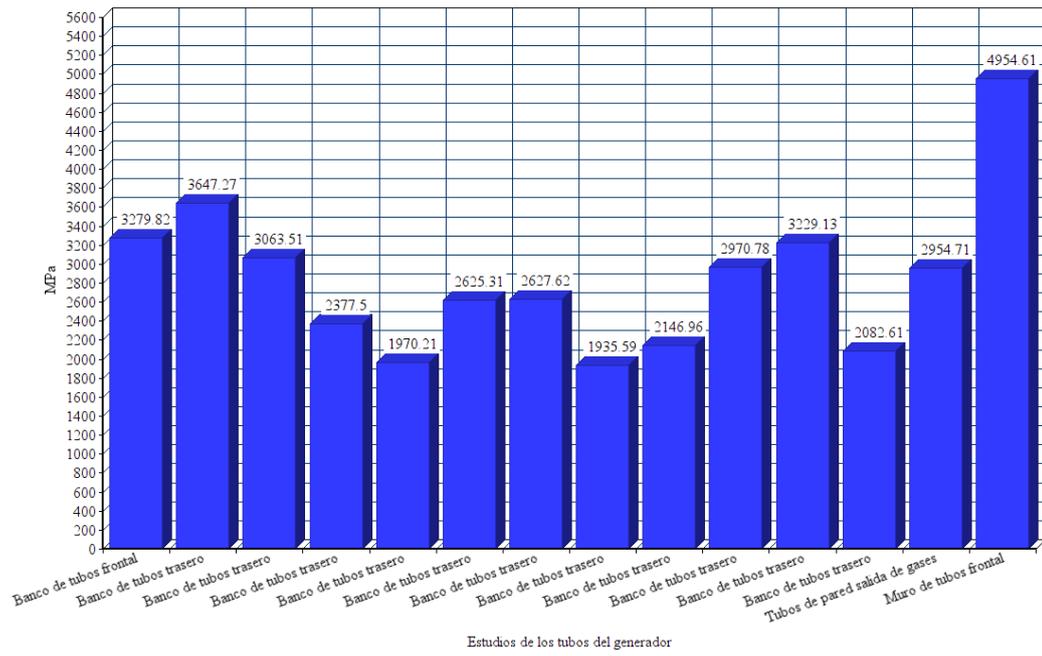


Figura 5.45: Máximos esfuerzos de tracción

Fuente: Elaboración propia



## 6 Conclusiones

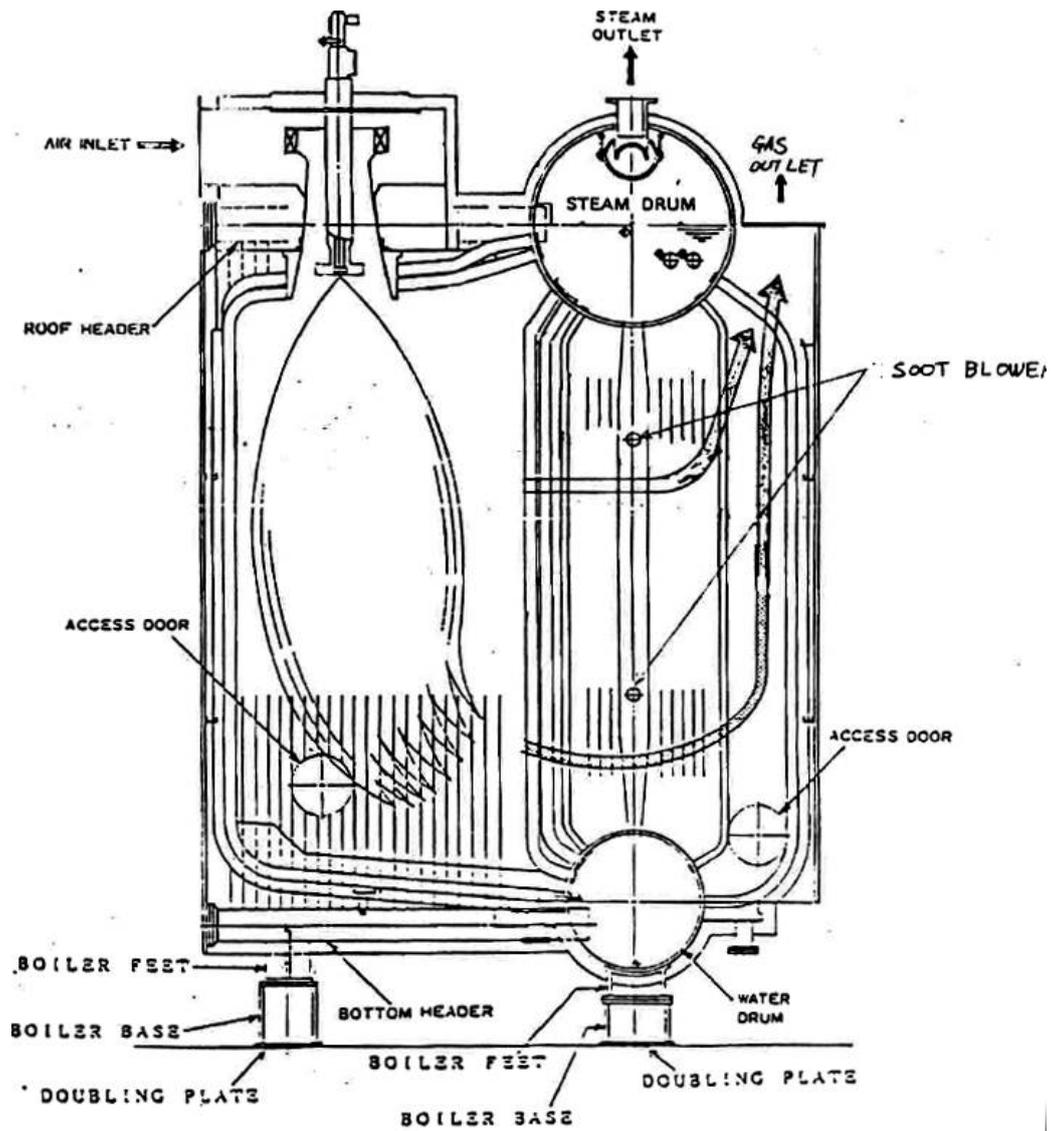
1. En el software libre FreeCAD, se puede realizar desde cero, el diseño de un generador de vapor real en 3D. El módulo FEM (Módulo de Elementos Finitos), proporciona al usuario herramientas para realizar un análisis termomecánico en el cuerpo diseñado.
2. No se pudo realizar el estudio termomecánico de todos los elementos estructurales internos juntos, bien por las limitaciones del software que está en fase de desarrollo o por la capacidad del ordenador. El análisis termomecánico se realizó en un haz tubular del banco de tubos frontal, por ser el más próximo a la llama del quemador y a una pequeña sección de los colectores.
3. De acuerdo con los estudios realizados a cargas diferentes del quemador, se comprueba que en el banco de tubos frontal del generador, el arranque en frío se debe realizar con una carga del quemador de hasta un 25 %, evitando así fallos estructurales de los elementos internos del generador.
4. Según las propiedades mecánicas del material utilizado en el estudio, no existen garantías de soportar los esfuerzos a los que se vería sometido con unas cargas del quemador del 100 y 50 %.
5. La zona de mayor impacto de los esfuerzos (Von Misses, esfuerzos cortantes y tracción), se encuentra en la unión entre los haces tubulares y los colectores.
6. Se destaca la importancia de seguir las instrucciones de los fabricantes para disminuir las tensiones de los elementos mecánicos del generador de vapor realizando un encendido progresivo.



# Anexos



**A Planos constructivos y curvas del  
generador de vapor MITSUBIS-  
HI MAC-BS AUX. BOILER**



**2. DESIGN DATA FOR 1 BOILER**

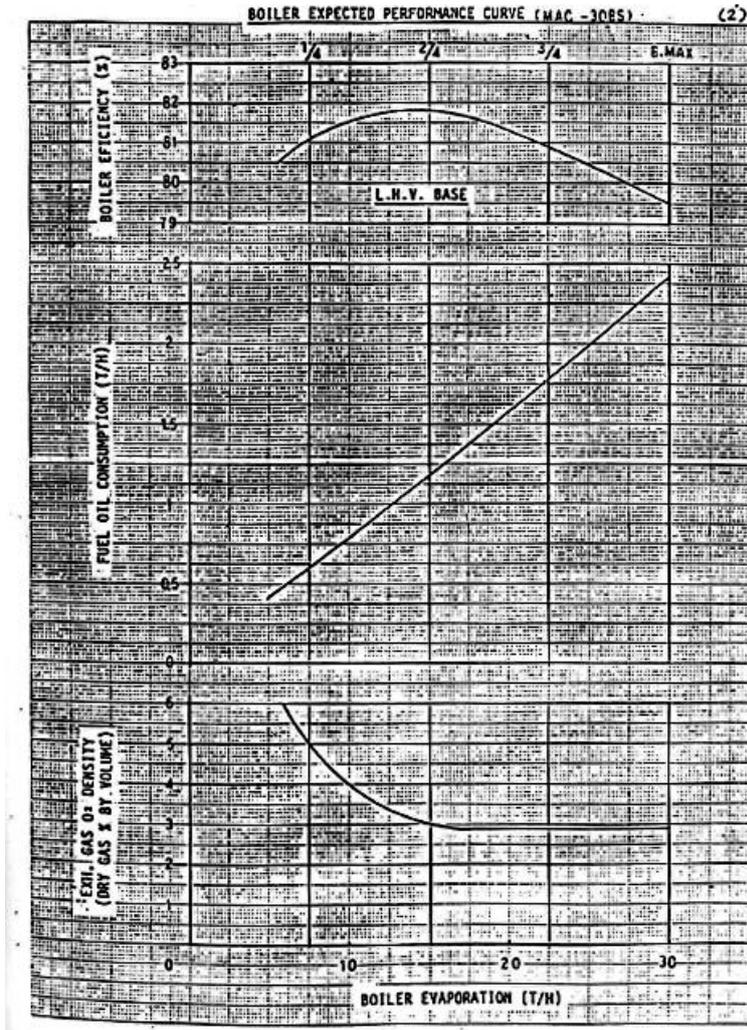
|   |                 |
|---|-----------------|
| <b>PRESSURE</b> <b>kg/cm<sup>2</sup>g</b>       |                 |
| Design  | 27              |
| Operation                                       | 25              |
| Hydrostatic Test                                | 40.5            |
| Safety Valve Setting                            | 27              |
| <b>TEMPERATURE</b> <b>°C</b>                    |                 |
| Steam (at Drum)                                 | 225 (Saturated) |
| Feed Water                                      | 60              |
| Air to Burner                                   | 38              |
| <b>EVAPORATION</b> <b>kg/h</b>                  |                 |
| Boiler Max 25 k MODE                            | 30,000          |
| <b>HEATING SURFACE</b> <b>m<sup>2</sup></b>     |                 |
|   | 436             |
| <b>FURNACE VOLUME</b> <b>m<sup>3</sup></b>      |                 |
|   | 20              |
| <b>BOILER WATER WEIGHT</b> <b>kg</b>            |                 |
| Total Cold Water to Fill the Unit Completely    | 13,110          |
| Cold Water to Fill Boiler to Normal Water Level | 10,660          |
| Water at Operation                              | 9,177           |
| <b>BOILER WEIGHT</b> <b>kg</b>                  |                 |
| Boiler Dry (with Burner & Soot Blower)          | 38,000          |
| Total Operation                                 | 47,177          |

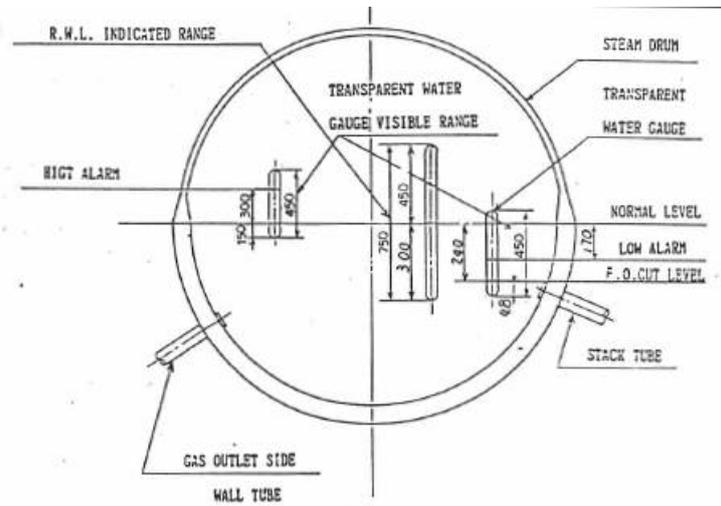
**THE DATA**

| <u>Location</u>               | <u>No. Tubes</u> | <u>O.D. mm</u> | <u>Thickness mm</u> |
|-------------------------------|------------------|----------------|---------------------|
| Rear Bank Tubes               | 465              | 50.8           | 2.9                 |
| Front Water Wall Tubes        | 24               | 76.2           | 4.0                 |
| Rear Water Wall Tubes         | 24               | 76.2           | 4.0                 |
| Front Bank Tubes              | 30               | 76.2           | 4.0                 |
| Floor, Side, Roof, Wall Tubes | 23               | 76.2           | 4.5                 |
| Rear Bank Front Wall Tubes    | 15               | 76.2           | 4.0                 |
| Rear Bank Rear Wall Tubes     | 15               | 76.2           | 4.0                 |
| Gas Outlet Water Wall Tubes   | 15               | 76.2           | 4.5                 |

BOILER EXPECTED PERFORMANCE DATA ( MAC -3085 )

| L O A D                              |                    |         | 1/4    | 2/4    | 3/4    | 8. MAX |
|--------------------------------------|--------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| EVAPORATION                          | kg/h               |         | 7.500  | 15.000 | 22.500 | 30.000 |
| DRUM PRESSURE                        | kg/cm <sup>2</sup> |         | 25     | 25     | 25     | 25     |
| FEED WATER TEMP.                     | °C                 |         | 60     | 60     | 60     | 60     |
| SATURATED STEAM TEMP.                | °C                 |         | 225.0  | 225.0  | 225.0  | 225.0  |
| BOILER EFFICIENCY<br>( L.H.V. BASE ) | %                  |         | 81.1   | 81.8   | 80.9   | 79.5   |
| CALORIFIC<br>VALUE                   | HRV                | Kcal/kg | 10.280 | 10.280 | 10.280 | 10.280 |
|                                      | LRV                | Kcal/kg | 9.500  | 9.500  | 9.500  | 9.500  |
| FUEL OIL CONSUMPTION                 | kg/h               |         | 593    | 1.175  | 1.782  | 2.418  |
| EXCESS AIR RATE                      | %                  |         | 31     | 16     | 15     | 15     |
| O <sub>2</sub> RATE                  | %                  |         | 5.0    | 3.0    | 2.9    | 2.9    |
| COMBUSTION AIR FLOW                  | kg/h               |         | 10.880 | 19.090 | 28.690 | 38.930 |
| FLUE GAS FLOW                        | kg/h               |         | 11.470 | 20.260 | 30.480 | 41.350 |
| AMBIENT AIR TEMP.                    | °C                 |         | 38     | 38     | 38     | 38     |





### CONSTRUCTION

The boiler is named MITSUBISHI MARINE WATER TUBE BOILER. The description given below is an outline of its construction. For its further details, you are referred to the reference drawings for the ship equipment.

#### 1. General construction

The boiler is of two-drum type construction with one steam drum and one water drum, and mainly consists of boiler proper, boiler casing, fuel firing equipment, mountings, fittings and other accessories.

The boiler structure is supported with a water drum and water wall lower headers as supporting bases. The whole boiler constructions is so designed as to be able to withstand the rolling, pitching and the shock of the ship. Careful consideration is also given to the movement by thermal expansion of the boiler.

Combustion gas flows through the boiler in a return flow path where necessary, manholes, peep hole are provided for easy access and inspection.

#### 2. Furnace

Closely spaced water wall tubes of 76.2 mm outside diameter are provided to the furnace side, rear, roof except burner opening and front wall in order to increase the heat absorption in the furnace and to form it strong enough to withstand vibration, etc.

At the top and bottom of the front and rear walls are provided water wall headers respectively. The water that entered the bottom headers rises through the wall tubes to the top headers. As it rises, it is heated to saturation temperature and begins evaporating and from the top headers this water-steam mixture is led to the steam drum.

One end of each top header is directly connected to the steam drum and one end of each bottom header is directly connected to the water drum.

The roof, side and bottom water walls of the furnace are formed with welded water wall tubes connecting the water drum to the steam drum. No headers are provided for them.

### 3. Boiler casing

The furnace of the boiler is made completely gas-tight by the adoption of welded water wall construction. The welded water wall construction is also adopted to the front and rear walls of the rear evaporating tube section where tubes are exposed to the combustion gas.

On the outer surface of the furnace water walls, insulation are provided.

Insulations are applied to the outer surface of the water walls and the outermost surface of the furnace is covered with galvanized steel casing except furnace roof and floor.

---

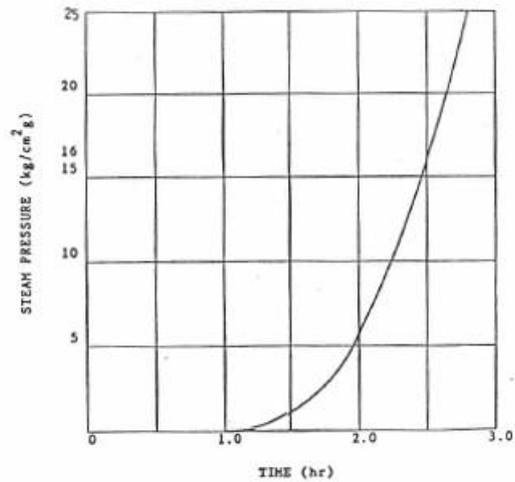
#### 4. Steam Drum

The steam drum and water drum are to be fabricated using boiler steel plate approved by applicable ship classification society. They are to be of all-welded construction, and welded joints are to be produced in accordance with the procedures approved by applicable ship classification society and then given the post-weld stress relieving.

In the steam drum, a multi-perforated baffle plate covering the entire steam evaporation surface is provided to prevent the generation of water-saturated steam. Also, in the steam compartment the steam separator is provided to completely remove the moisture. The water compartment is provided with the feedwater internal pipe, surface blow-off internal pipe, chemical feed internal pipe, and sampling pipe.

The baffle plate and steam separator in the steam compartment are of built-up type, permitting to be disassembled for bringing in and out of the drum by way of the manhole. Also, the steam drum, being used as a receiver for the exhaust-gas economizer while at sea, is equipped with the steam-water mixture inlet internal pipe.

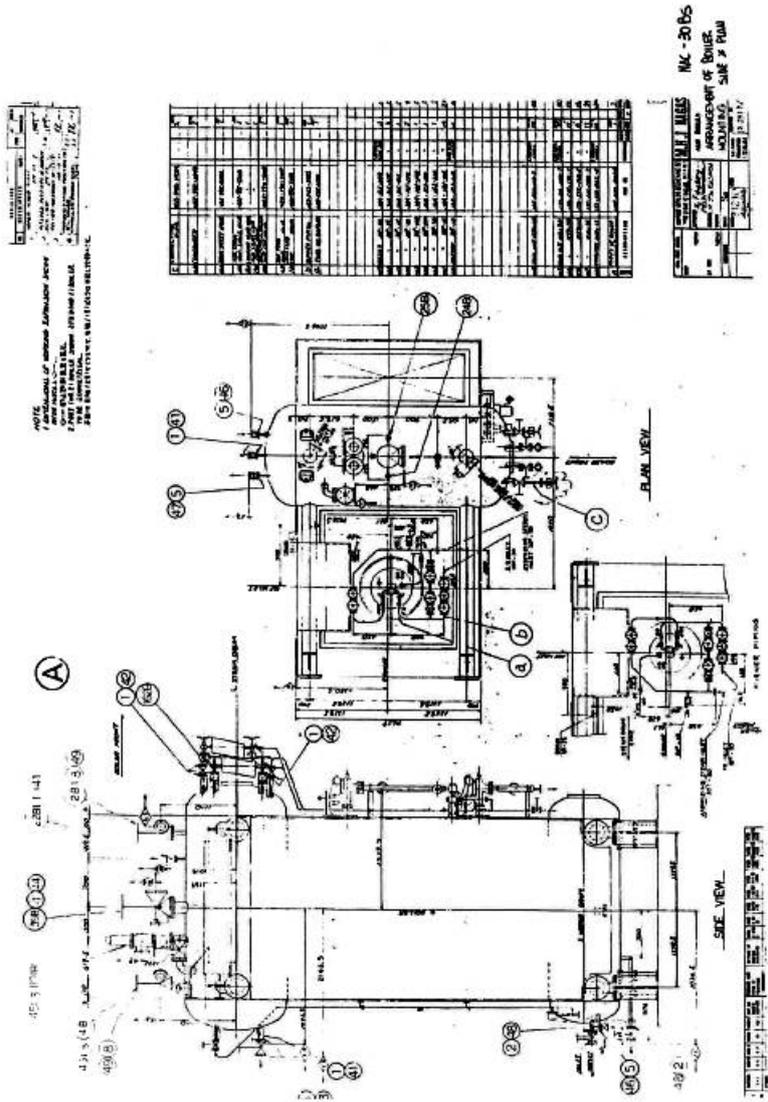
- (9) Check the water level gauge to see nothing is the matter with it by opening and closing its drain valve, and make sure of the drum water level again.
- (10) Drain and warm all steam supply lines to the ancillary equipment and devices. It is very important to discharge drain water from these lines and warm them up to near the operating temperature before loading the boiler.
- (11) When the drum pressure is raised to about 3 to 4  $\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$  below the normal operating pressure, check the safety valves with the easing gear. Care must be taken to open and close the valve quickly so as to prevent damaging the disc and the seat of the valve.



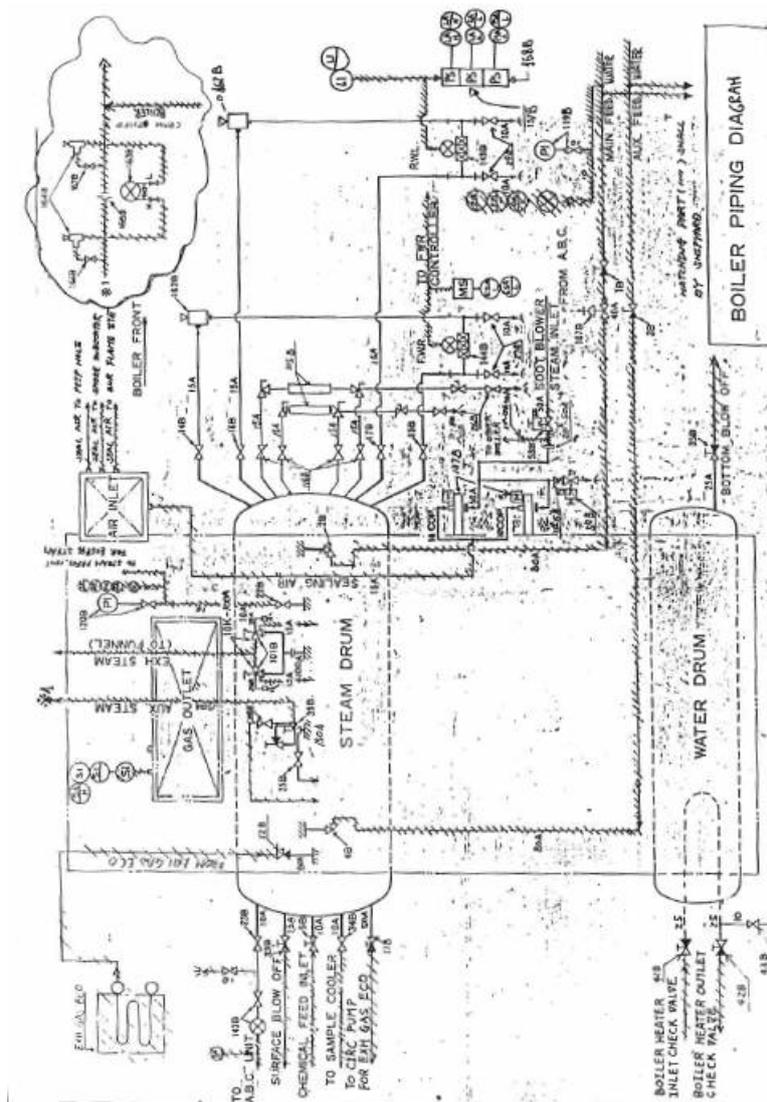
RSBA1-3

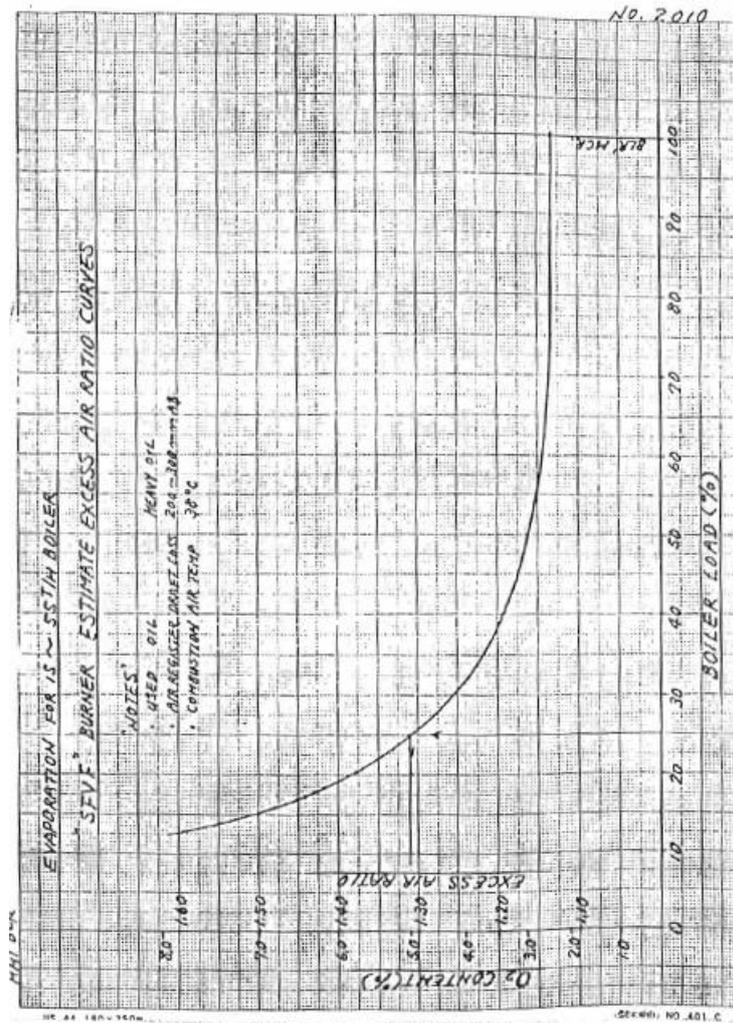
FIG. 2-1 RECOMMENDED PRESSURE RISE









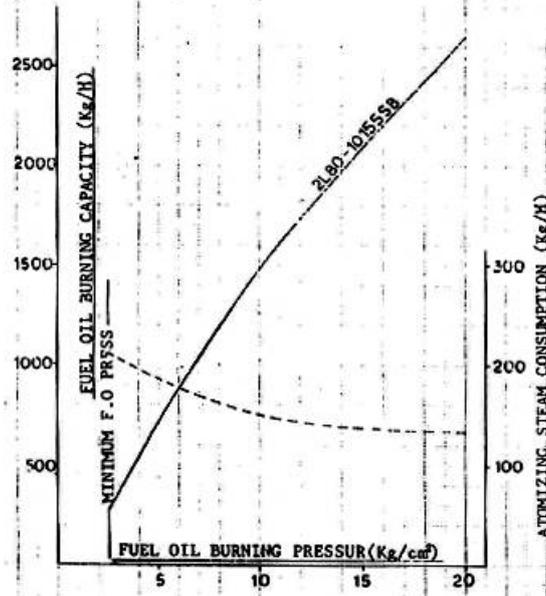




**CHARACTERISTIC CURVE OF "Y" JET TYPE  
STEAM AND AIR ATOMIZER**

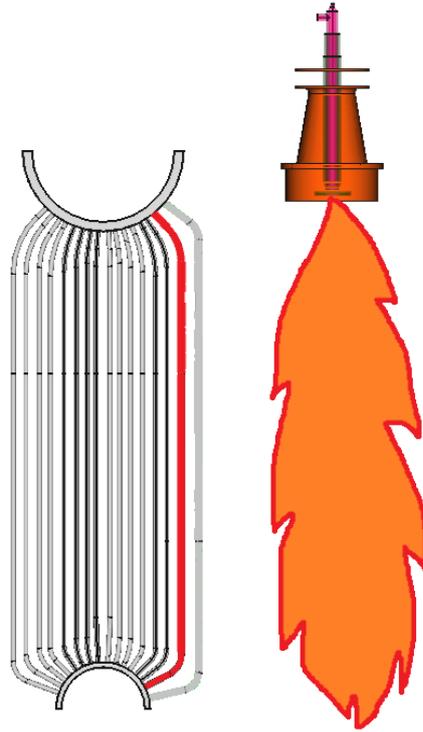
NOTES

- USE { USED OIL ; HEAVY OIL
- OIL VISCOSITY ; R.W NO.1 80SEC(18CST)
- ATOMIZING STEAM ; 5Kg/cm<sup>2</sup> CONSTANT
- USE { USED OIL ; diesel oil
- OIL VISCOSITY ; R.W NO.1 40SEC(5.7CST)
- ATOMIZING AIR ; 5Kg/cm<sup>2</sup> CONSTANT
- ATOMIZING AIR CONSUMPTION ; MAX : 3.8 m<sup>3</sup>/min
- USED ATOMIZER ; 2L80-101555B



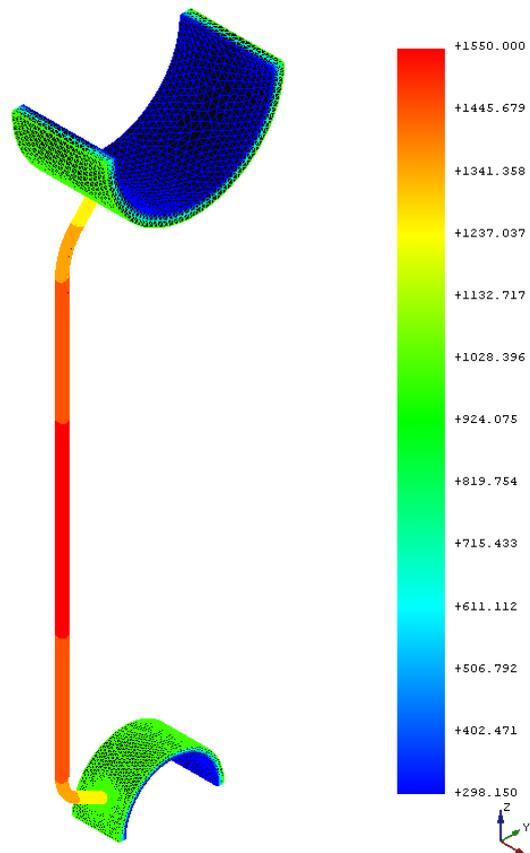


## **B Estudio termomecánico del generador de vapor (1)**



**Figura B.1:** Banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.2:** Temperaturas en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia

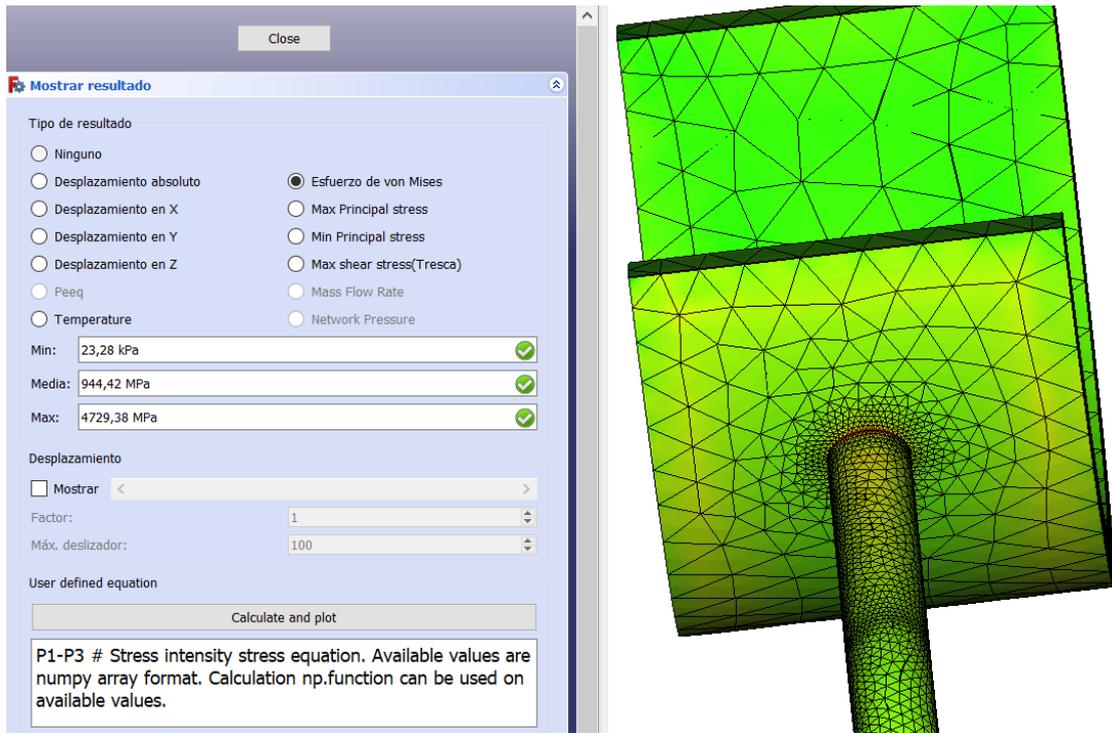


Figura B.3: Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia

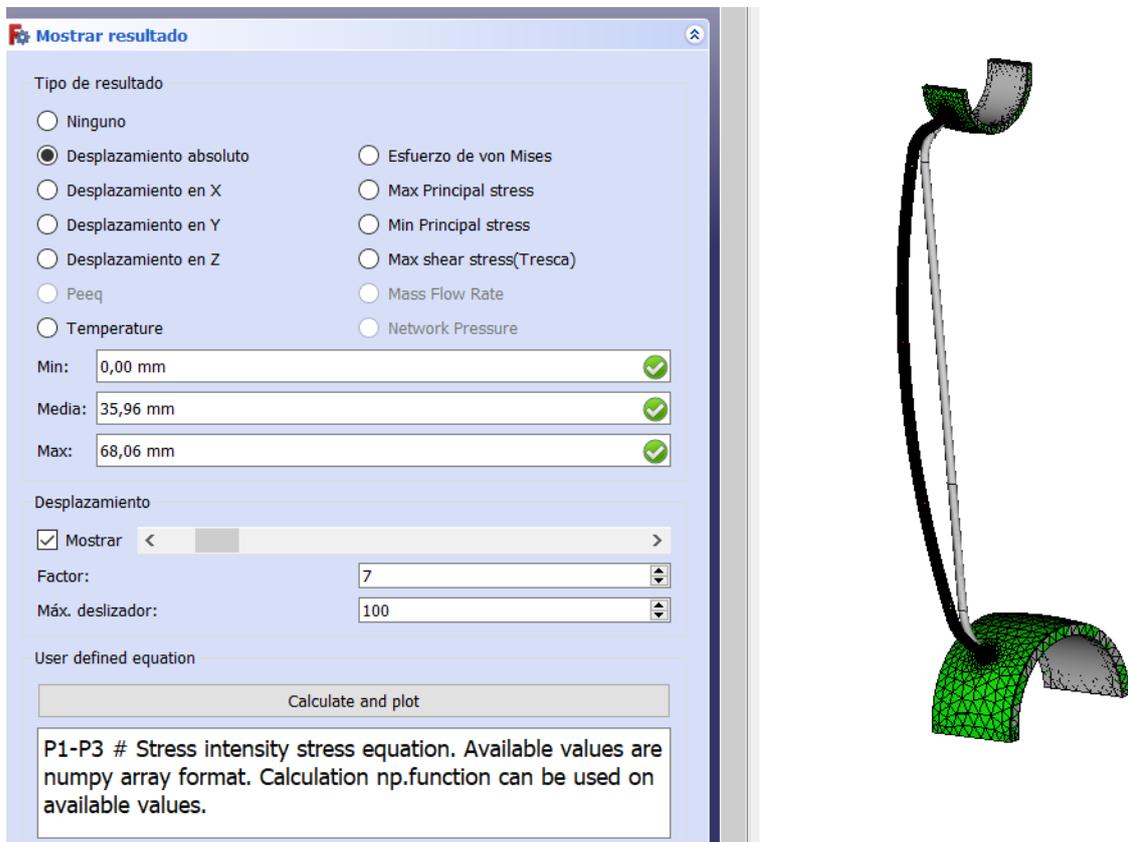


Figura B.4: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia

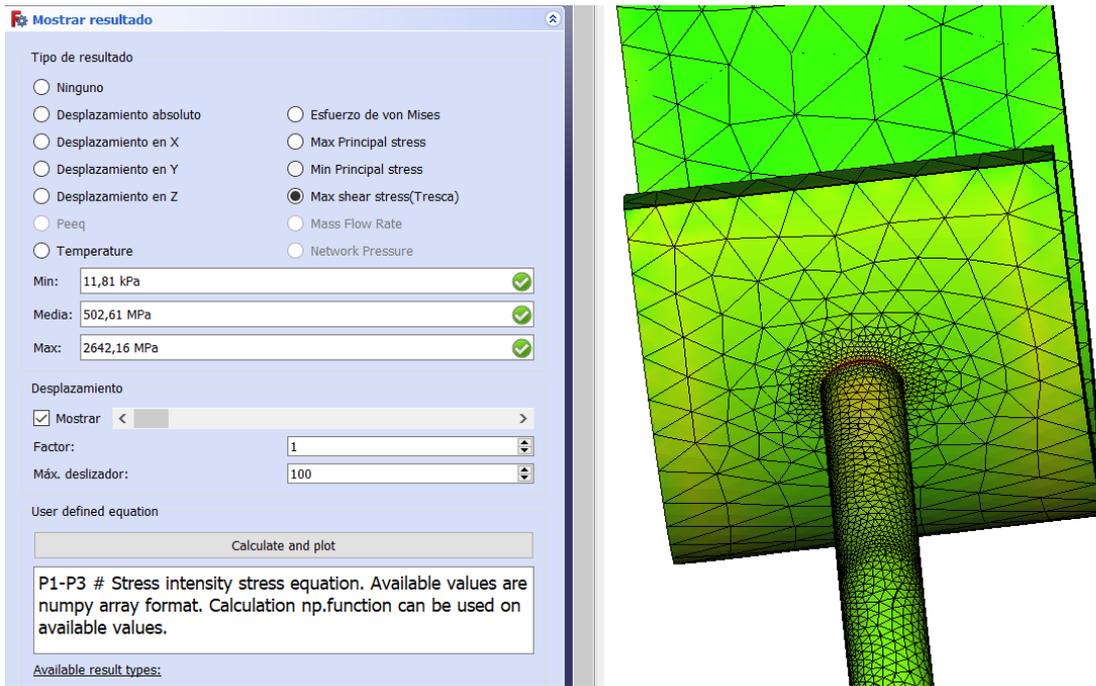


Figura B.5: Esfuerzos cortantes en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia

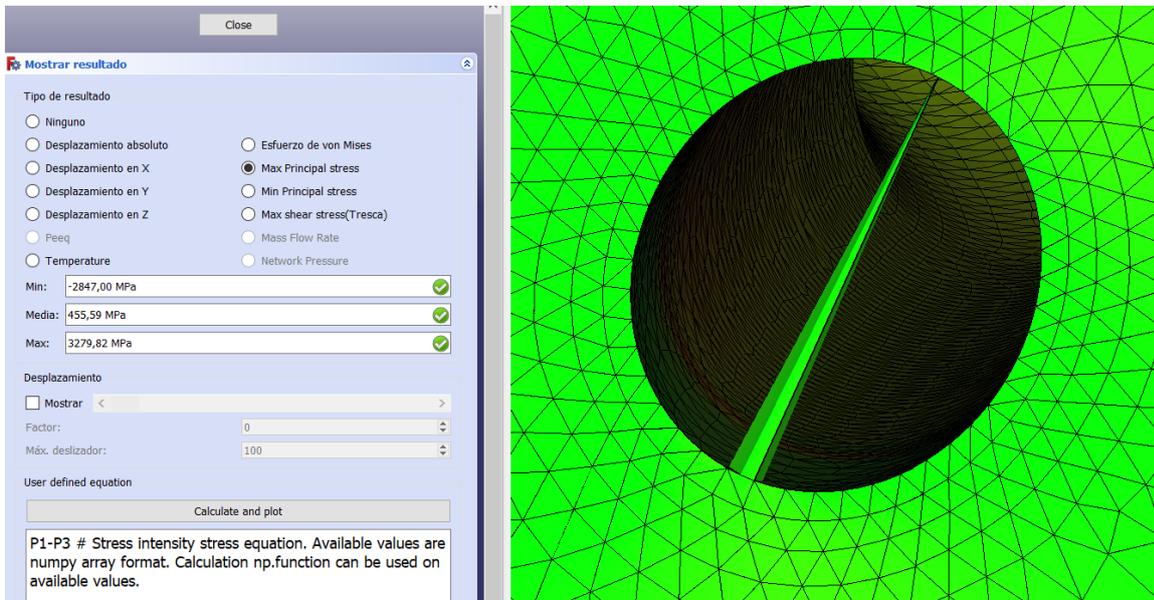
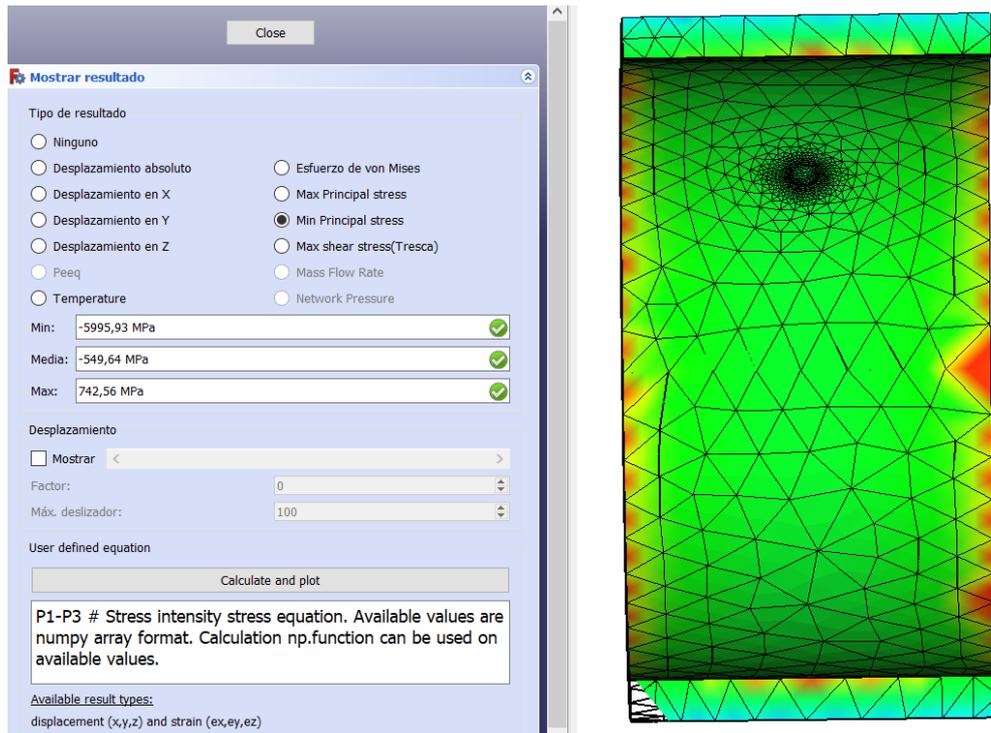


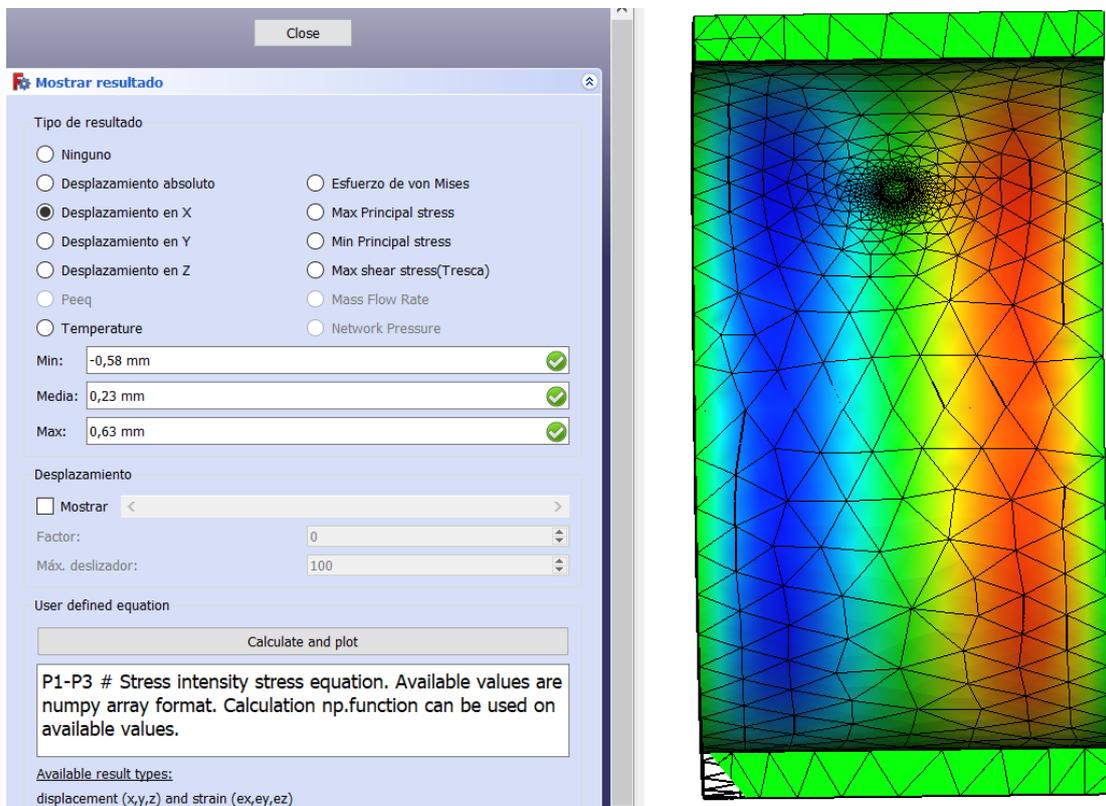
Figura B.6: Esfuerzo de tracción en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



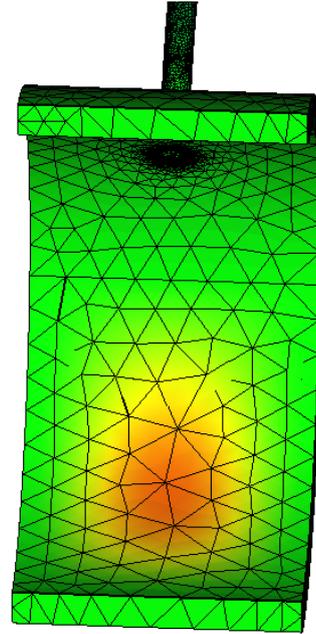
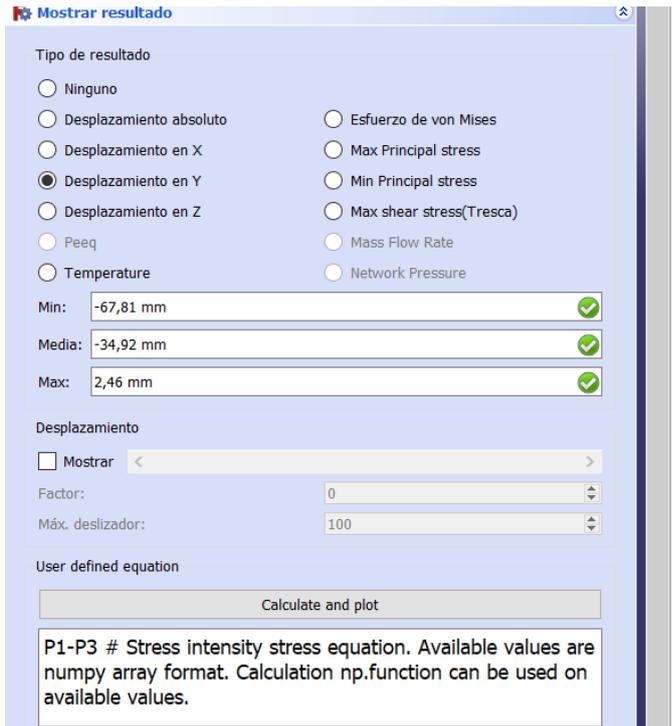
**Figura B.7:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



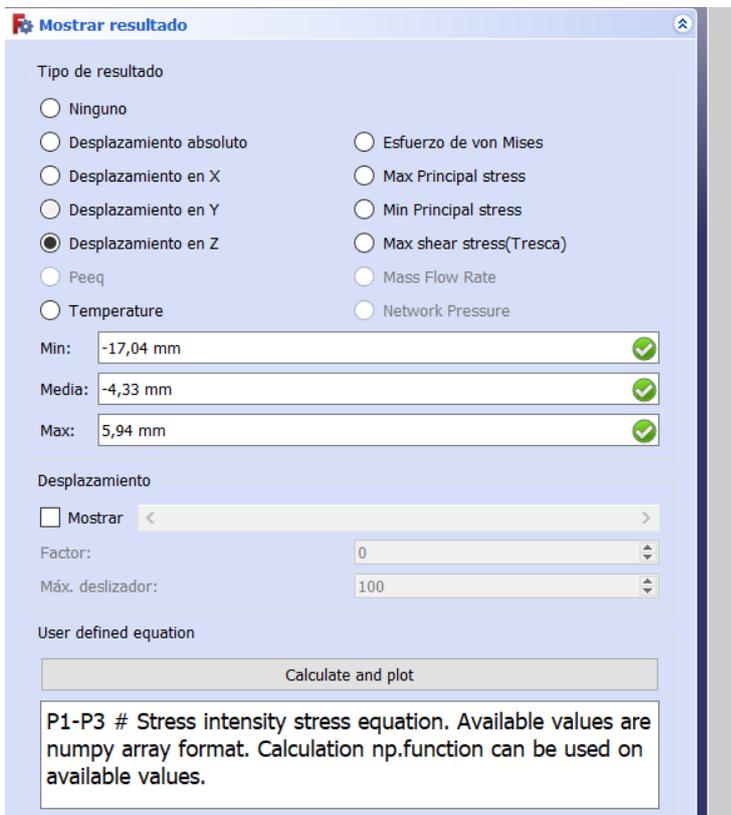
**Figura B.8:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



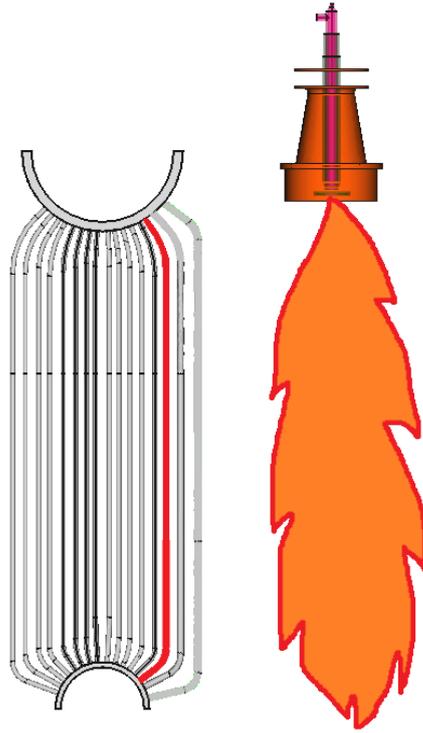
**Figura B.9:** Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



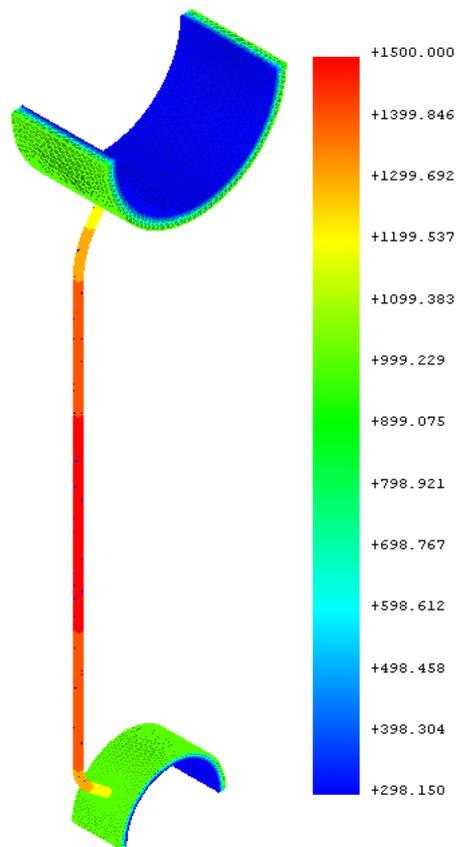
**Figura B.10:** Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



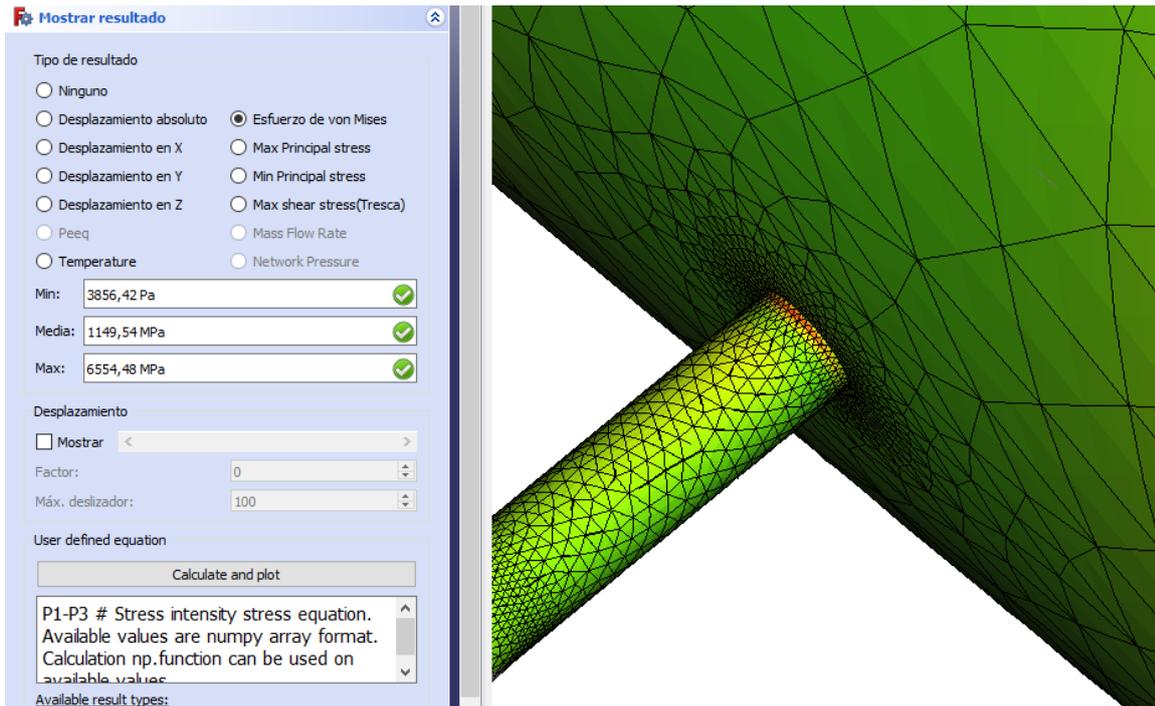
**Figura B.11:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



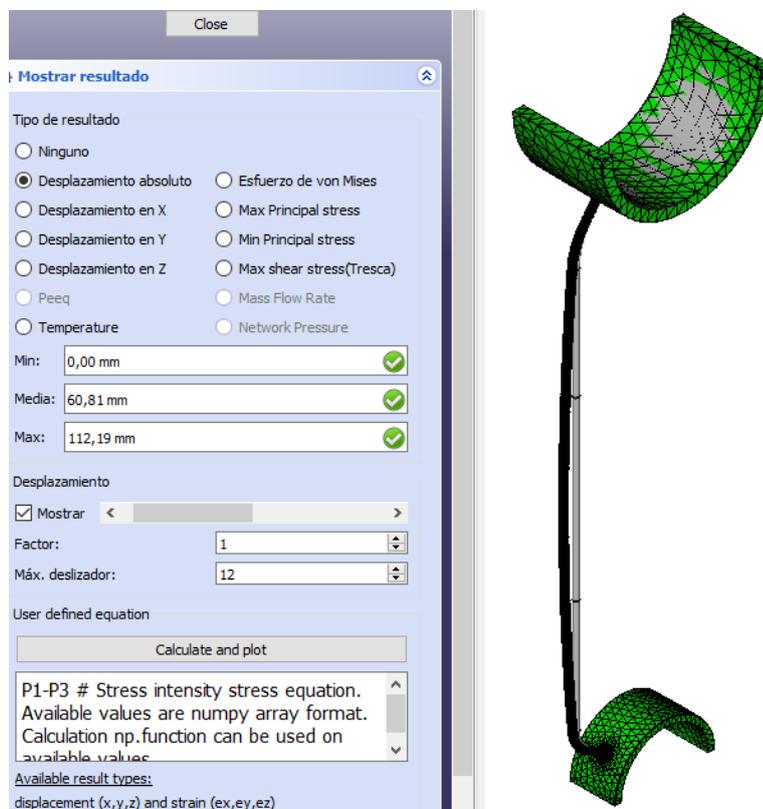
**Figura B.12:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



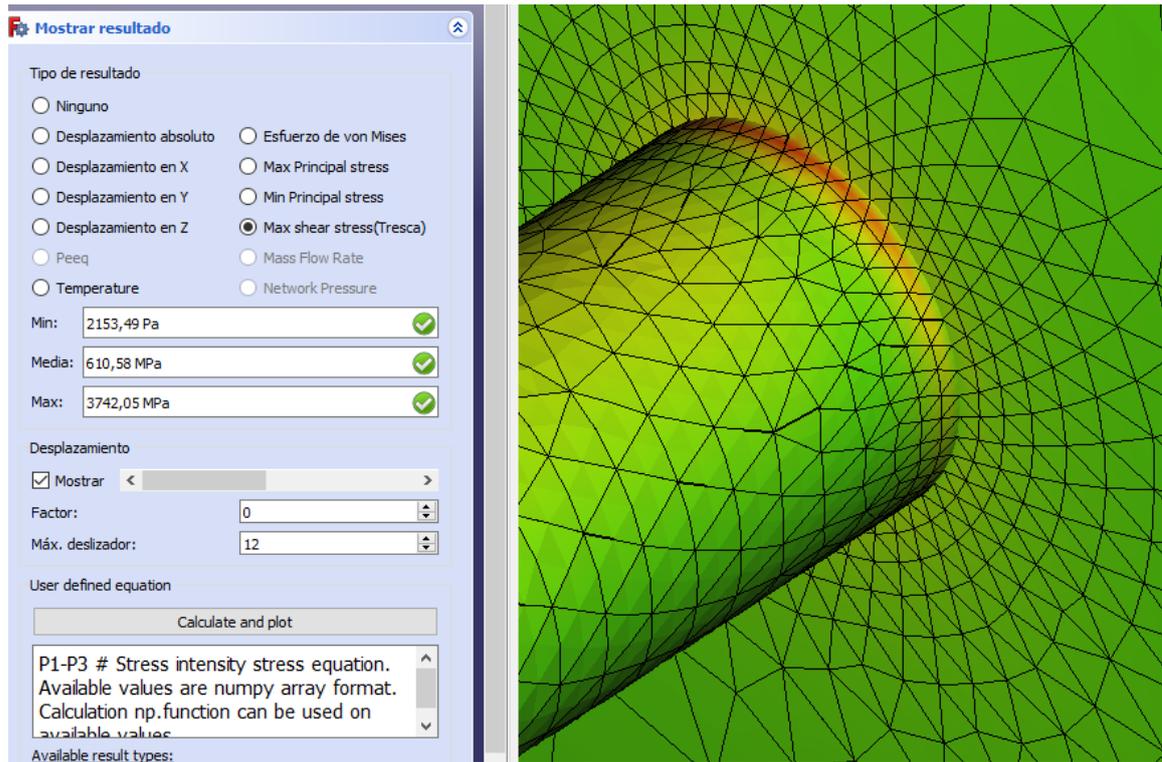
**Figura B.13:** Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



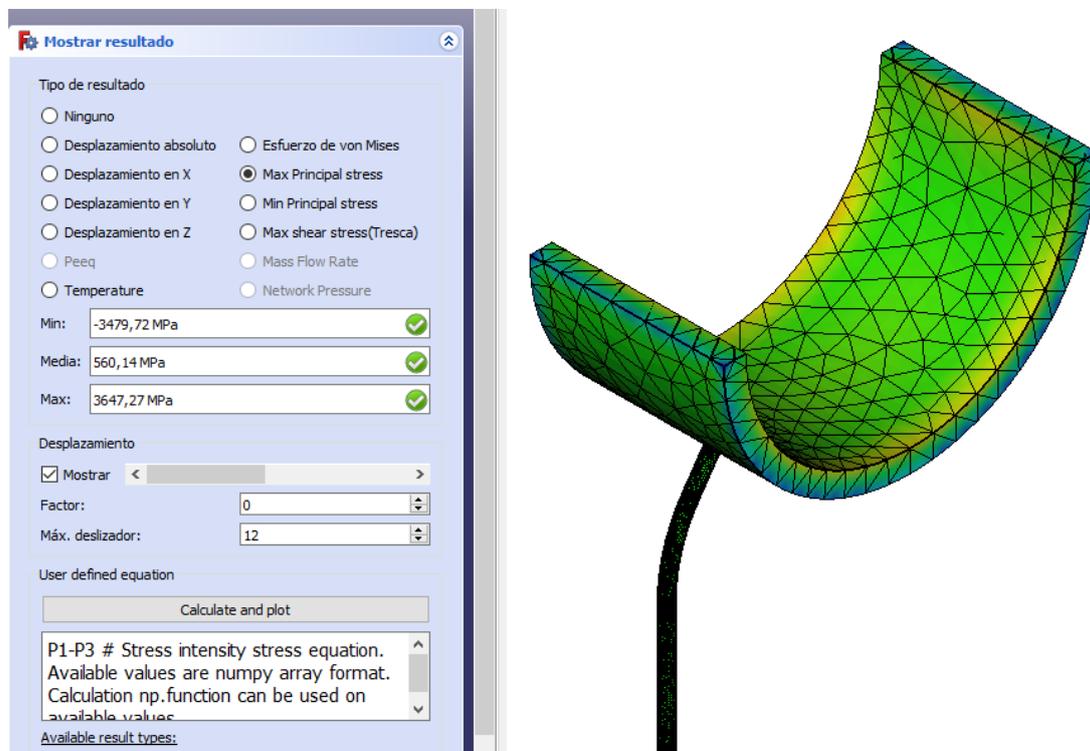
**Figura B.14:** Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



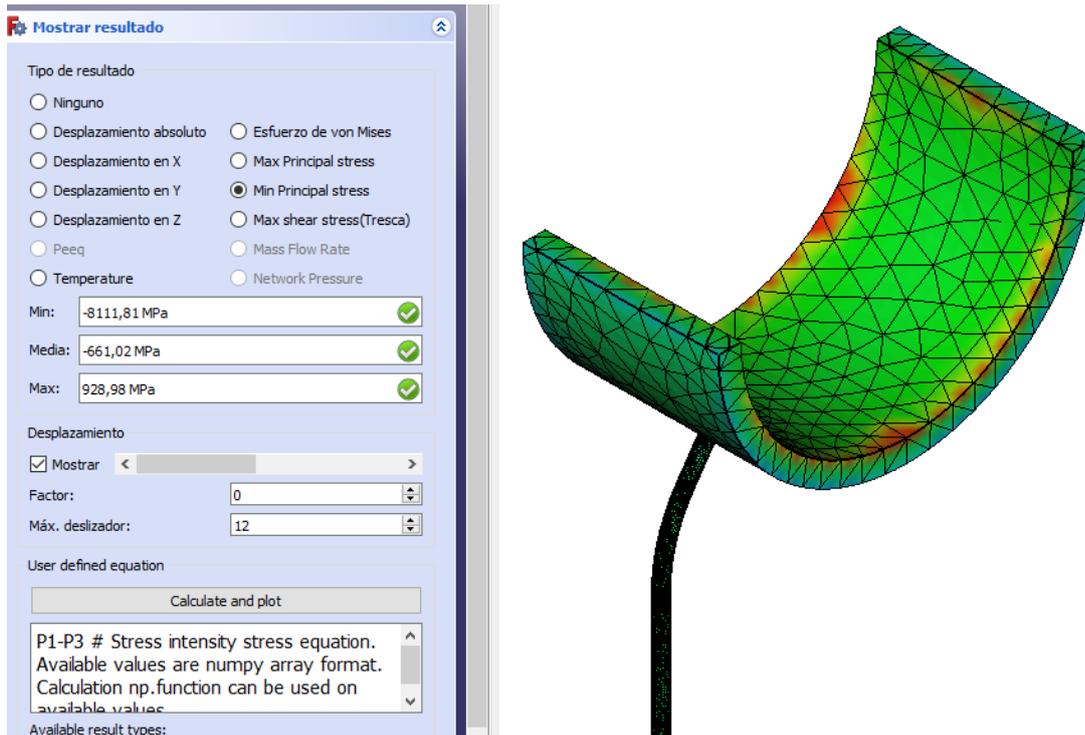
**Figura B.15:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



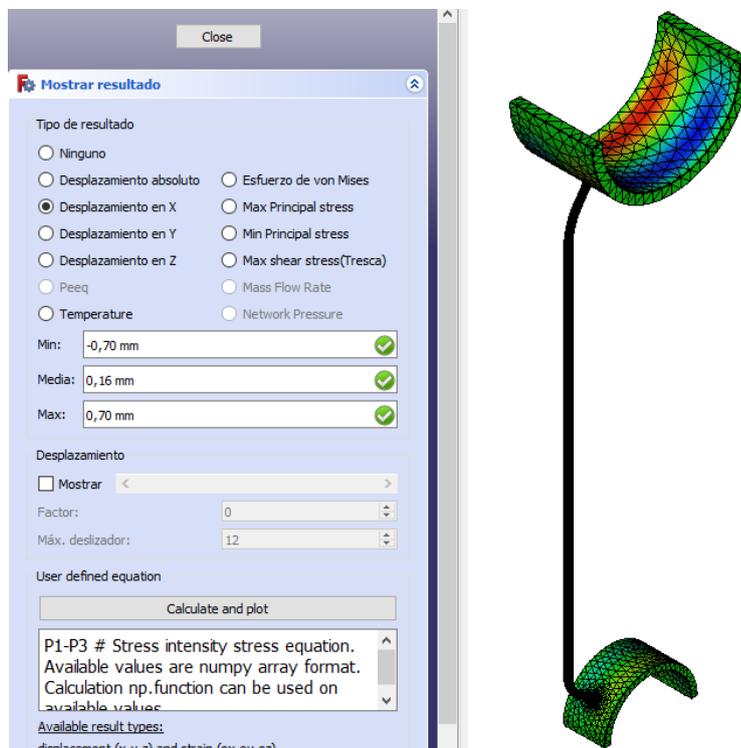
**Figura B.16:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.17:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.18:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

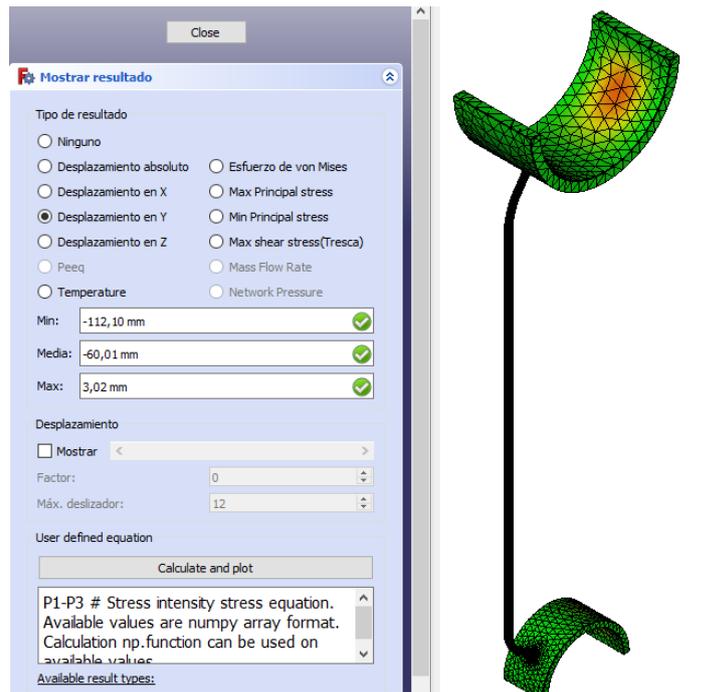


Figura B.19: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

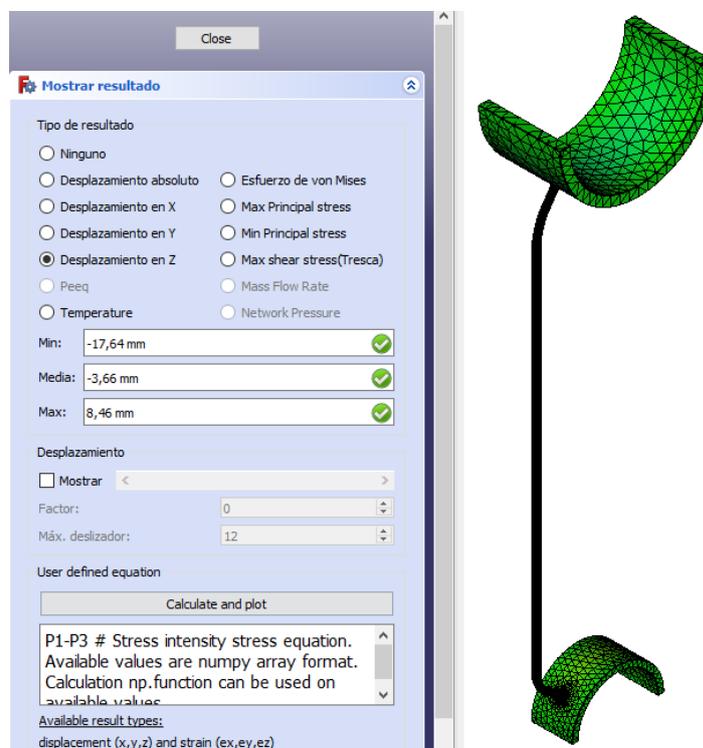
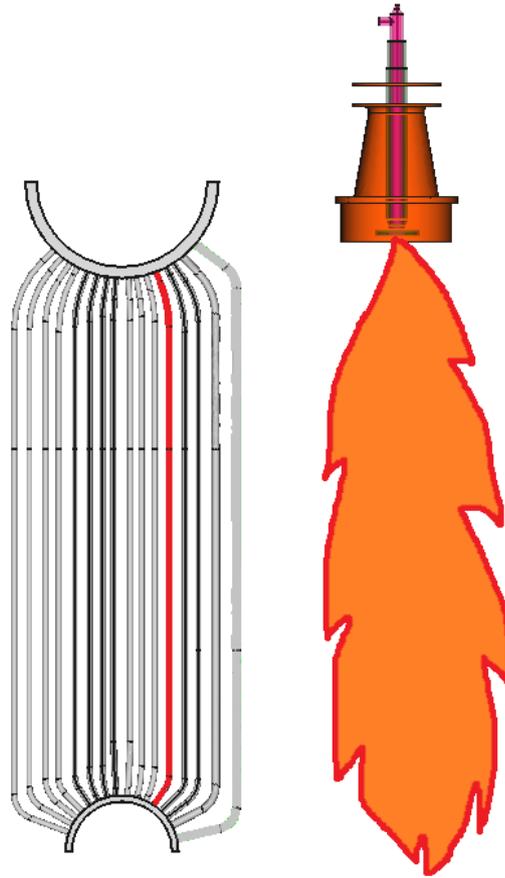


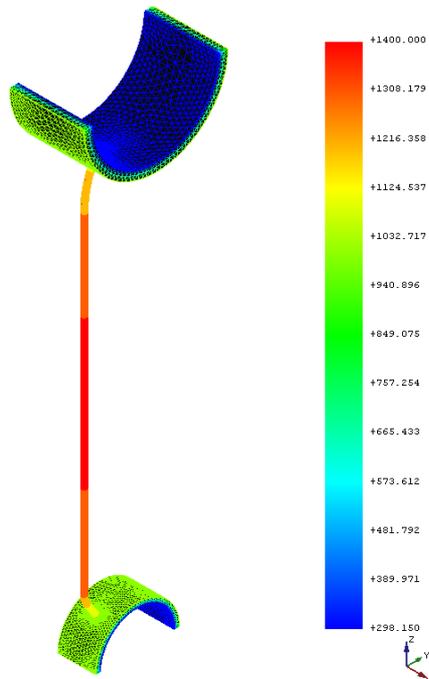
Figura B.20: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.21:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.22:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

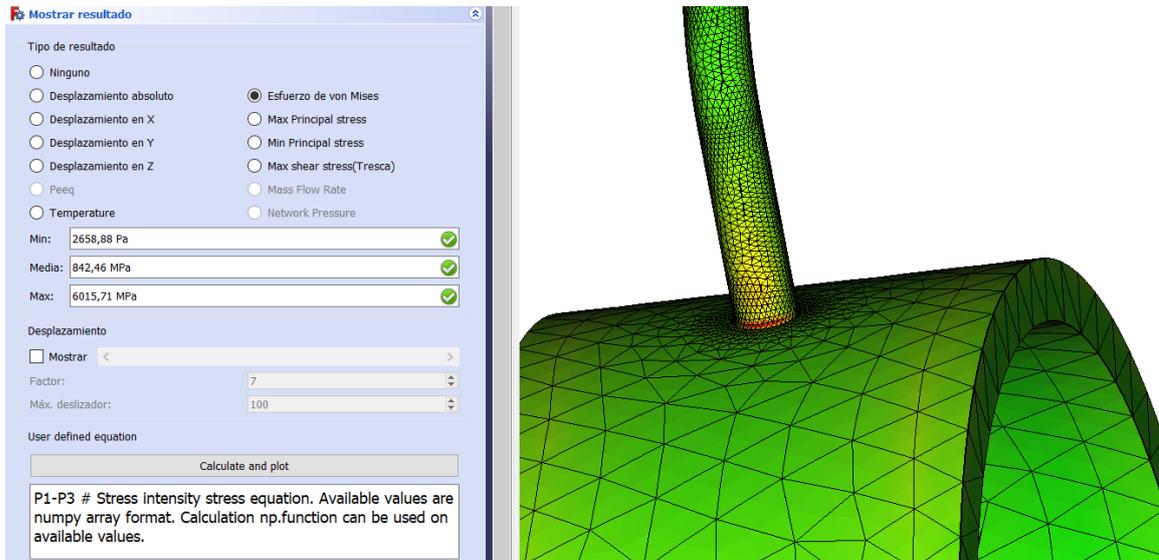


Figura B.23: Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

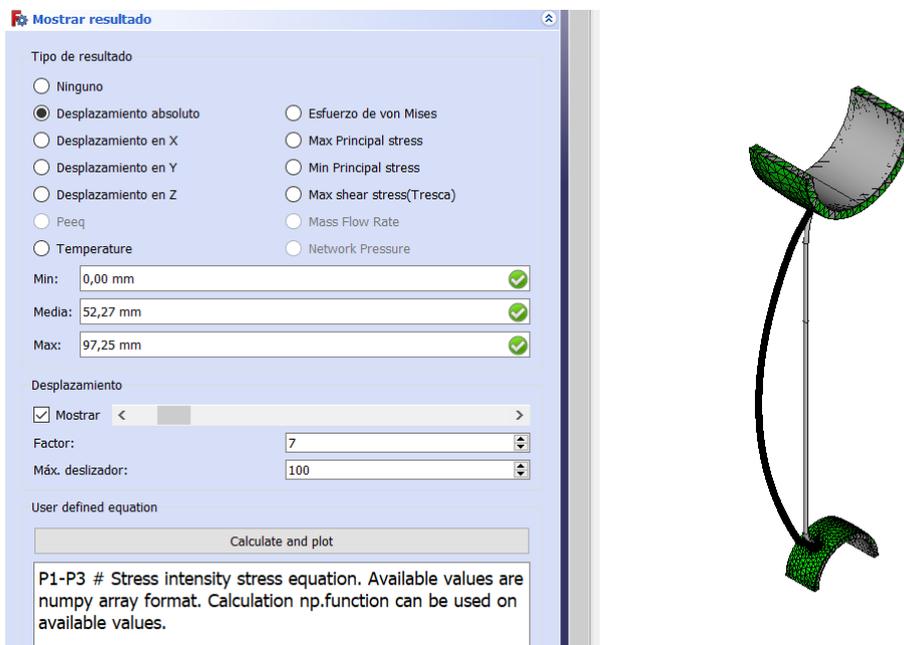
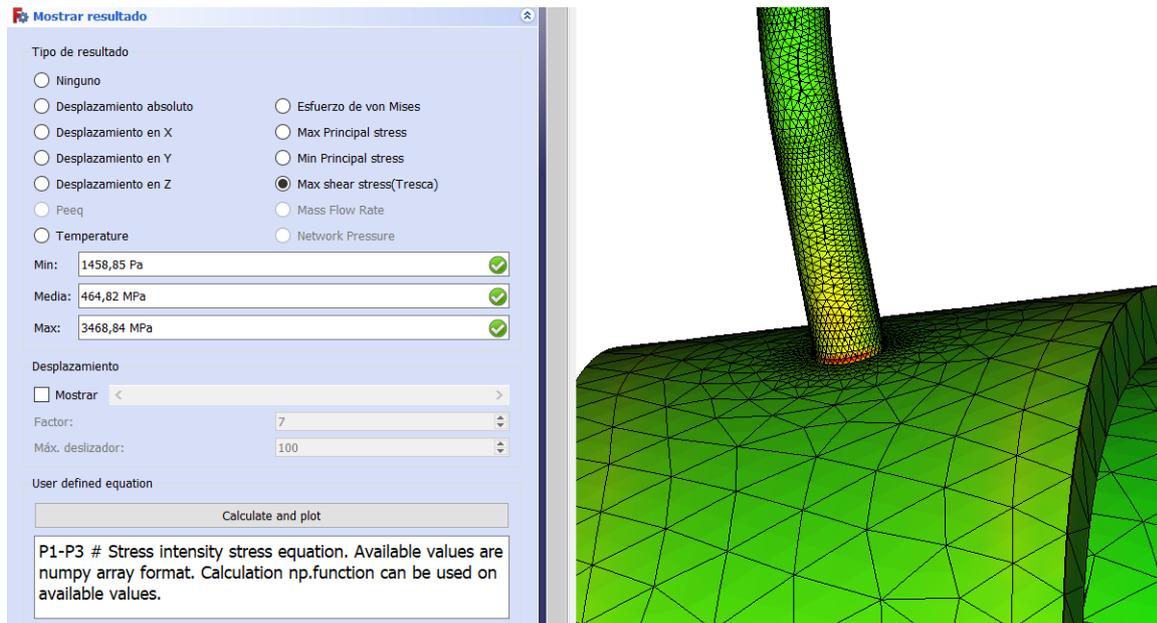


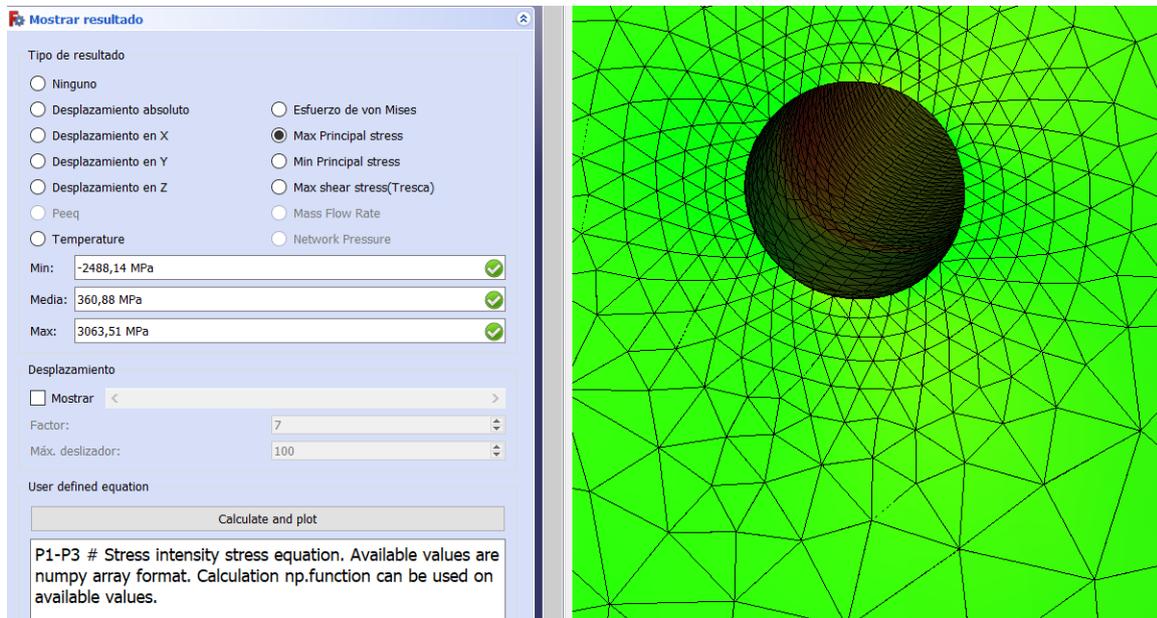
Figura B.24: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



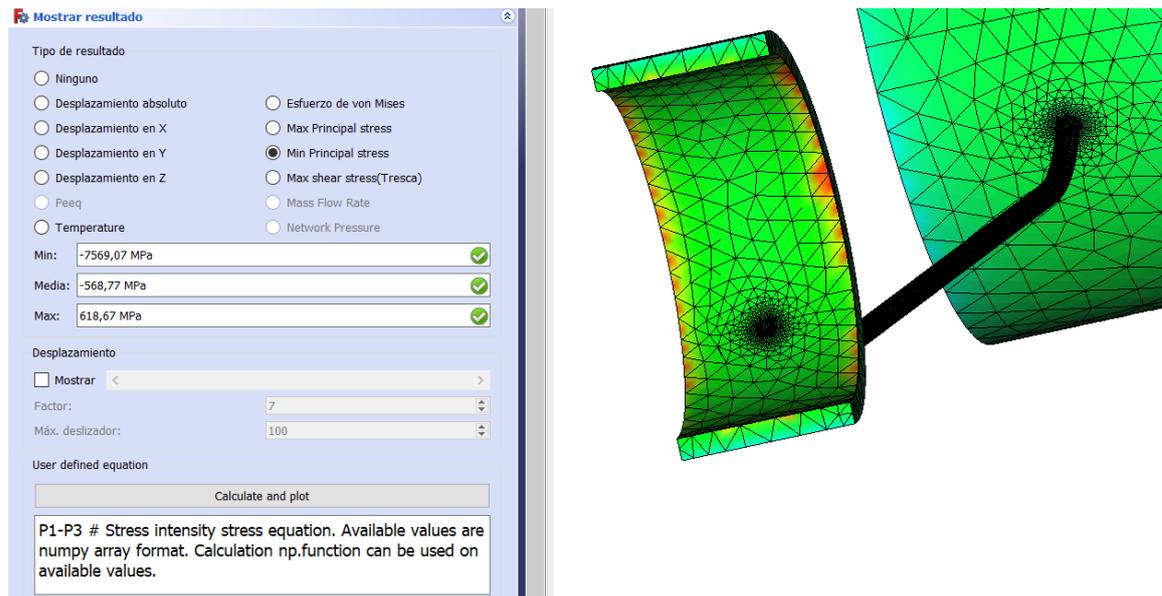
**Figura B.25:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



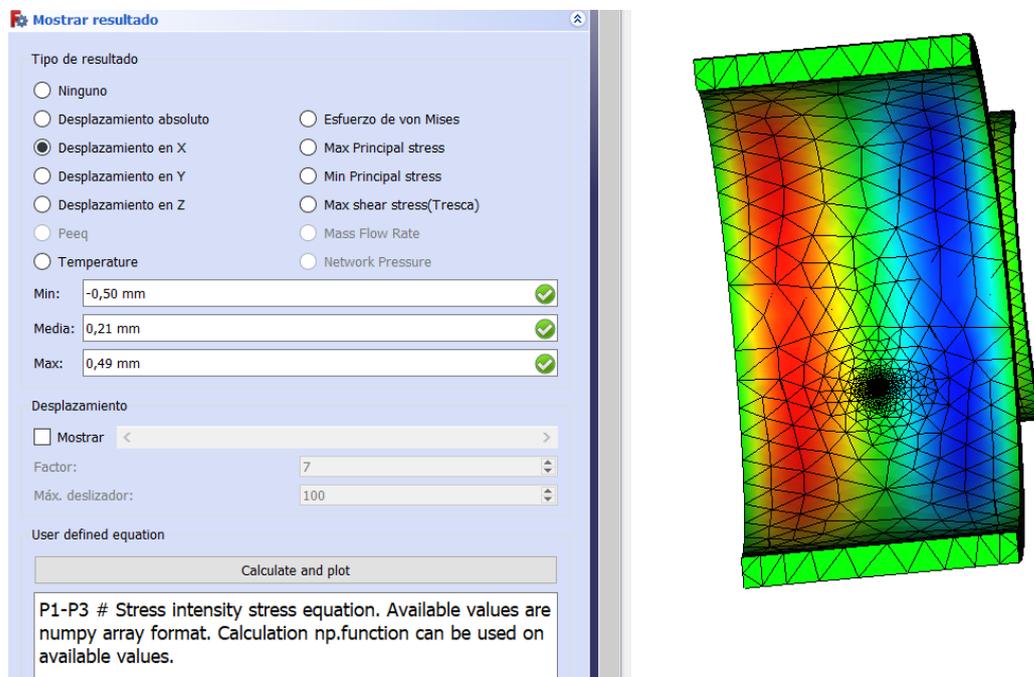
**Figura B.26:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.27:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.28:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

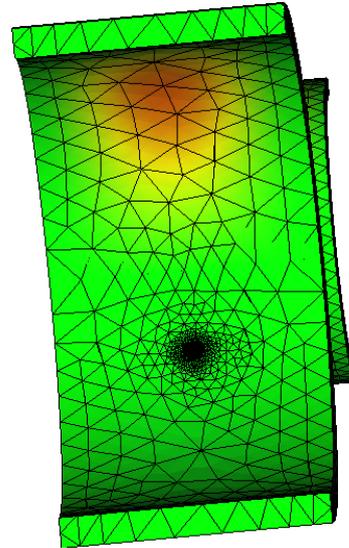
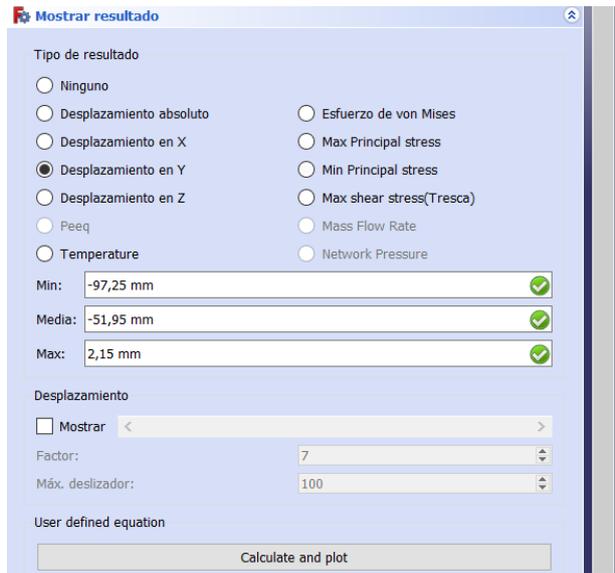


Figura B.29: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

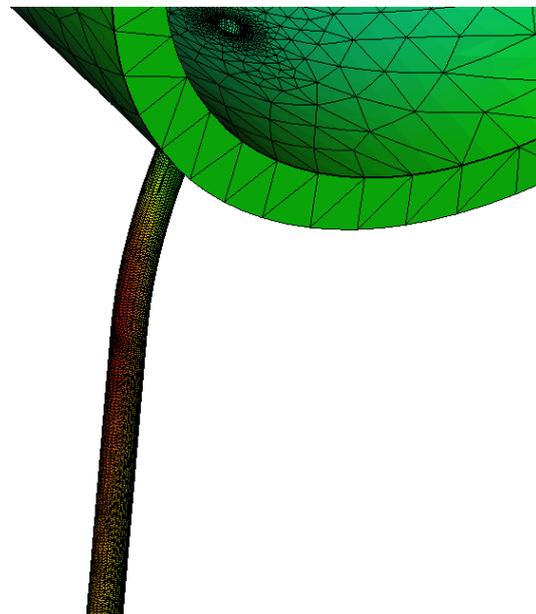
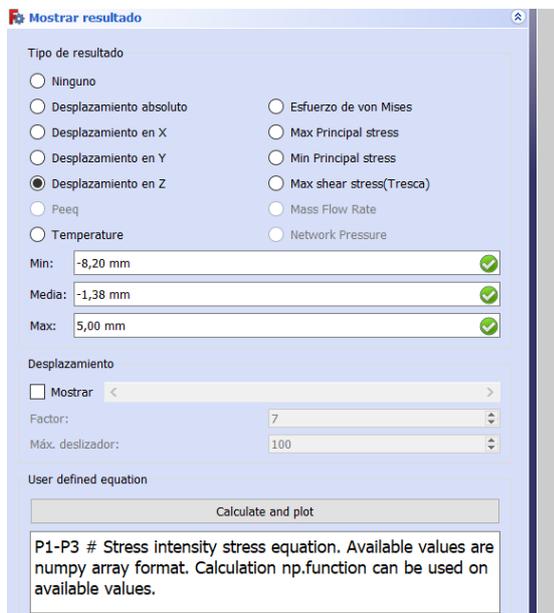
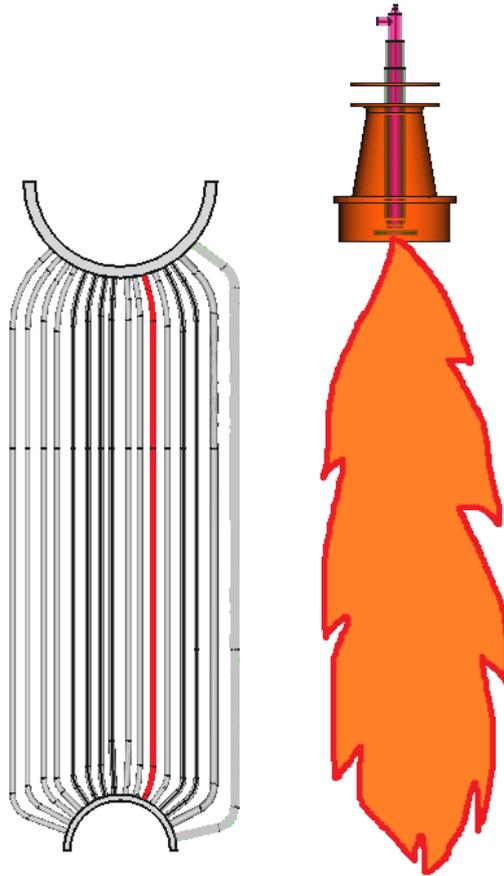


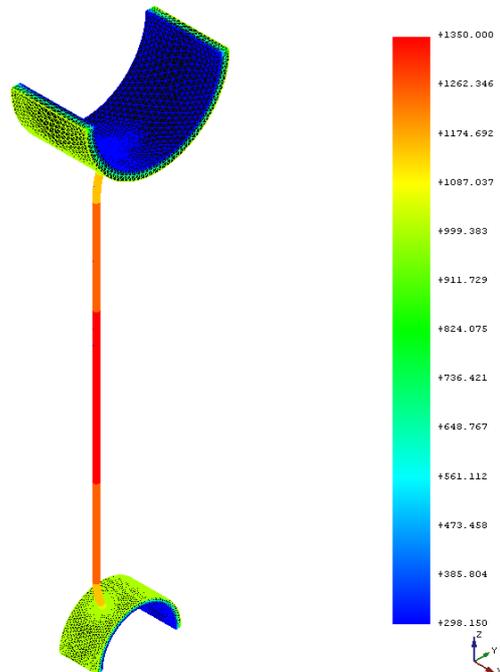
Figura B.30: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



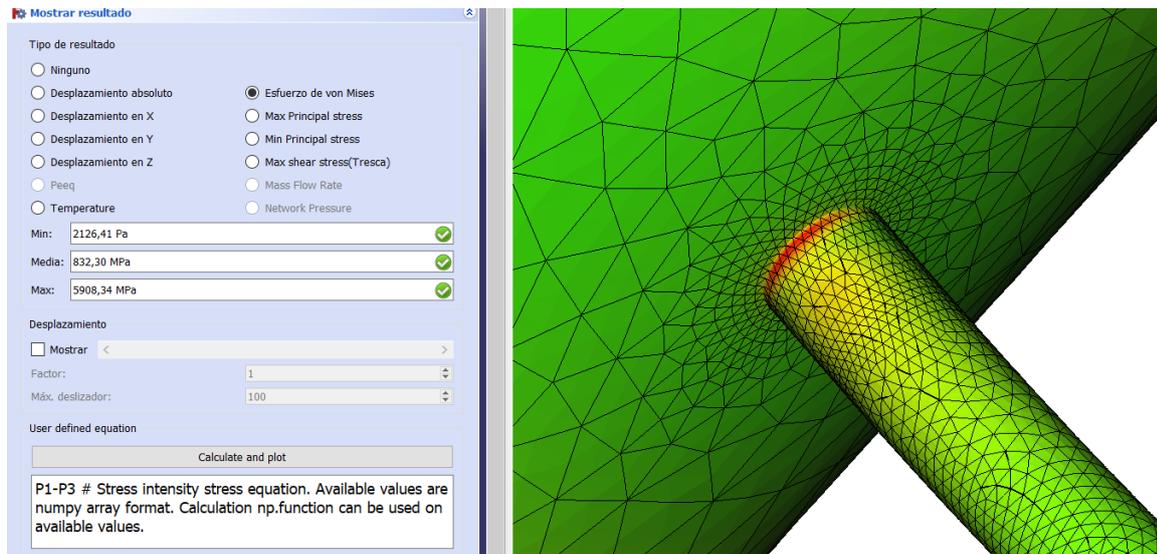
**Figura B.31:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



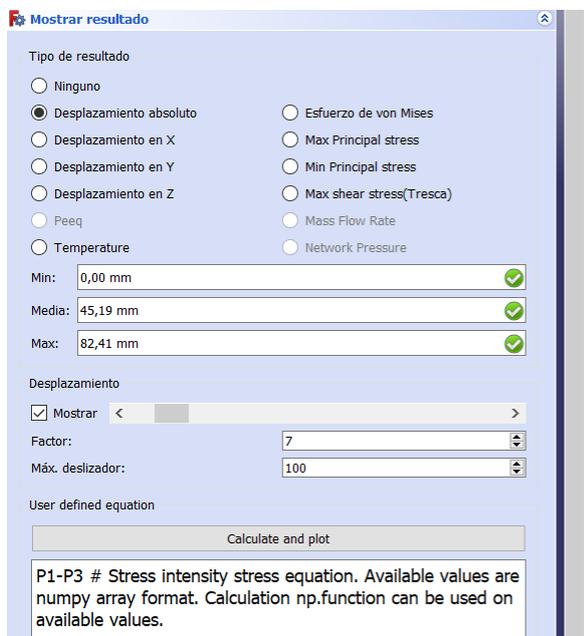
**Figura B.32:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



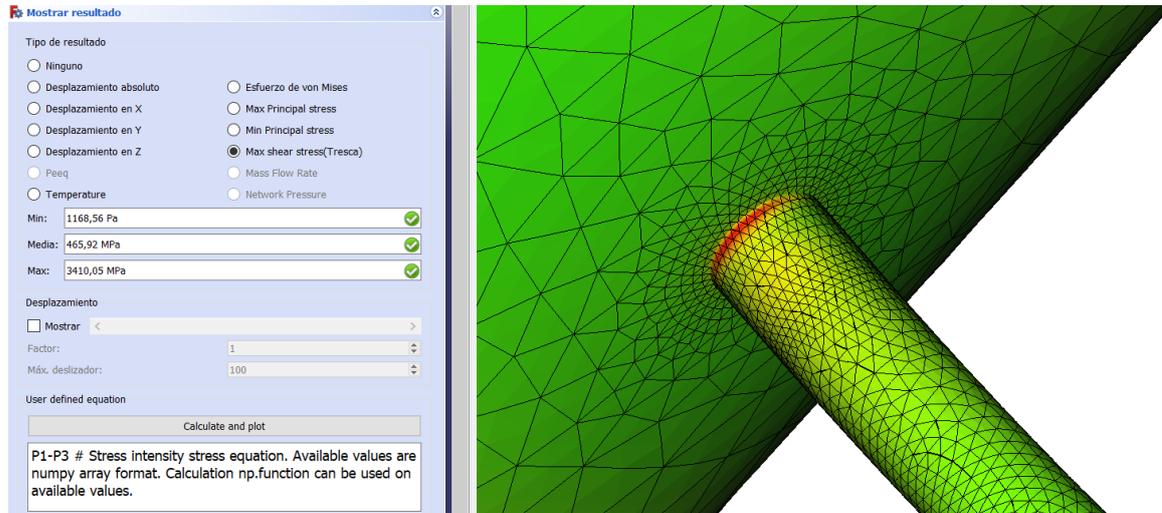
**Figura B.33:** Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



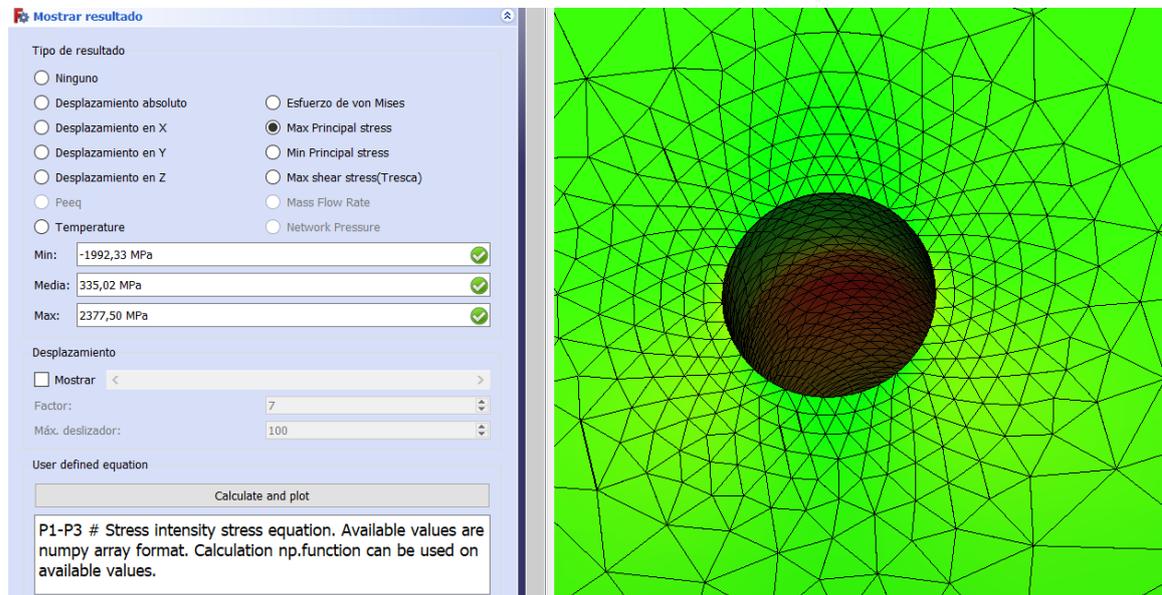
**Figura B.34:** Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



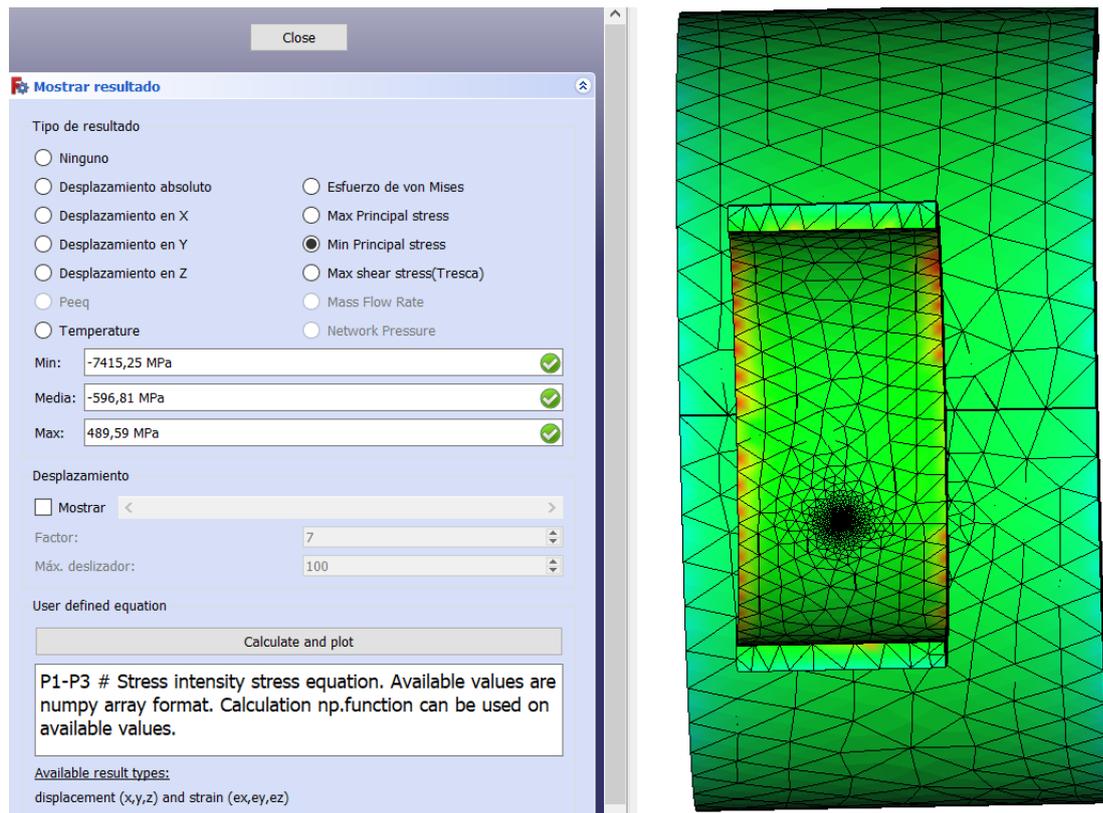
**Figura B.35:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



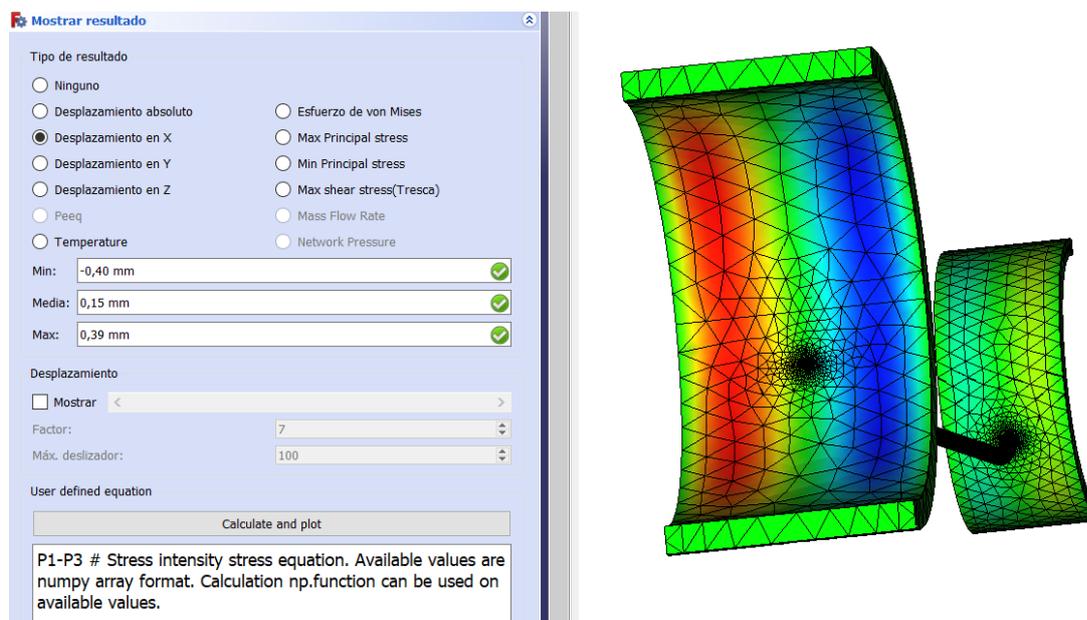
**Figura B.36:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.37:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura B.38:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

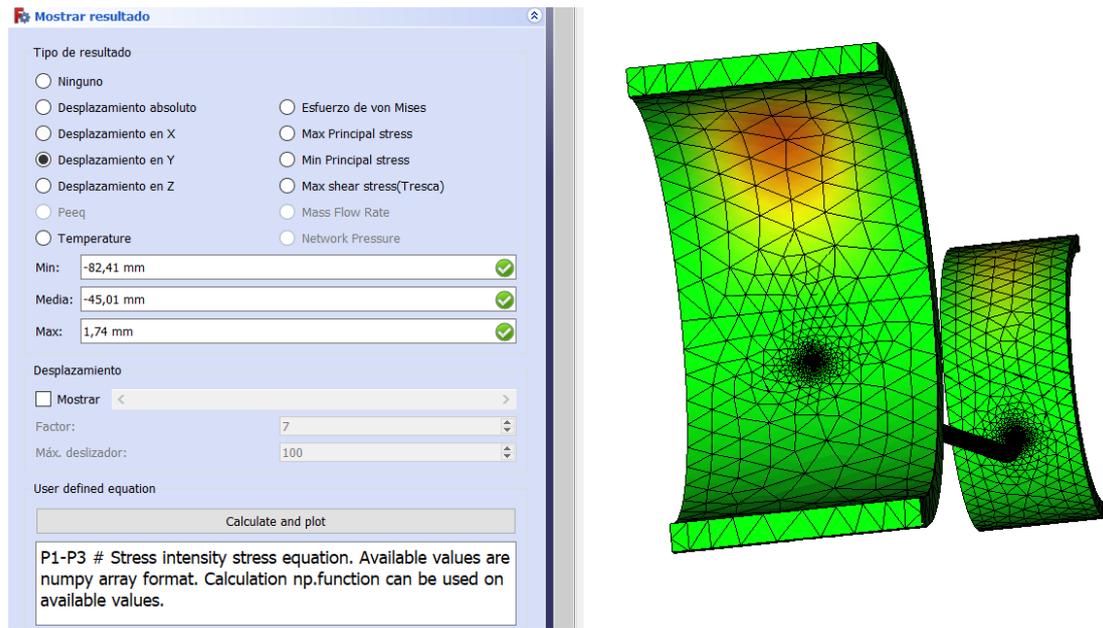


Figura B.39: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

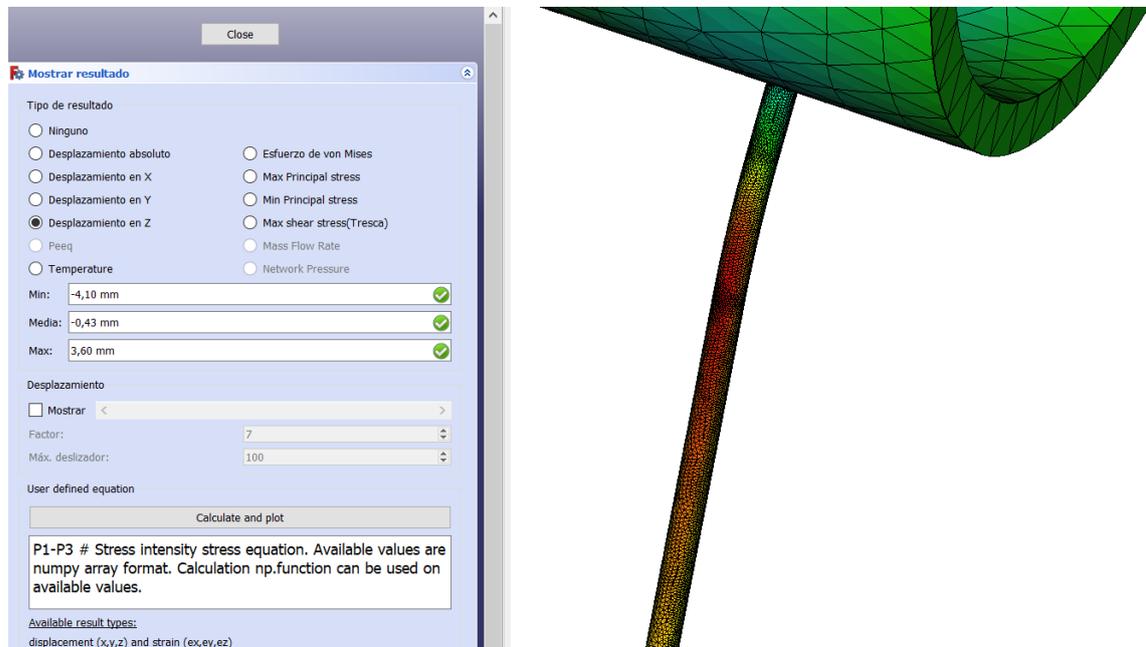
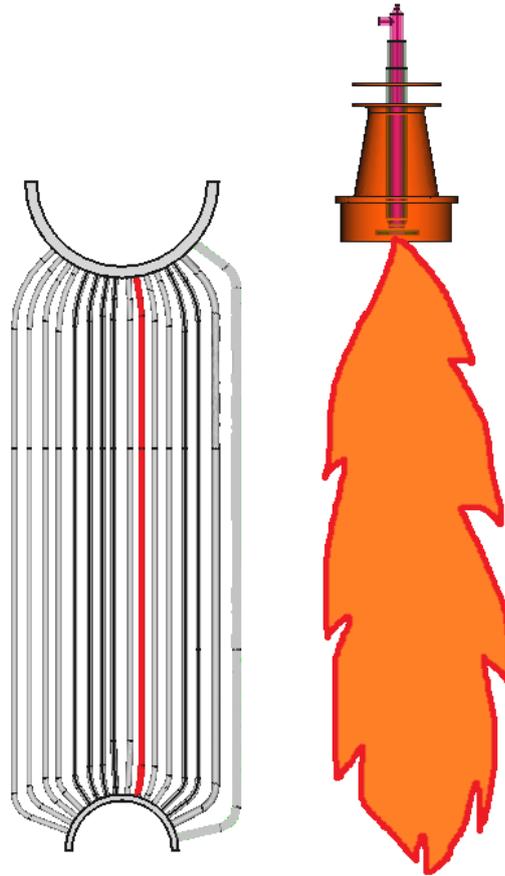


Figura B.40: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

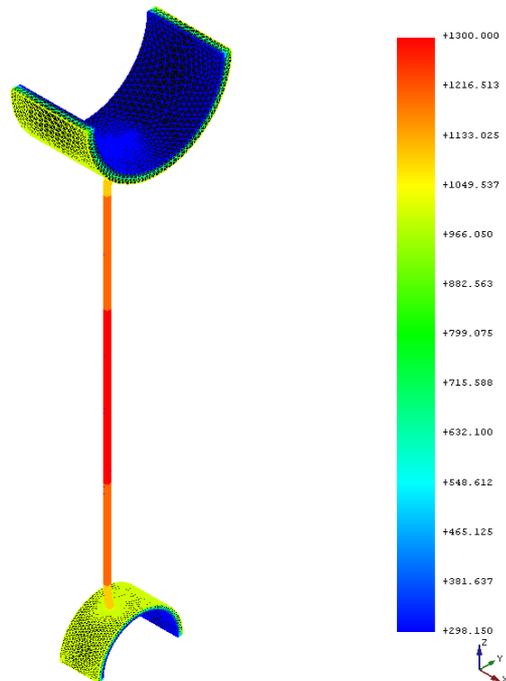


## C Estudio termomecánico del generador de vapor (2)



**Figura C.1:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.2:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

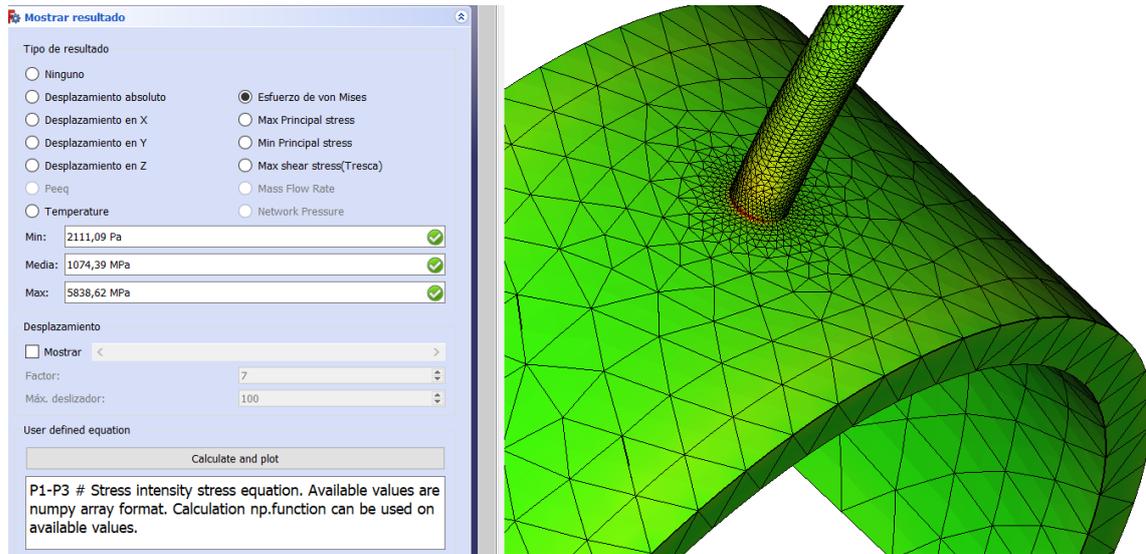


Figura C.3: Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

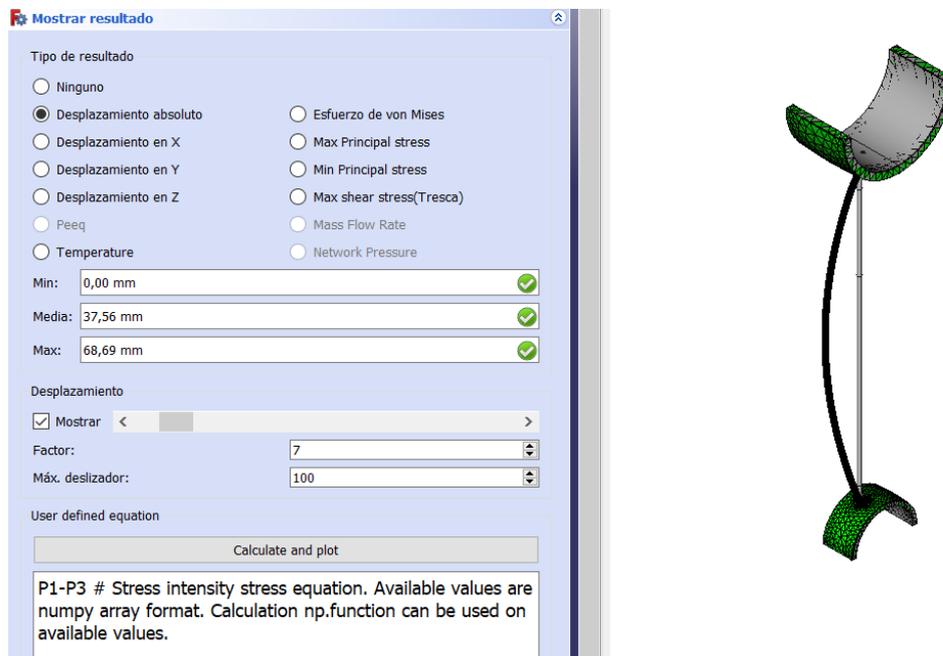
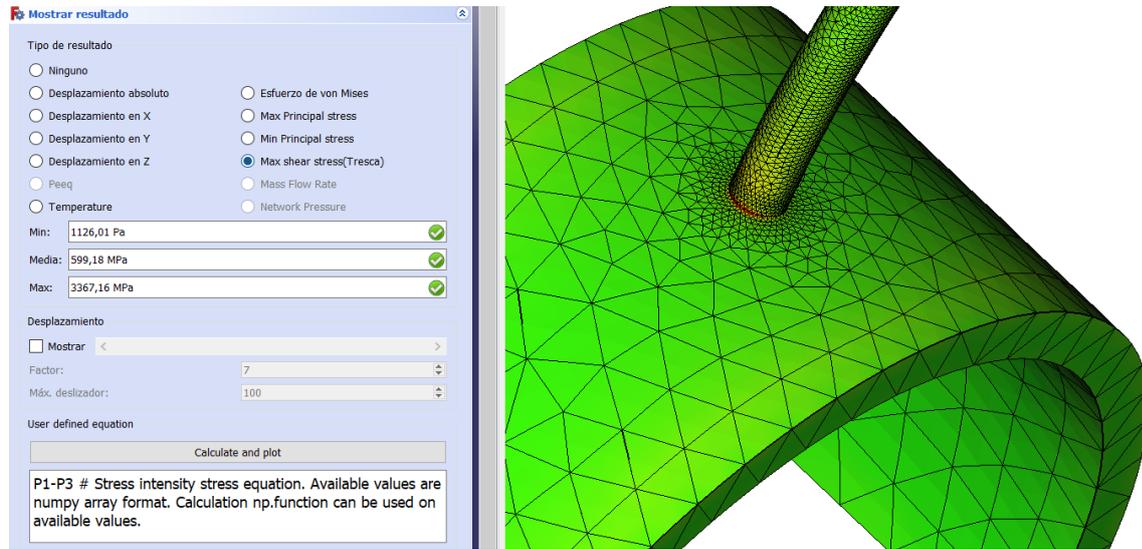


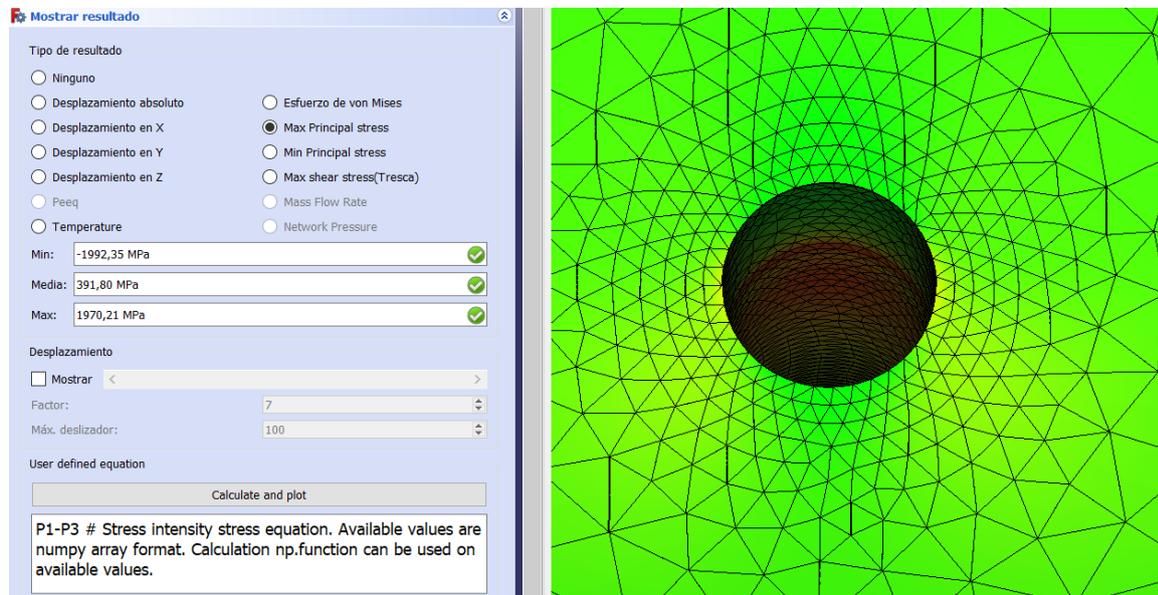
Figura C.4: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.5:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.6:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

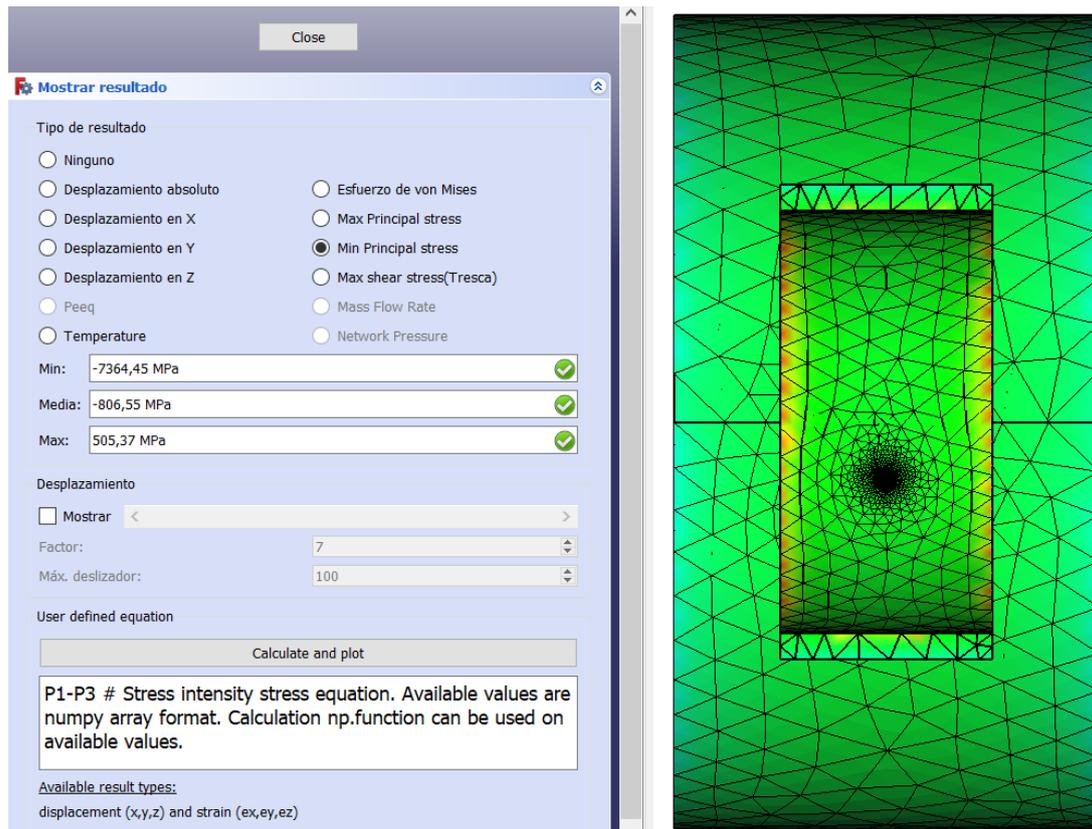


Figura C.7: Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

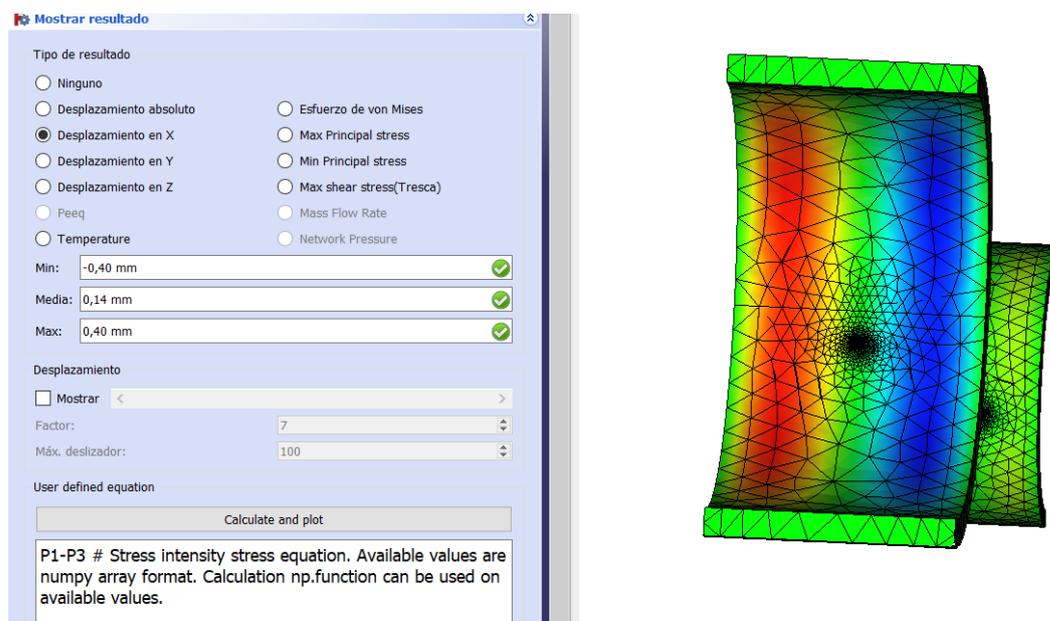


Figura C.8: Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

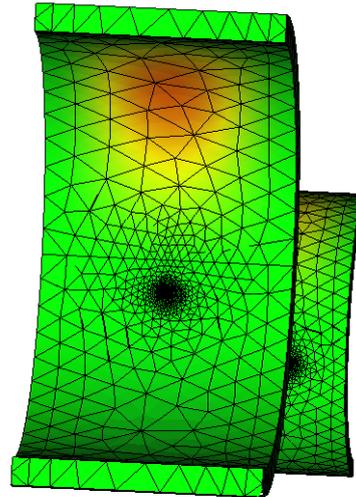
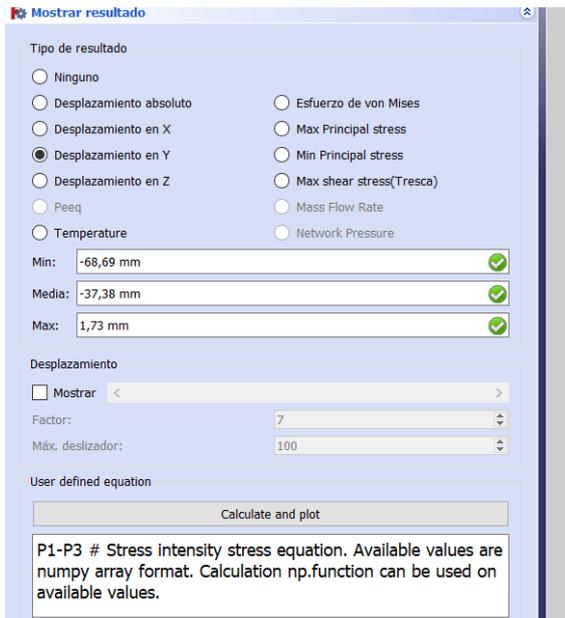


Figura C.9: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

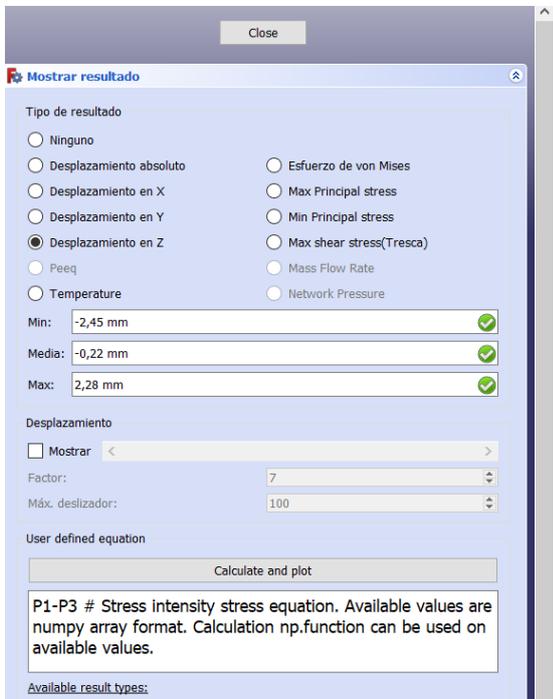
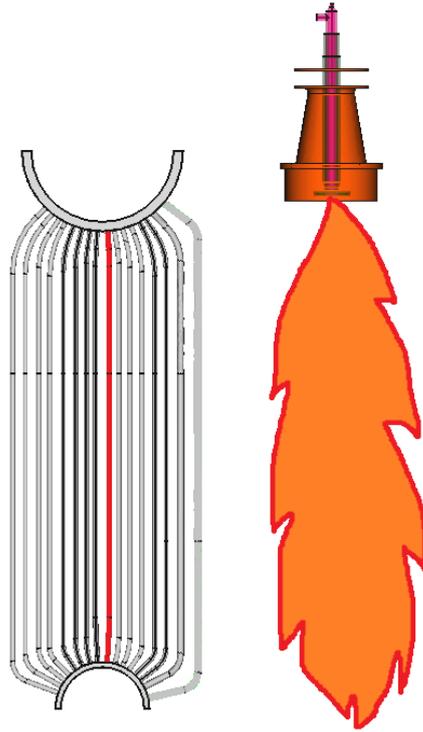


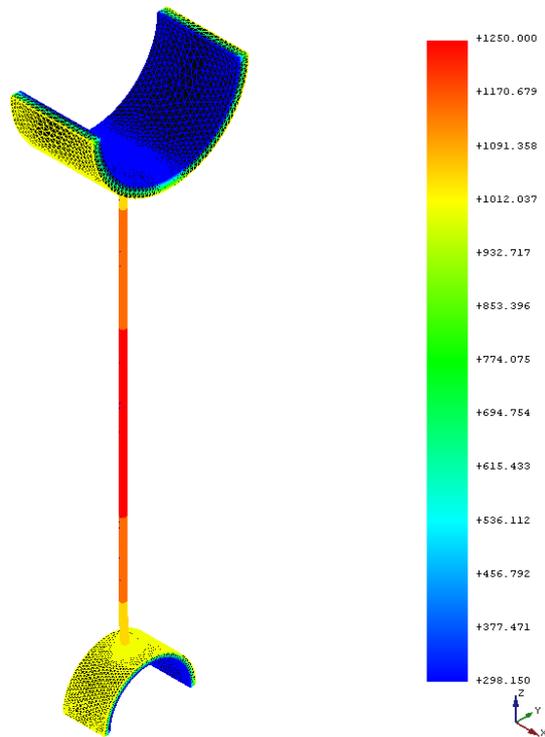
Figura C.10: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.11:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.12:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

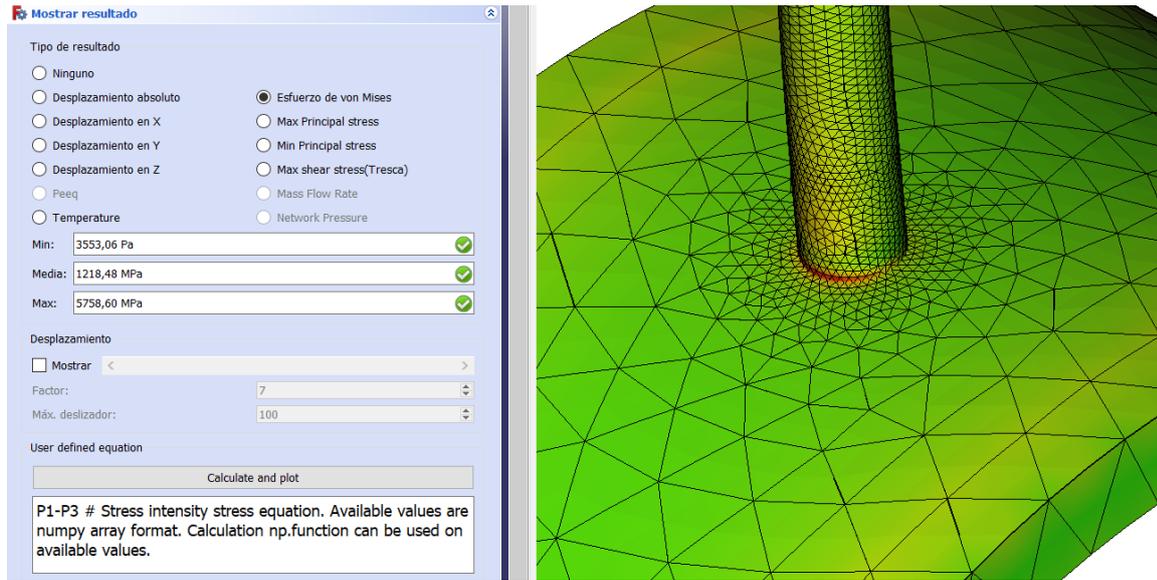


Figura C.13: Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

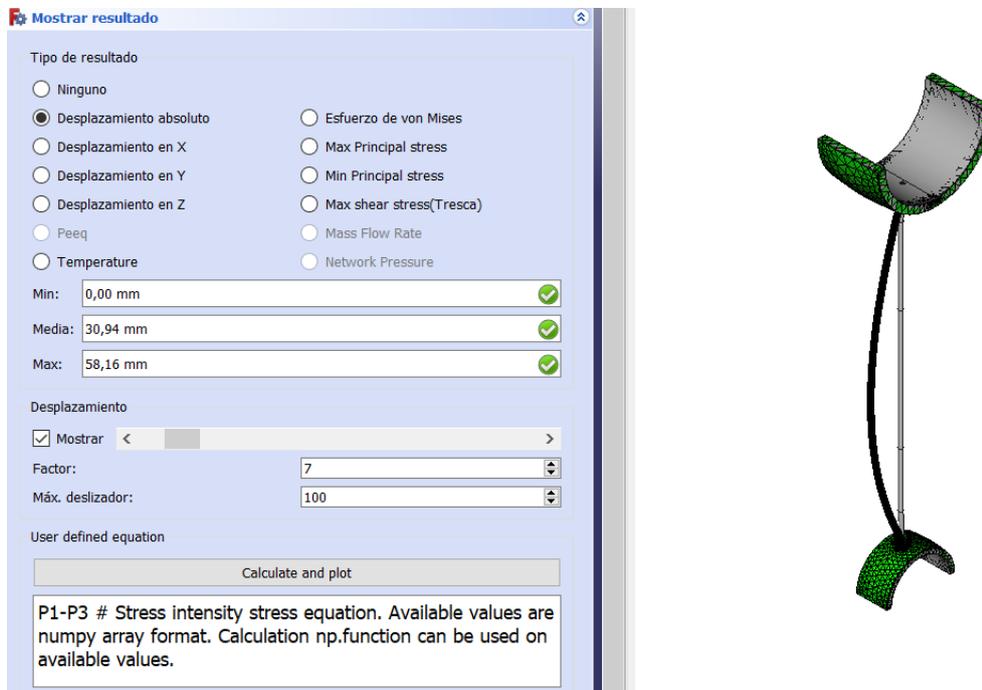
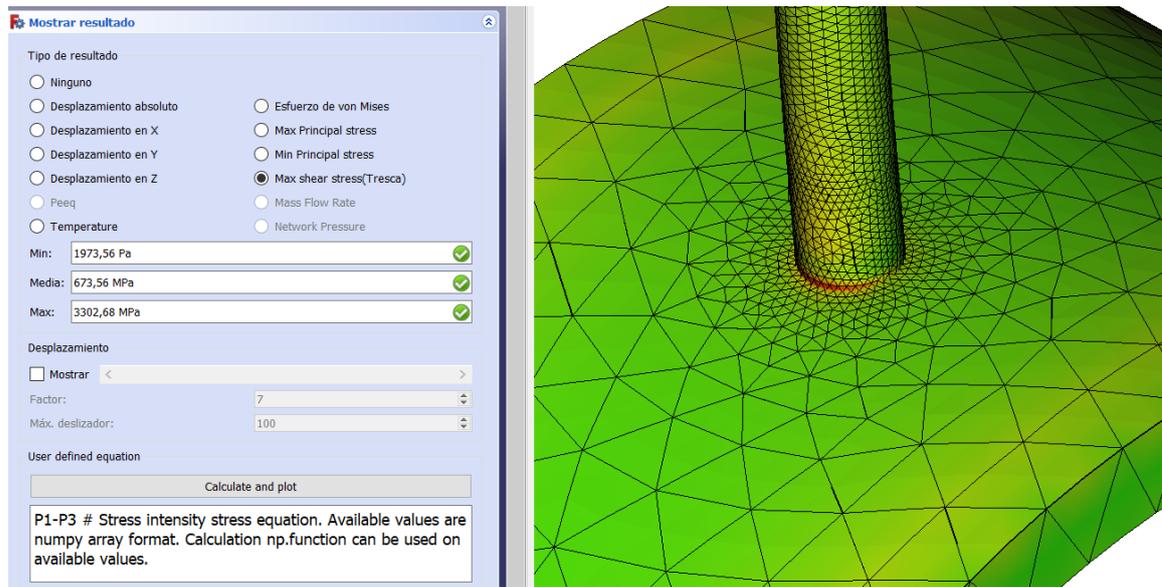


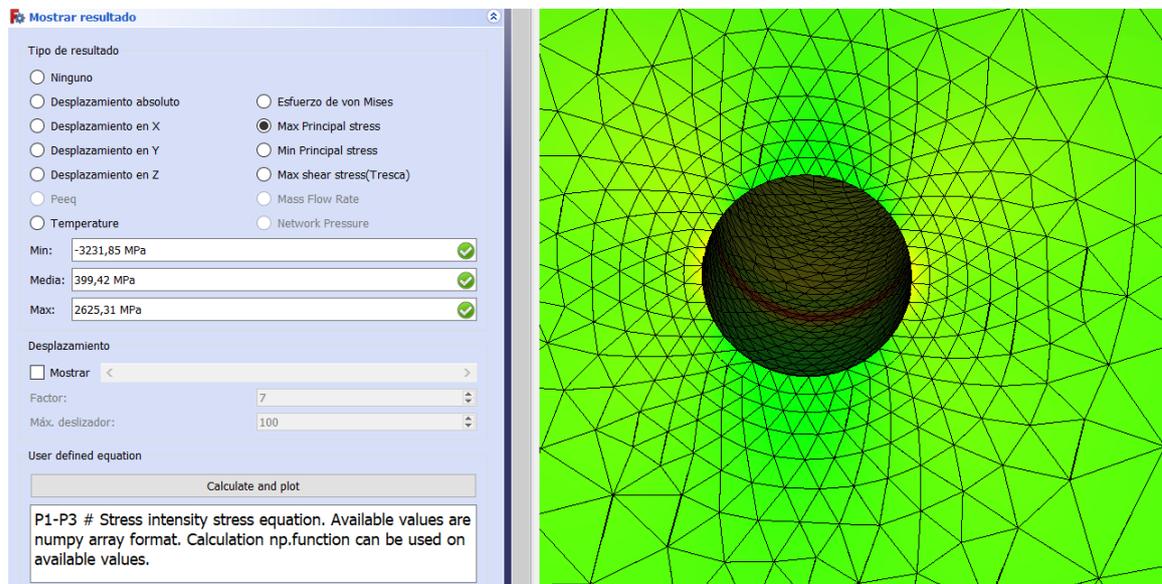
Figura C.14: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



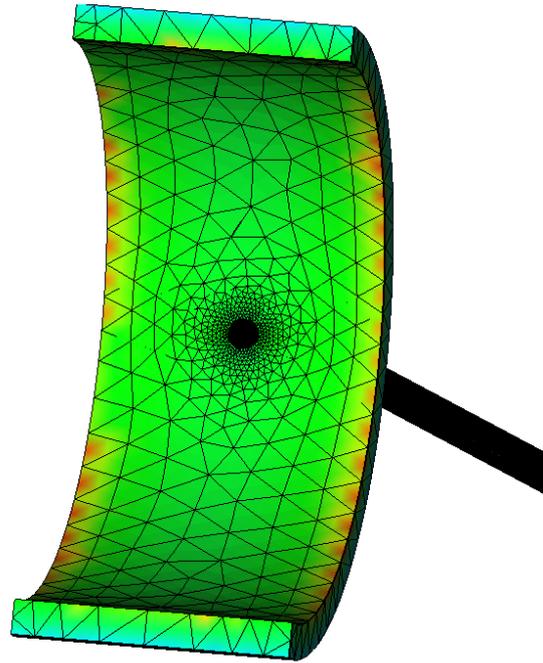
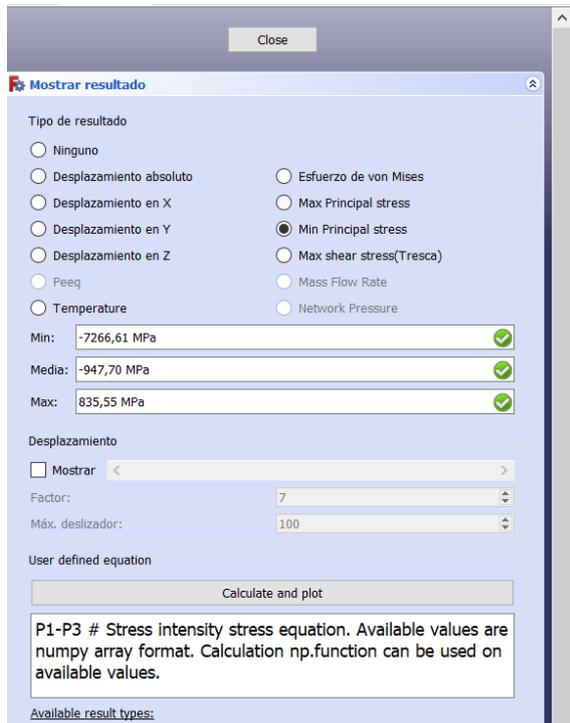
**Figura C.15:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



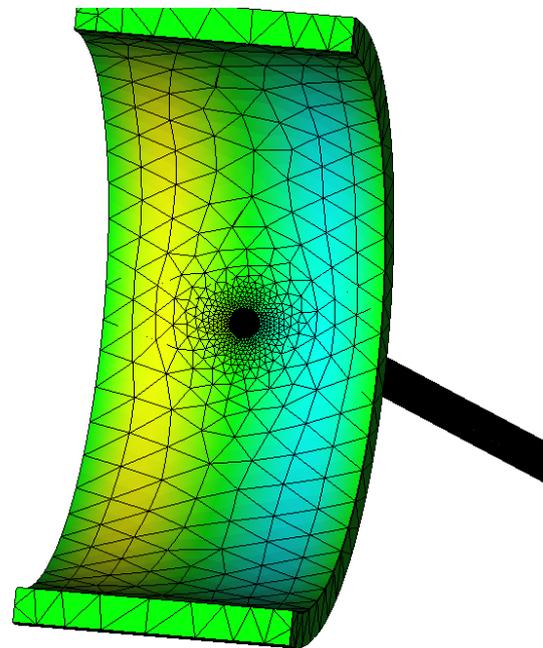
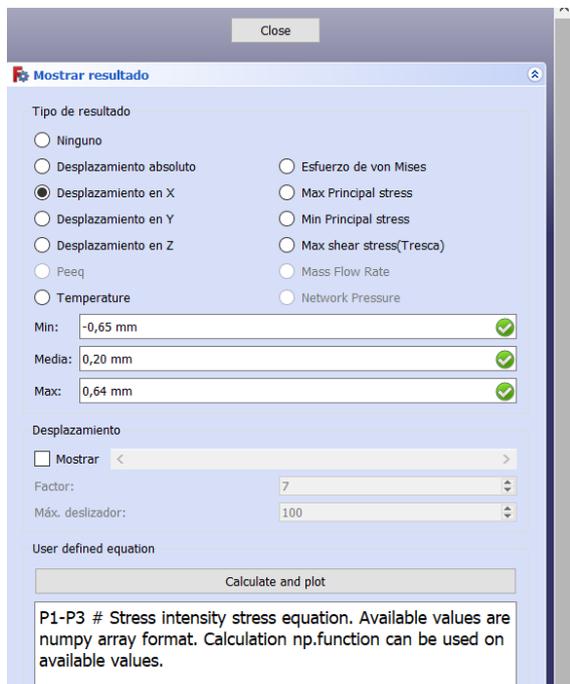
**Figura C.16:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.17:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.18:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

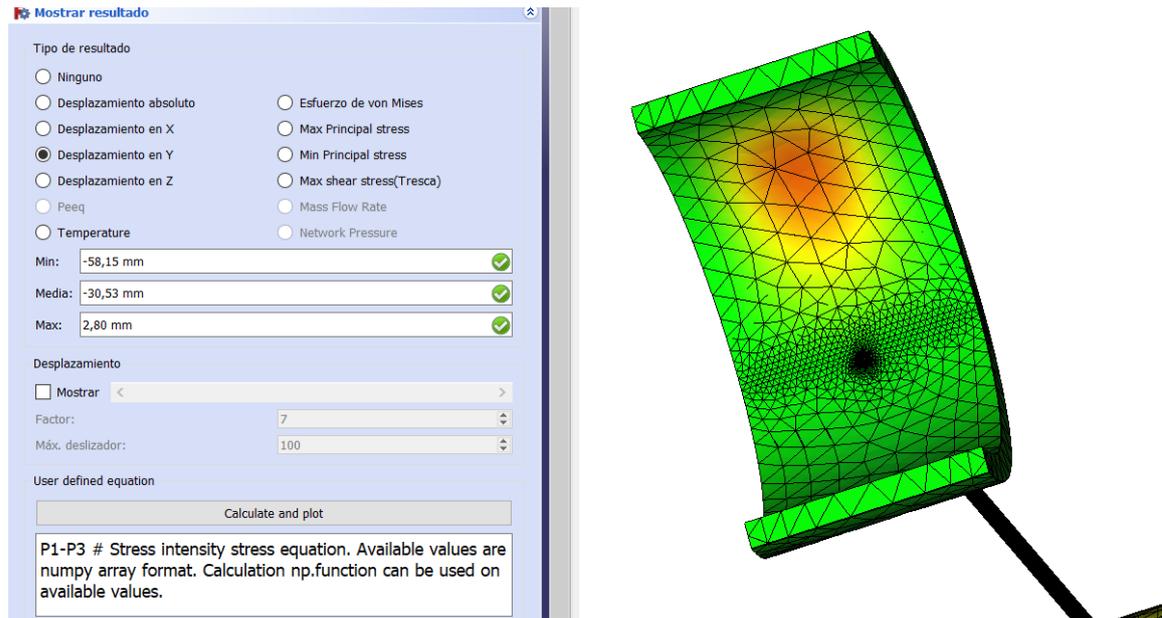


Figura C.19: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

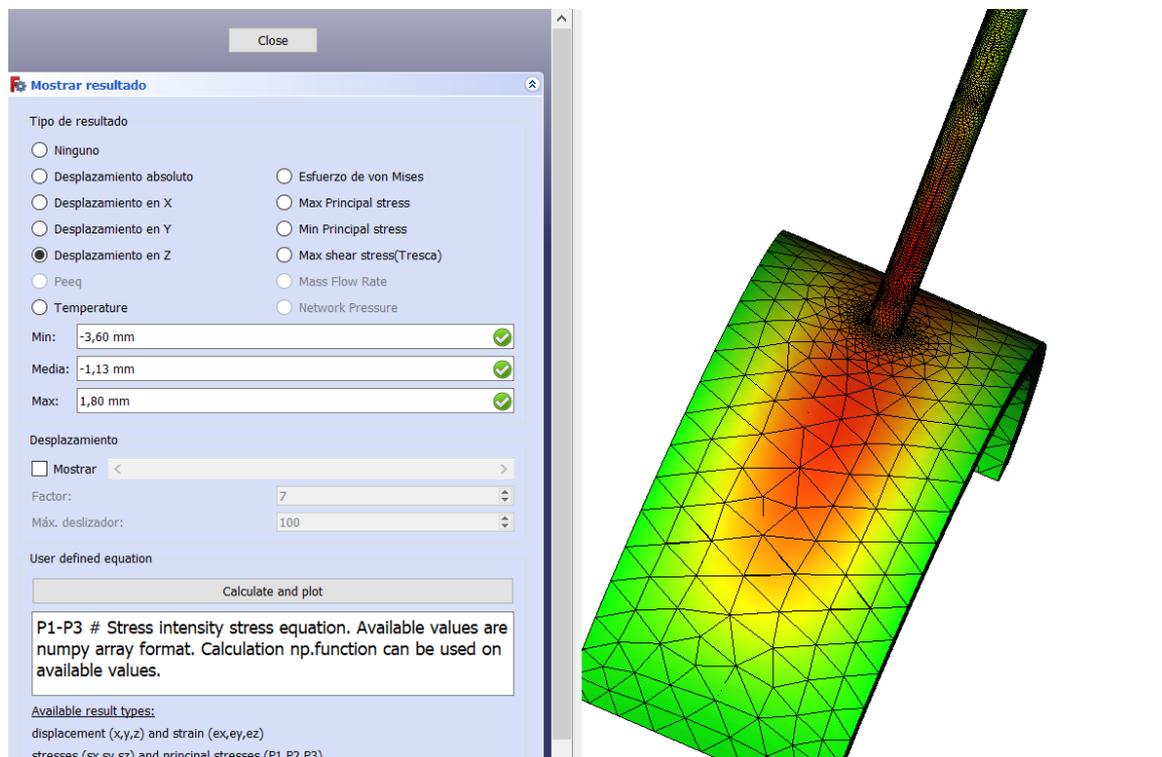
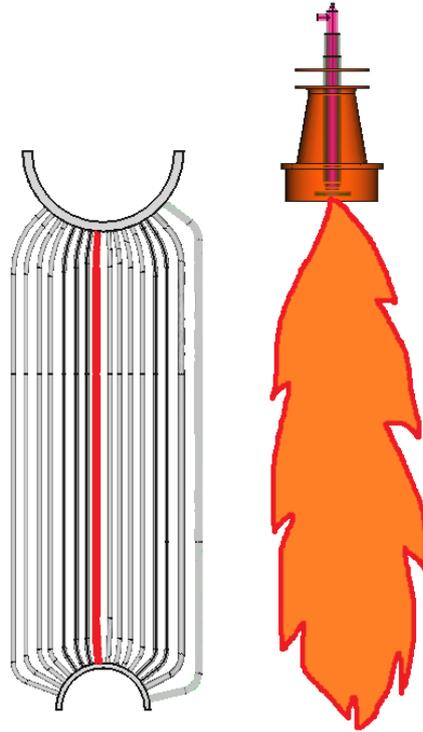


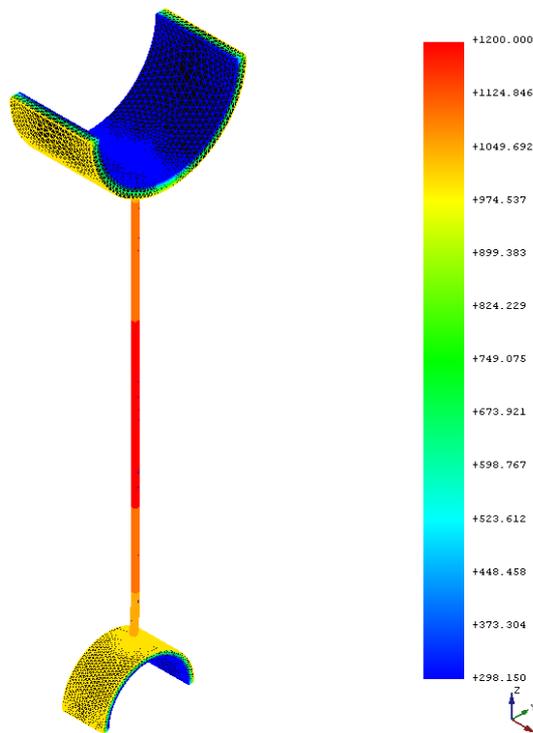
Figura C.20: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.21:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.22:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

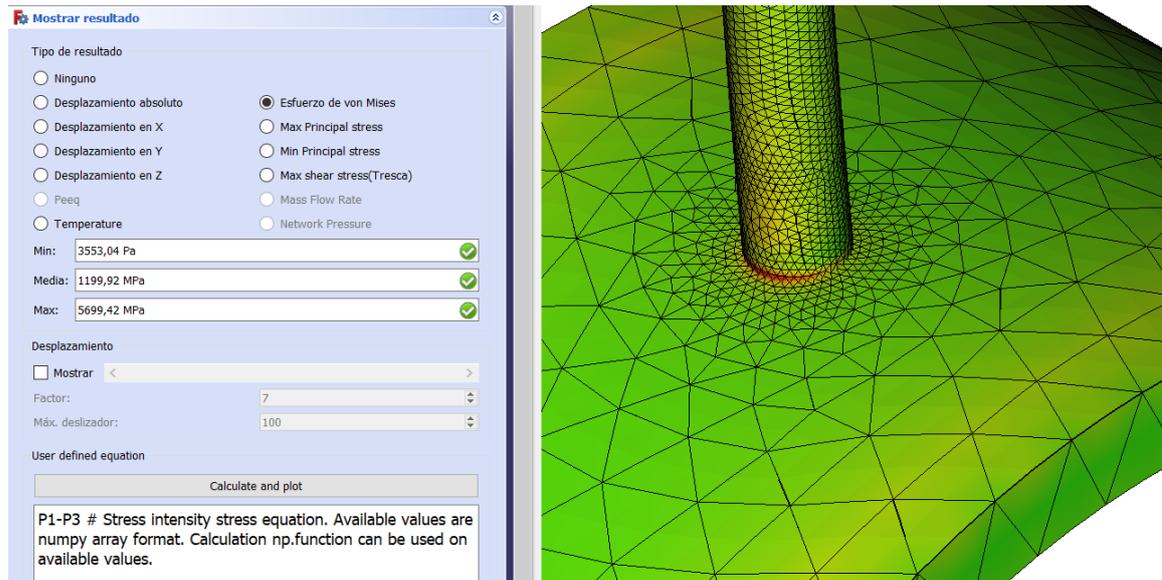


Figura C.23: Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

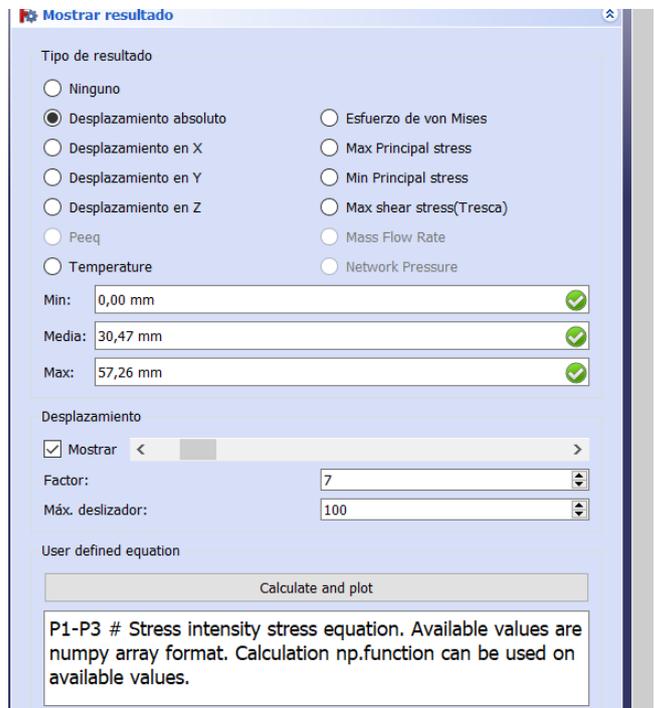
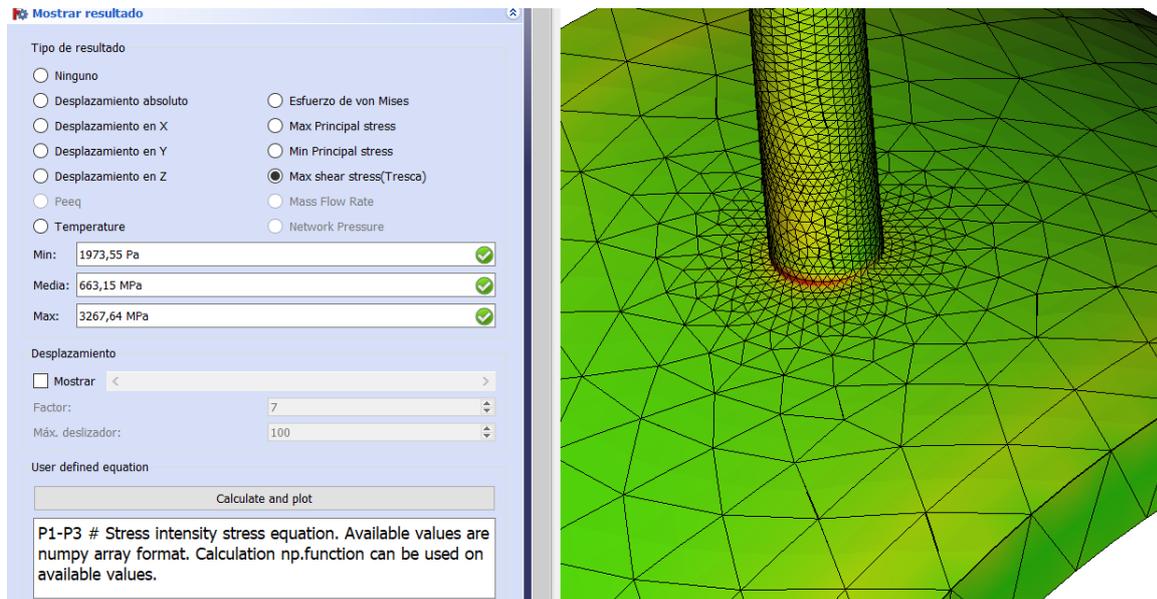


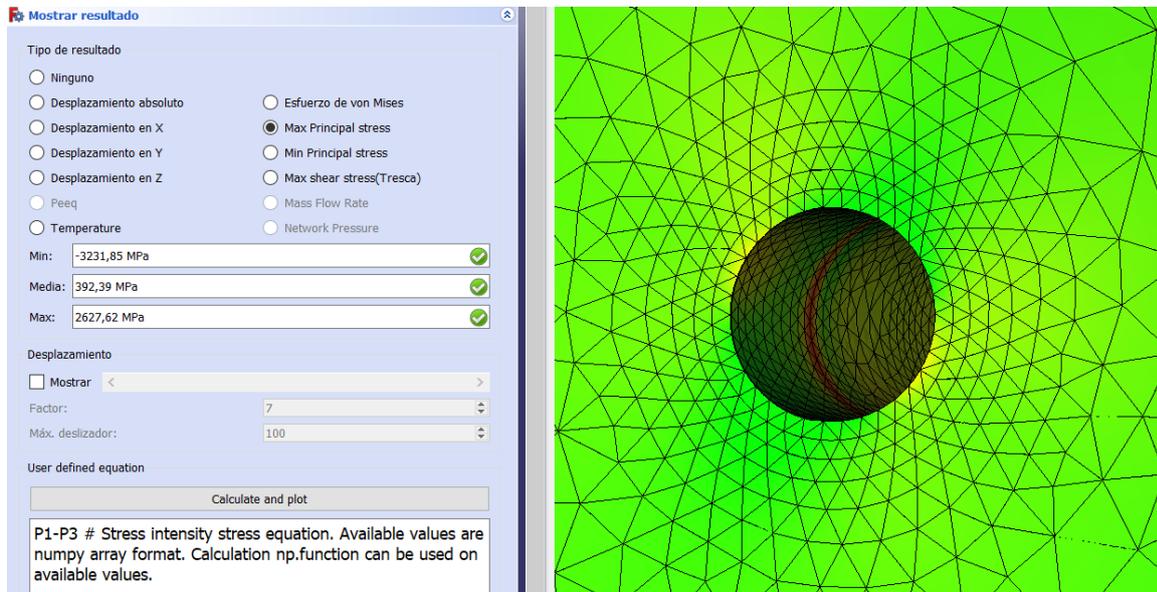
Figura C.24: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.25:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.26:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

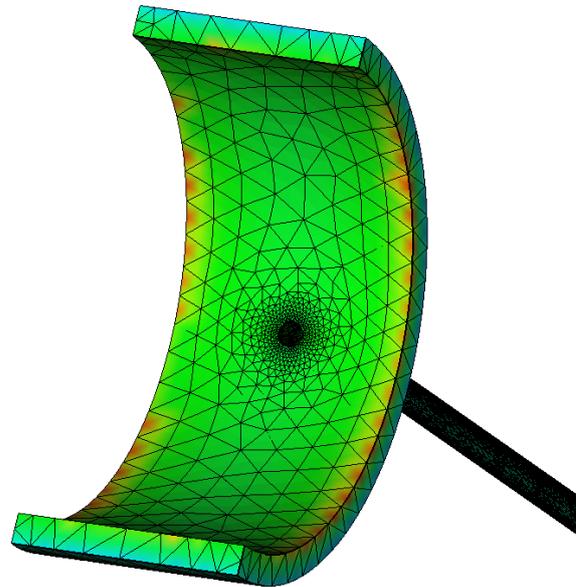
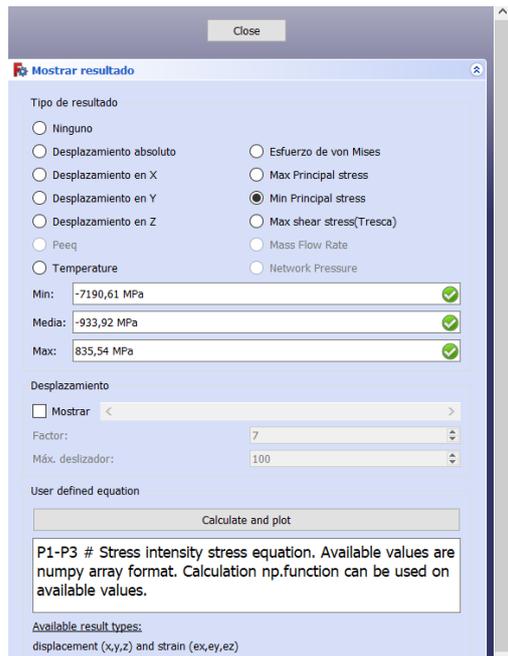


Figura C.27: Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

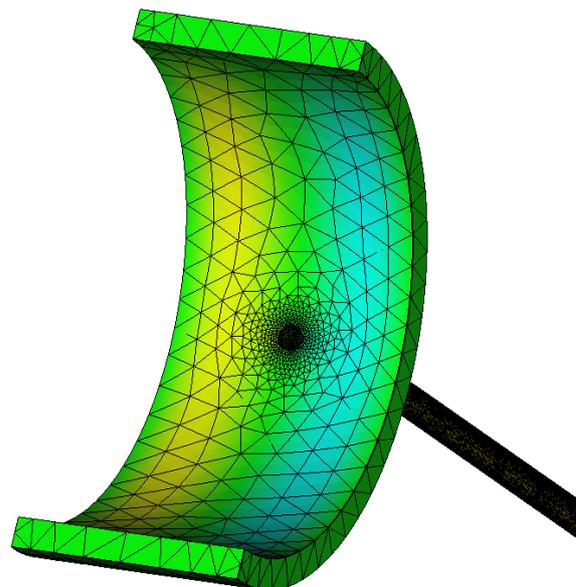
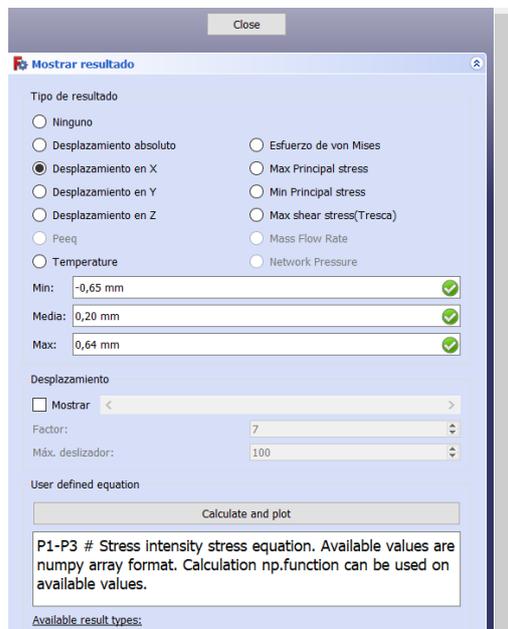
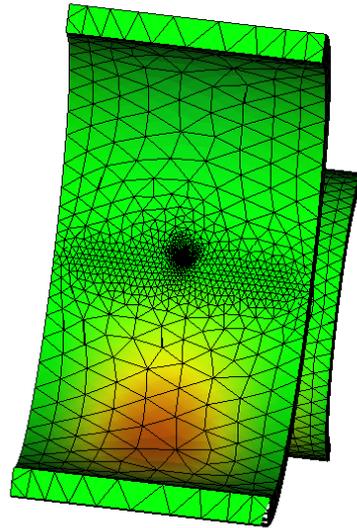
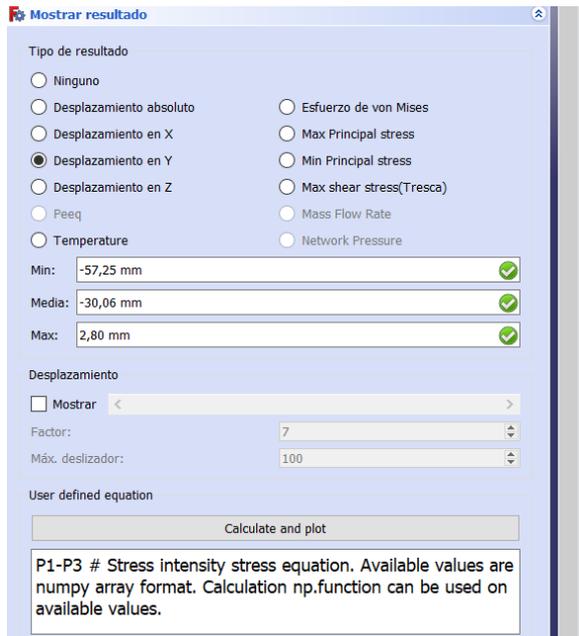


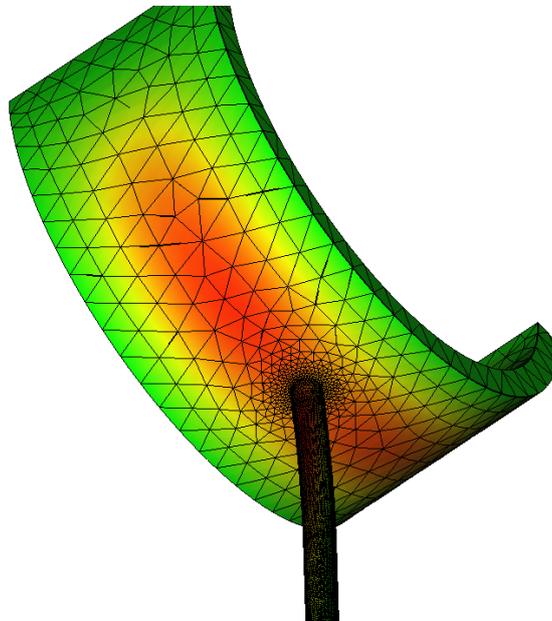
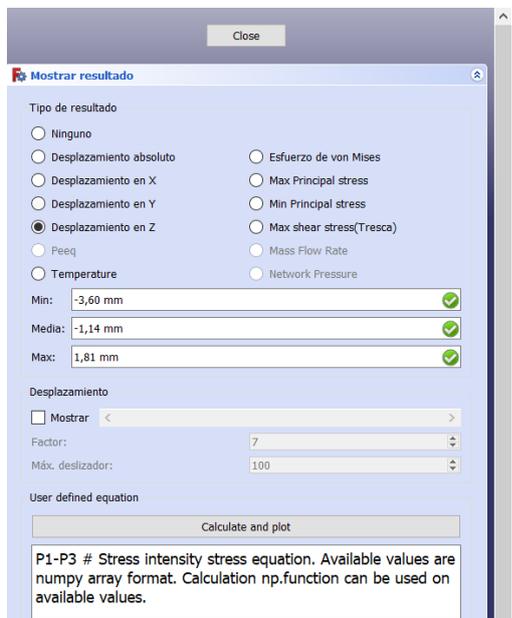
Figura C.28: Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



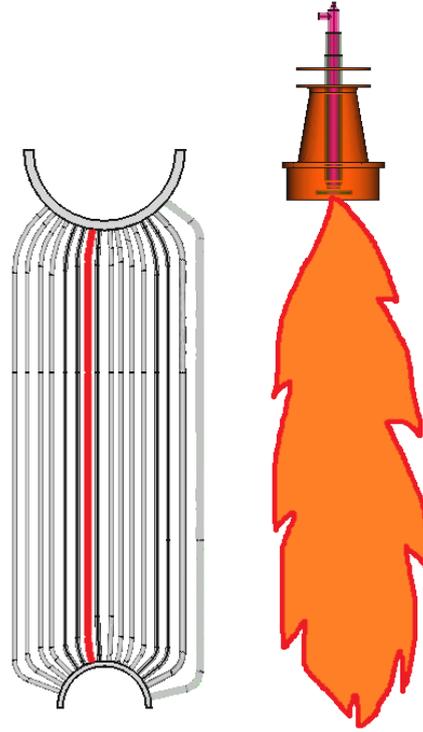
**Figura C.29:** Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



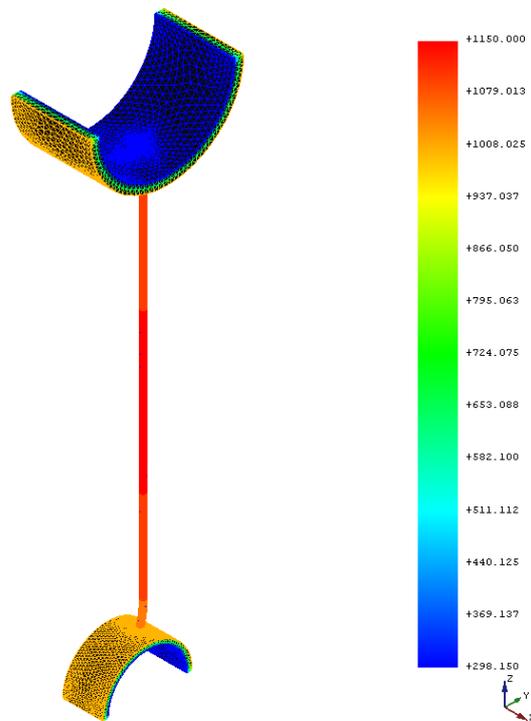
**Figura C.30:** Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



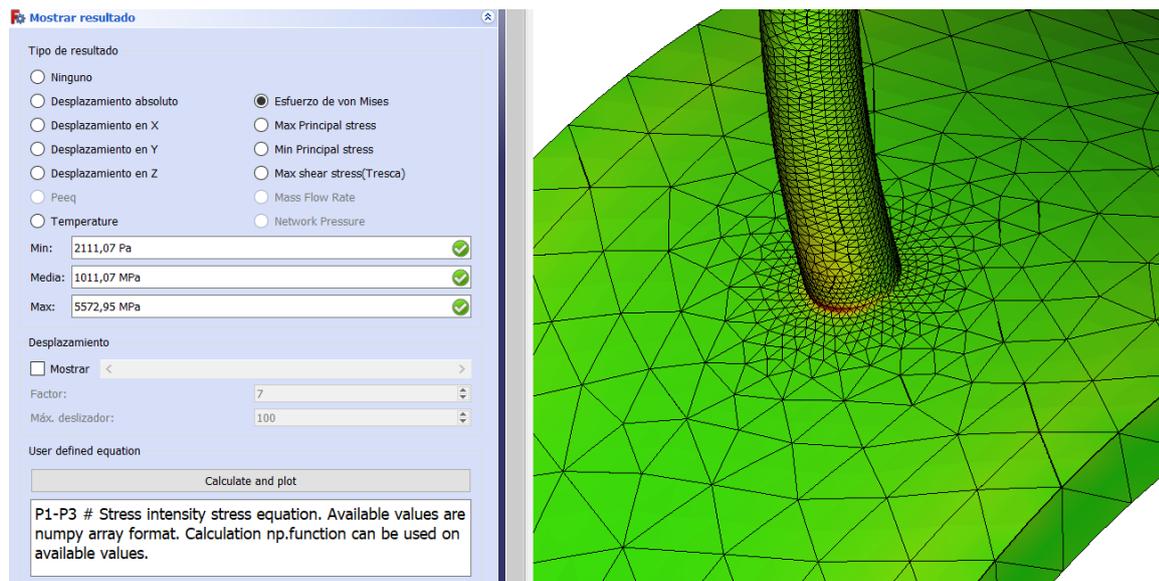
**Figura C.31:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



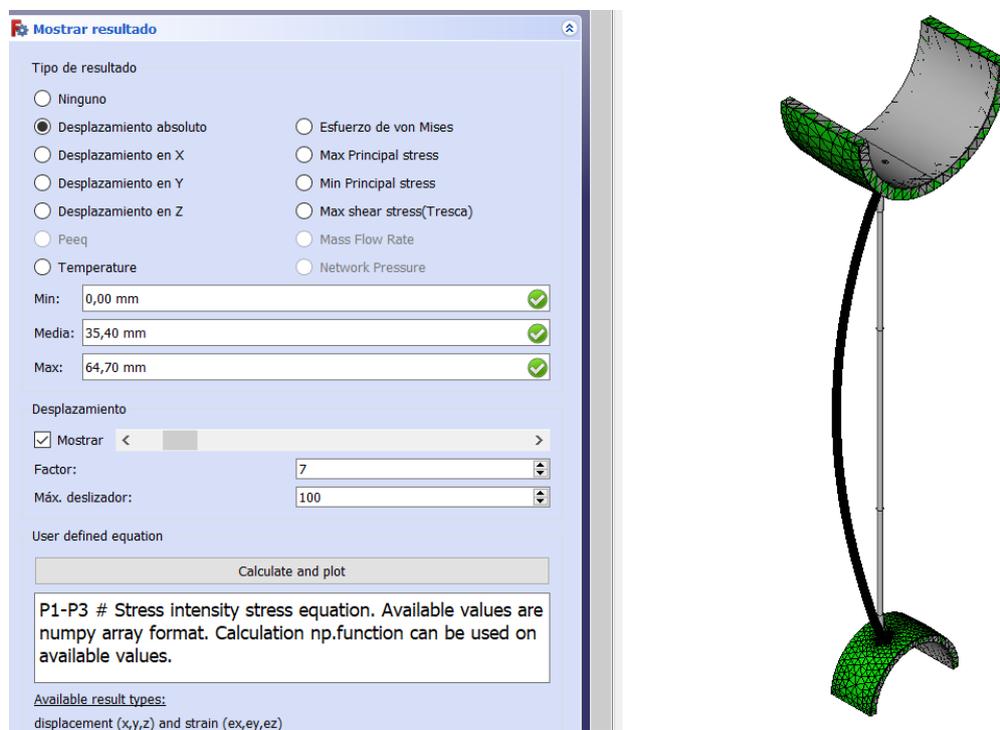
**Figura C.32:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



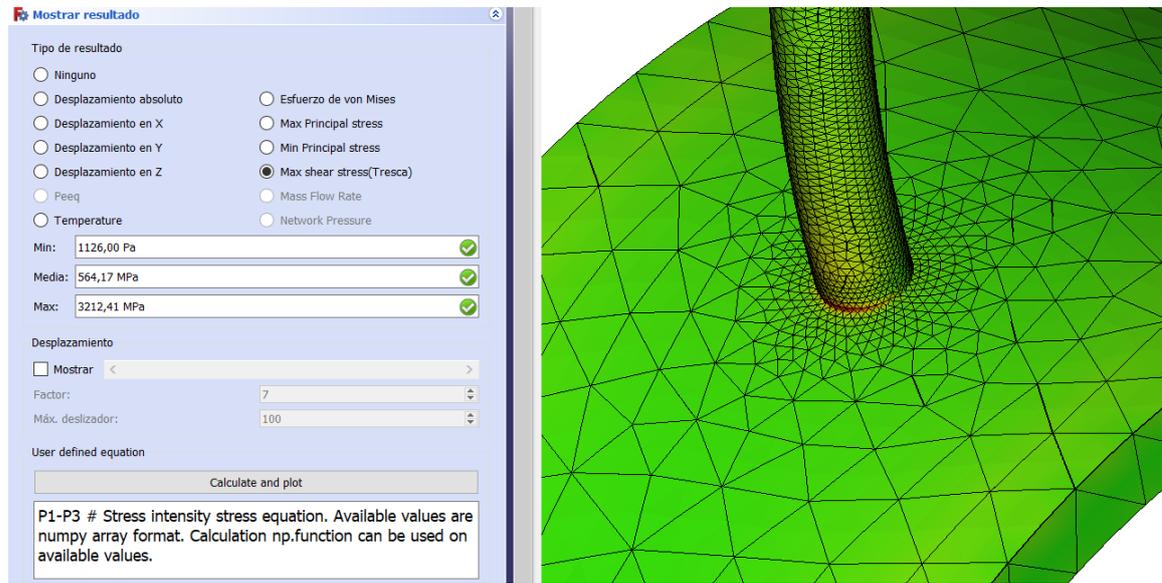
**Figura C.33:** Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



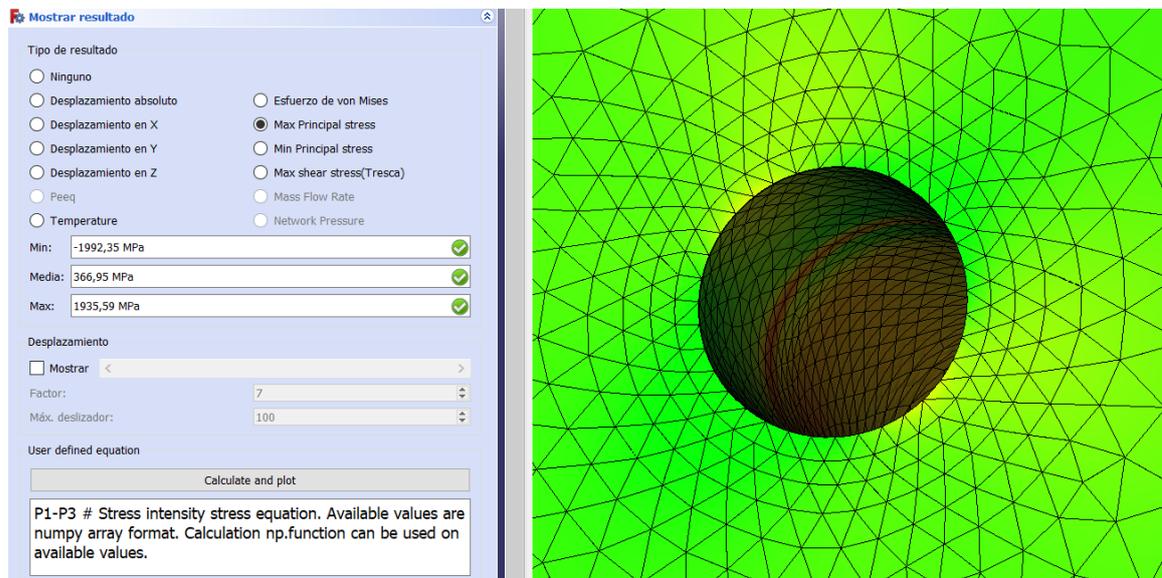
**Figura C.34:** Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



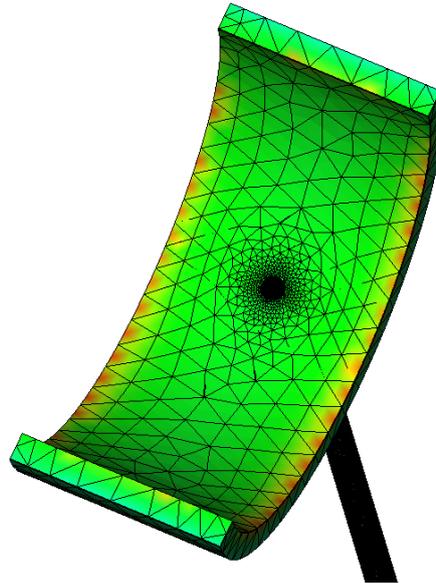
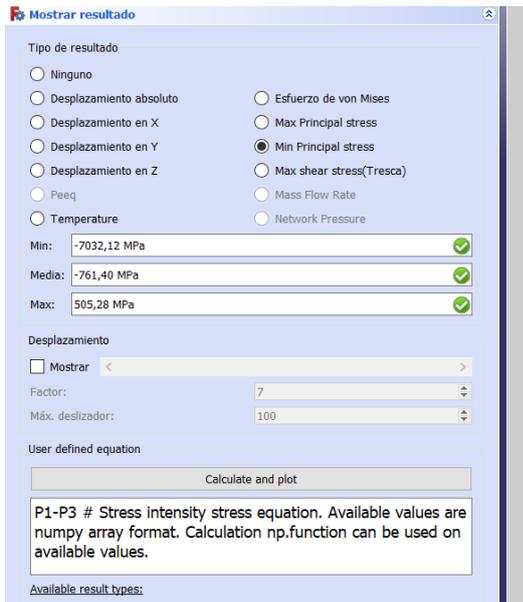
**Figura C.35:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



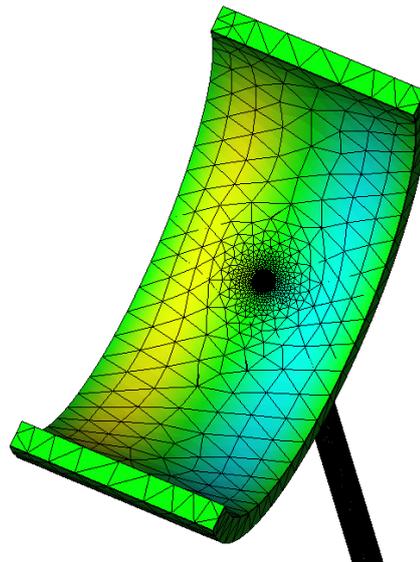
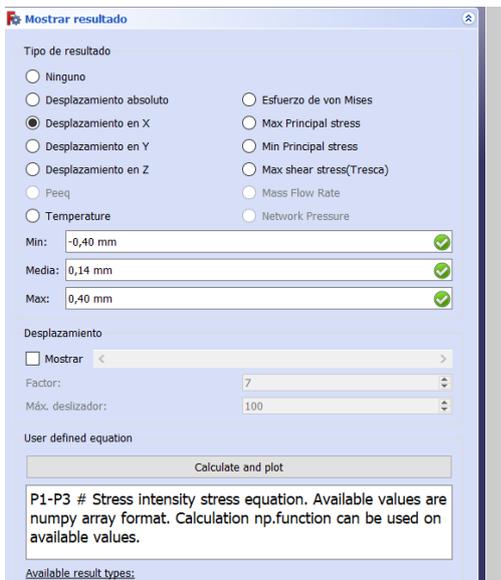
**Figura C.36:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



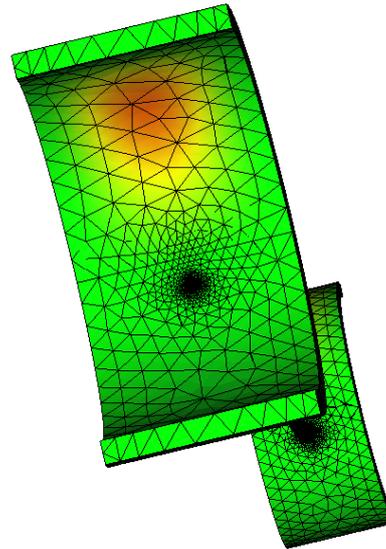
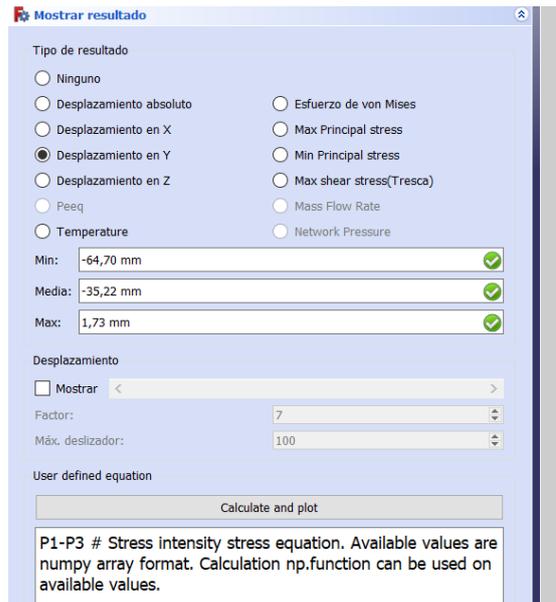
**Figura C.37:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



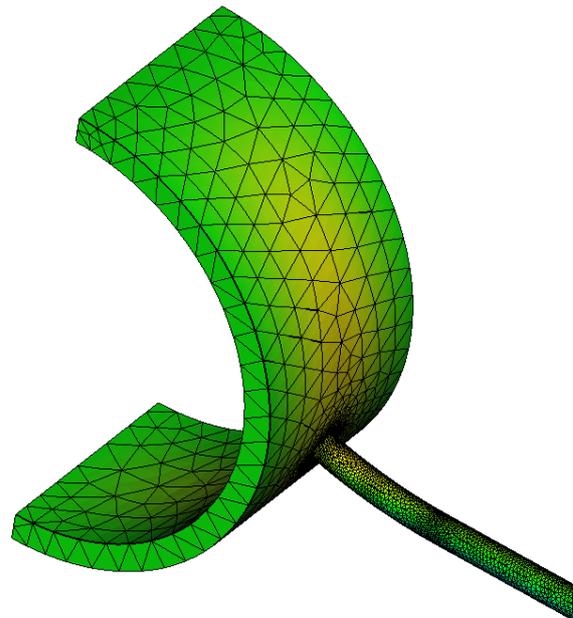
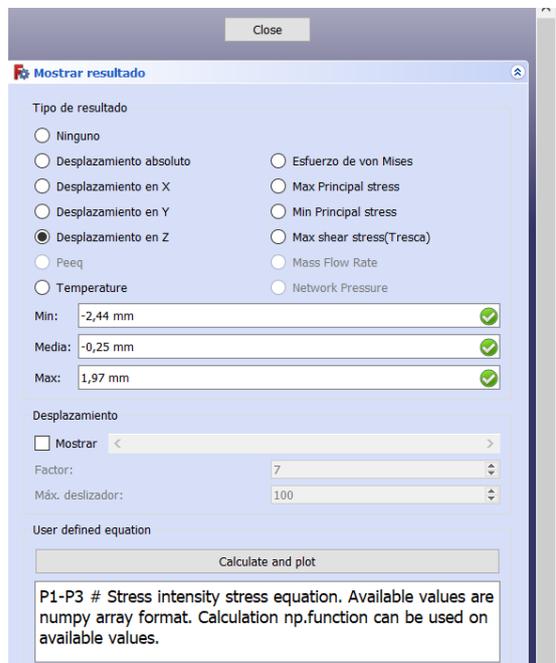
**Figura C.38:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura C.39:** Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

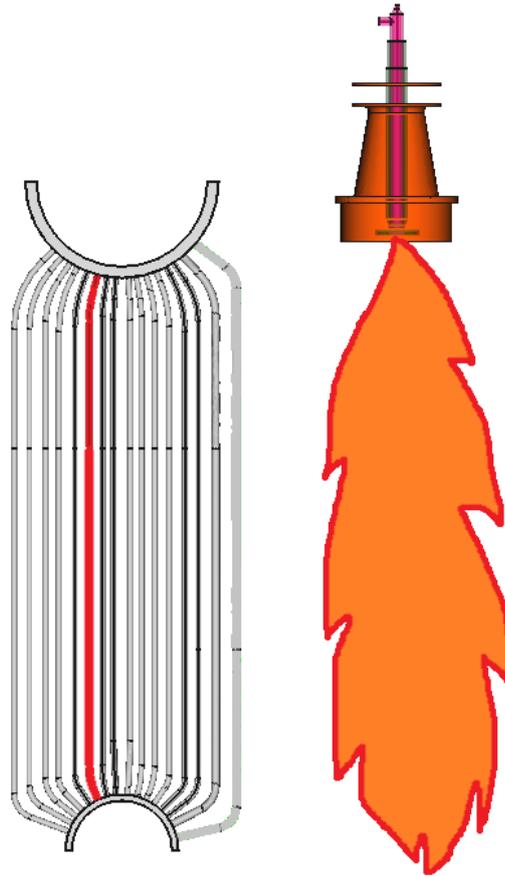


**Figura C.40:** Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

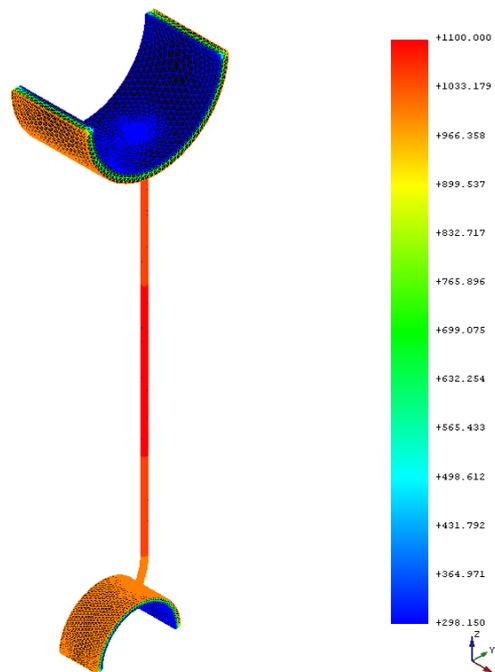


## D Estudio termomecánico del generador de vapor (3)



**Figura D.1:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.2:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

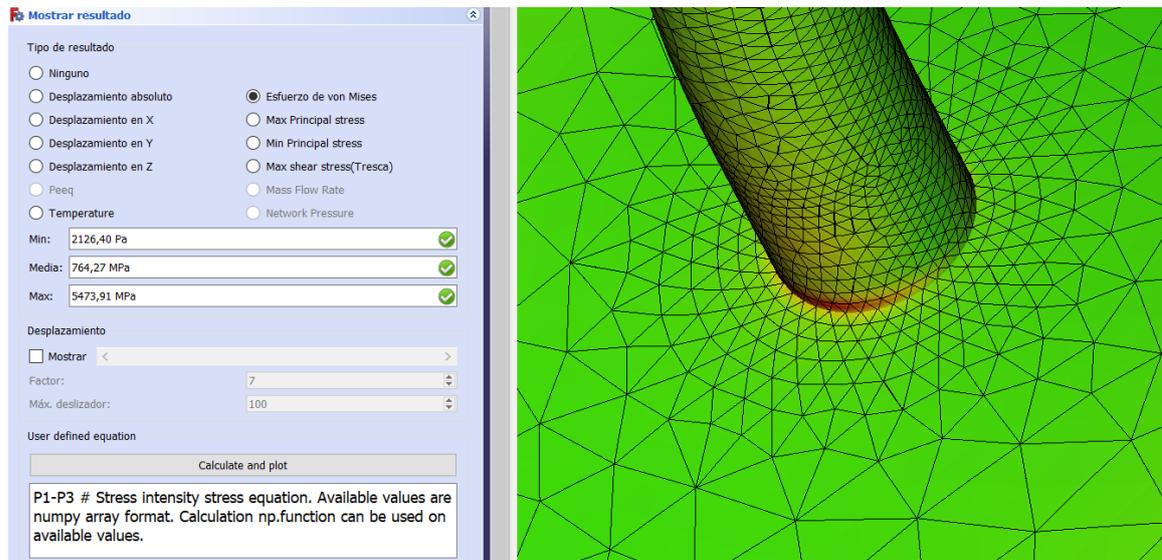


Figura D.3: Esfuerzo de Von Misses en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

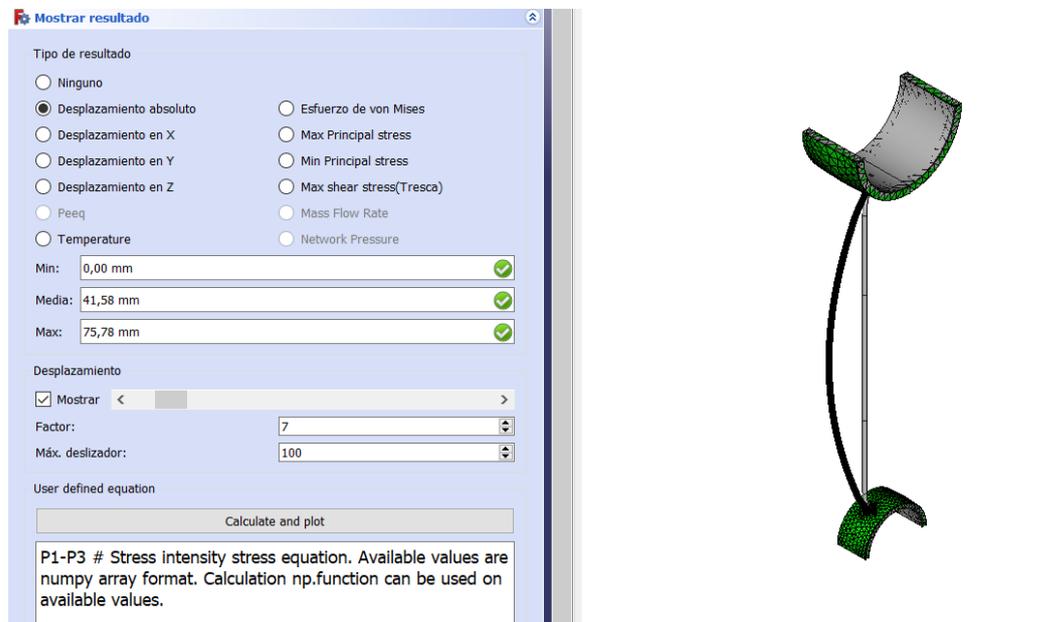
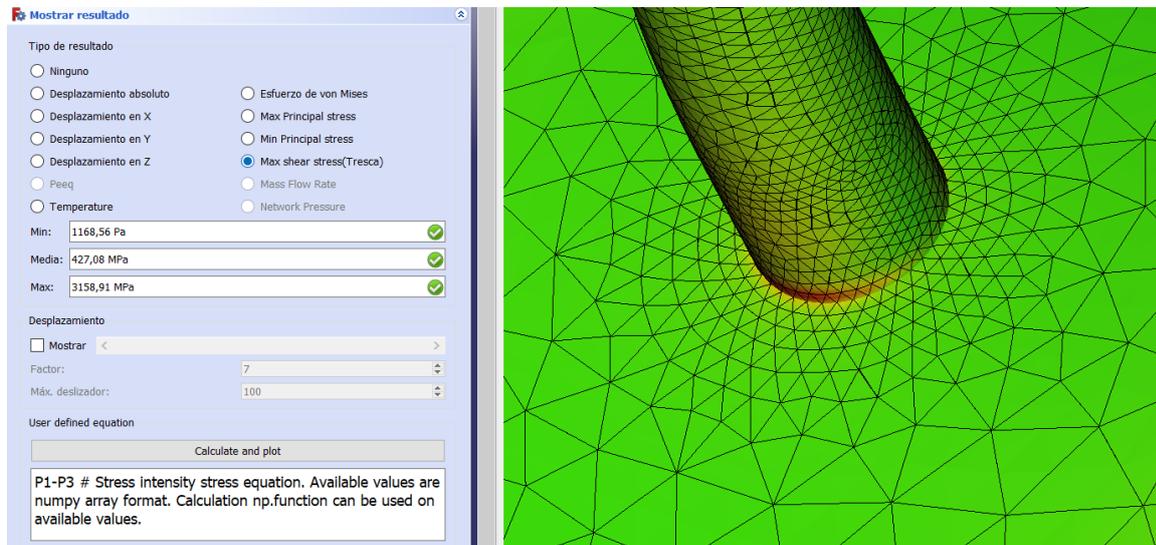


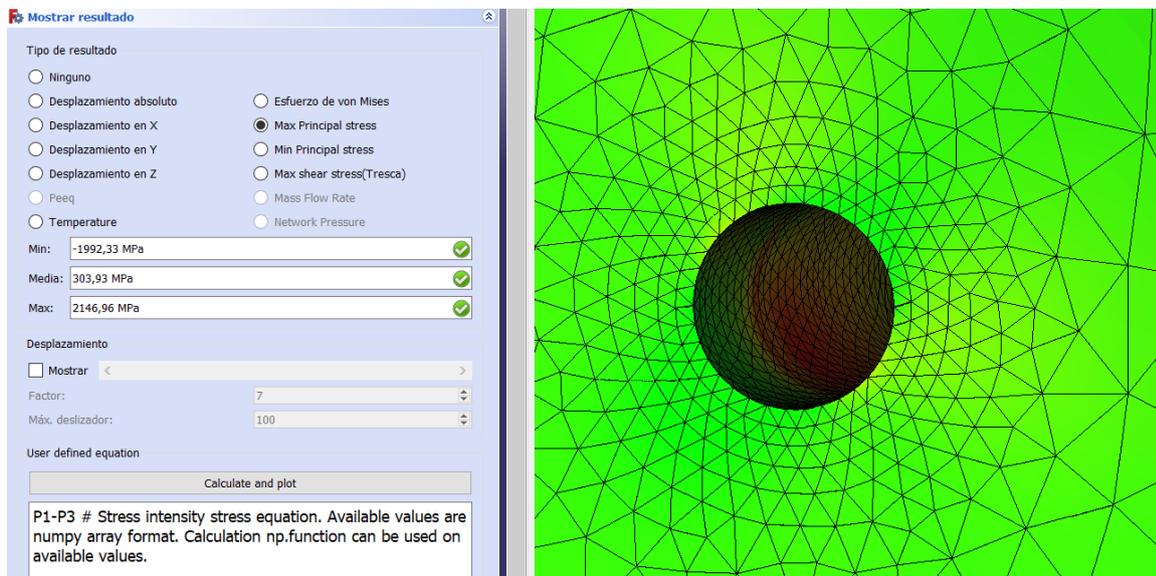
Figura D.4: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



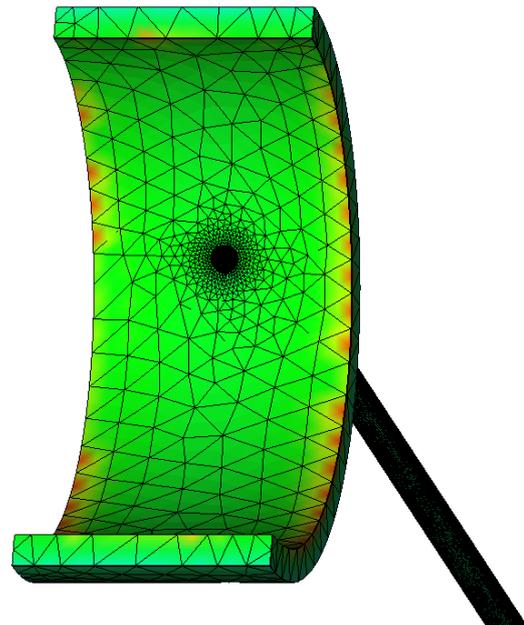
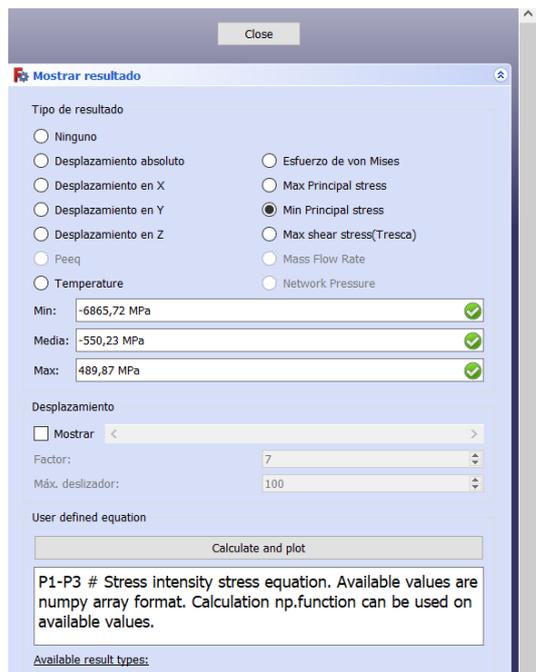
**Figura D.5:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



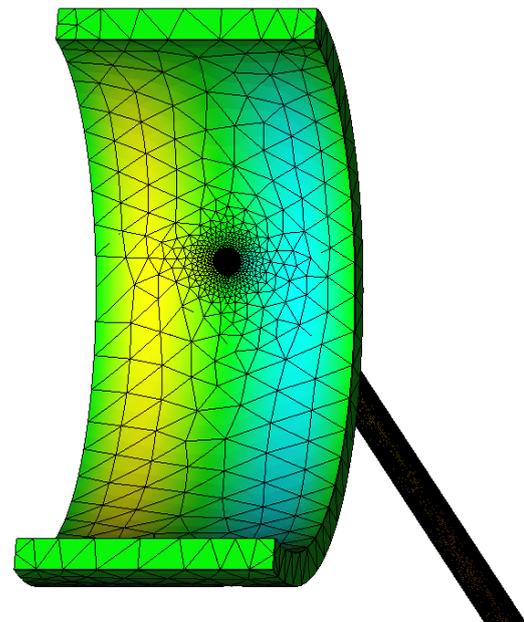
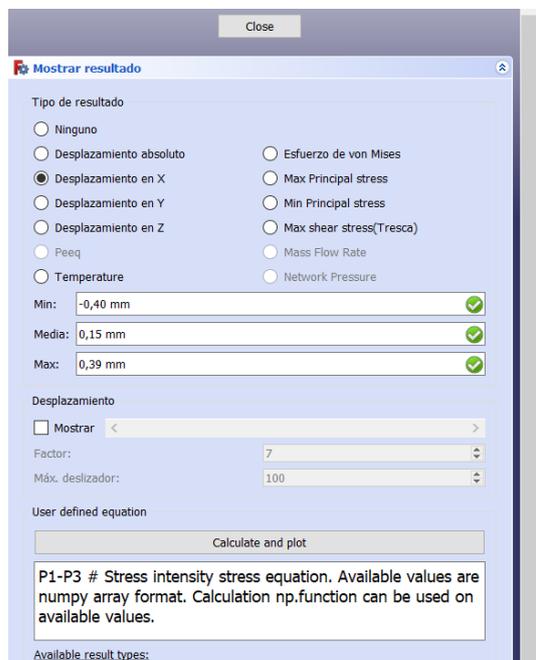
**Figura D.6:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.7:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.8:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

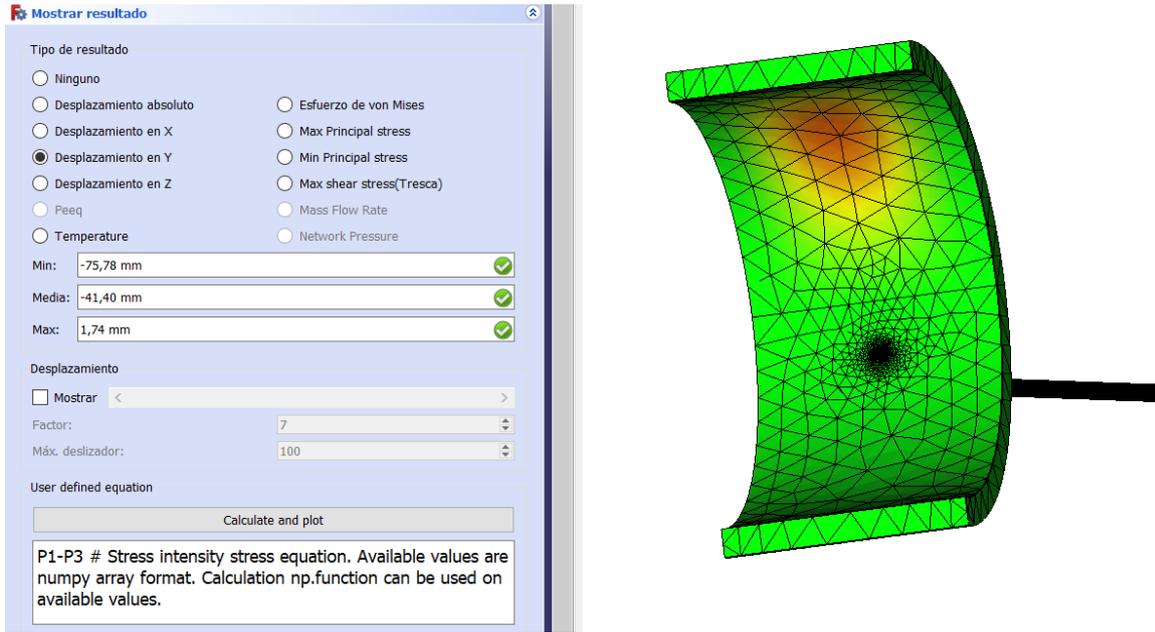


Figura D.9: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

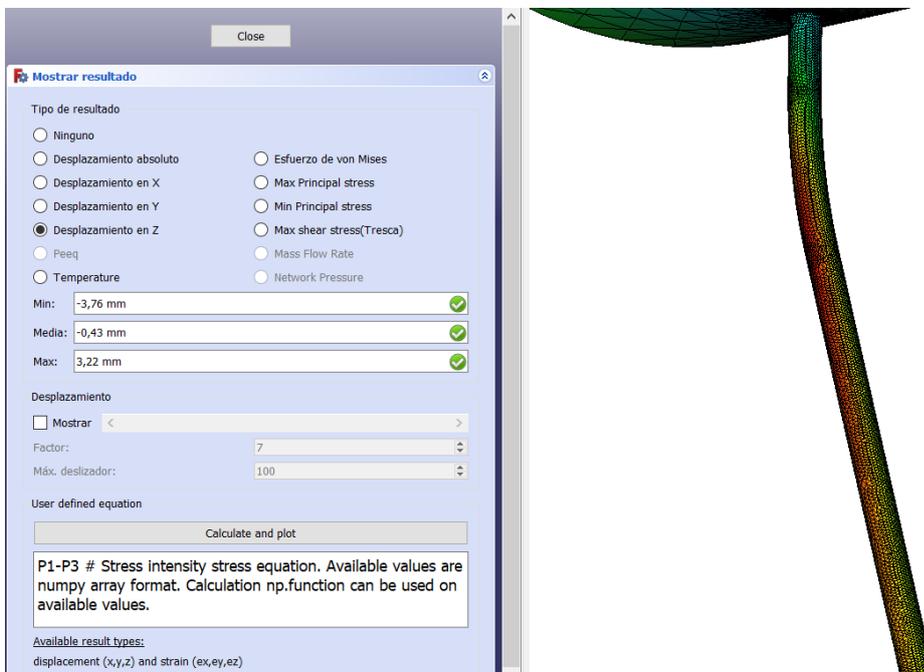
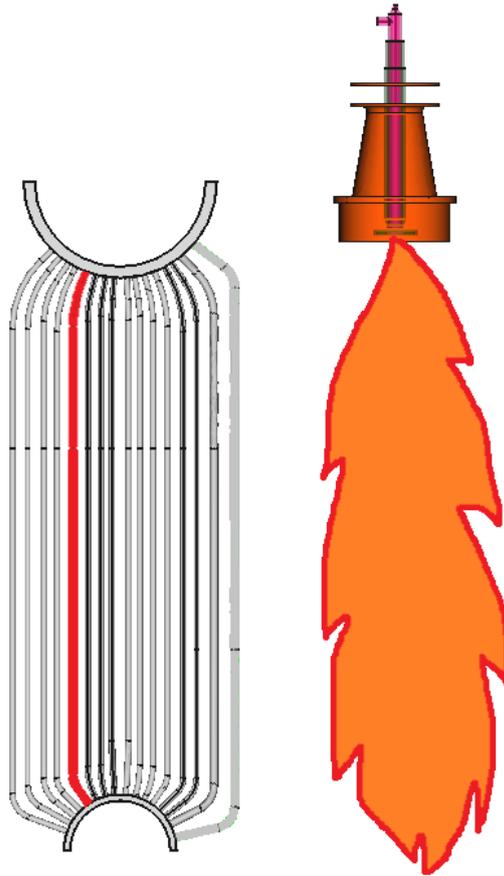


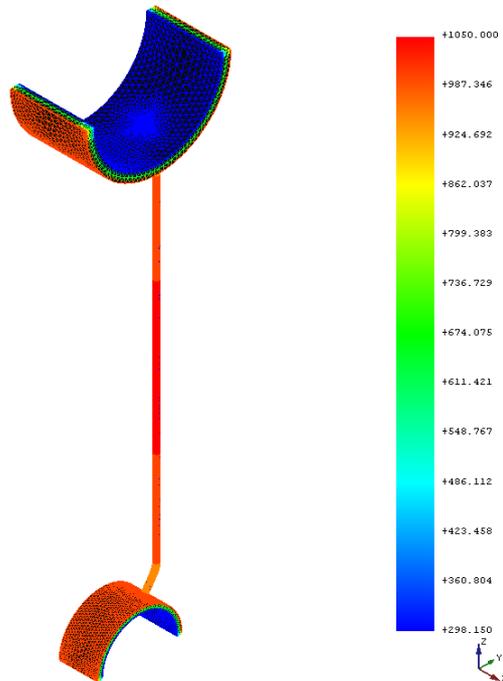
Figura D.10: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



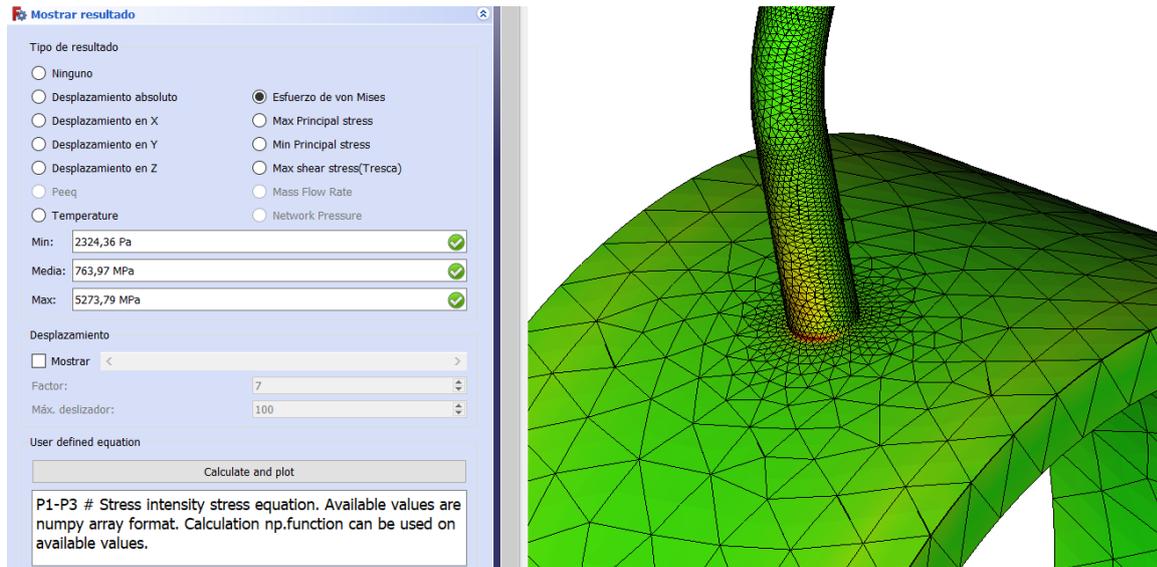
**Figura D.11:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



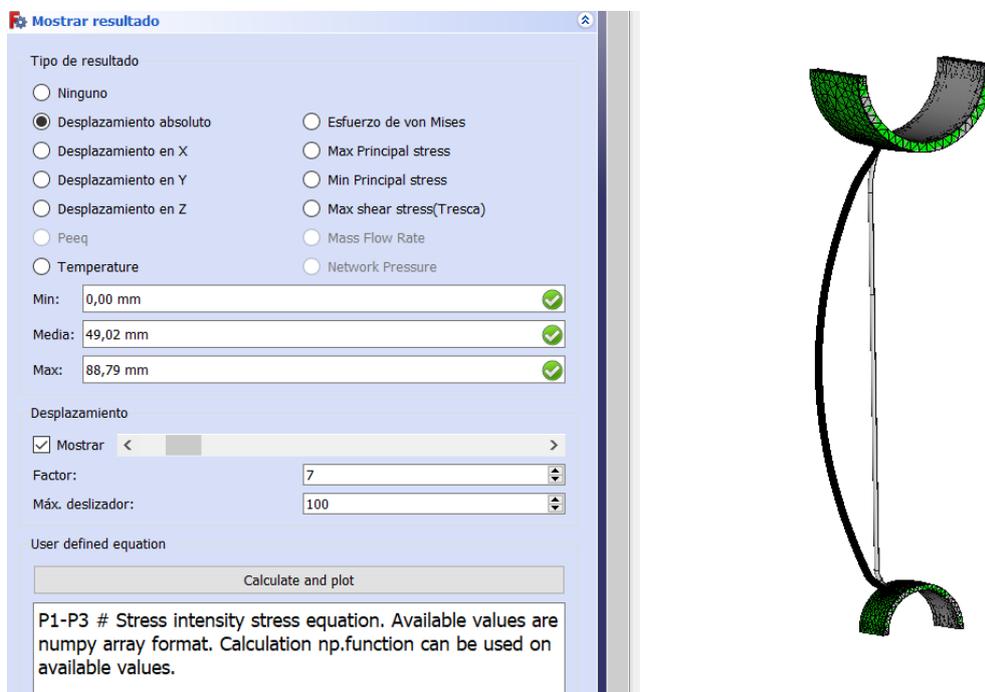
**Figura D.12:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.13:** Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.14:** Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

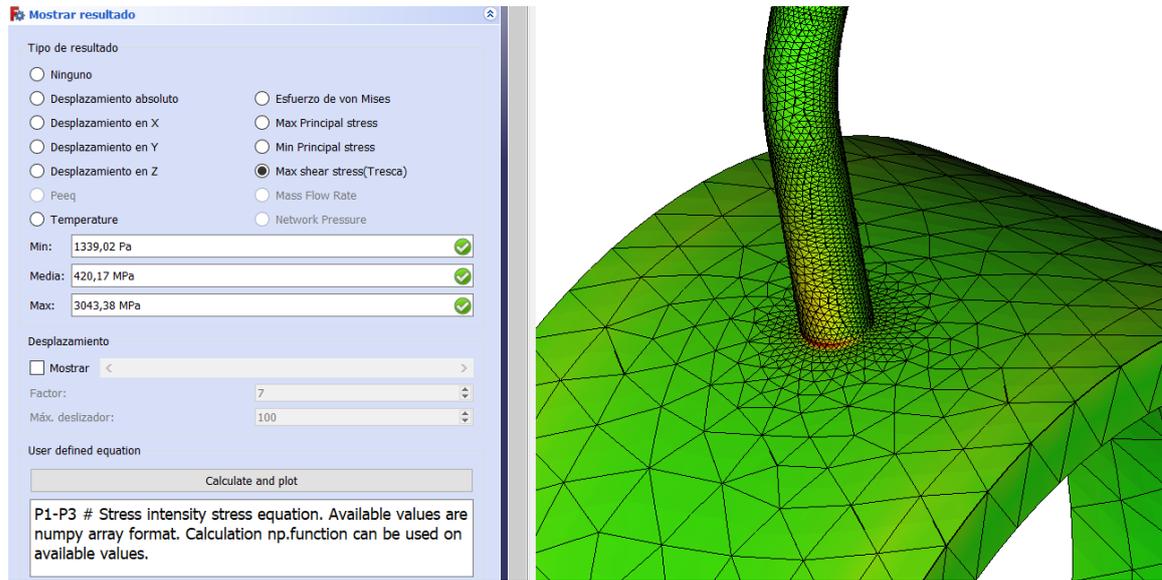


Figura D.15: Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

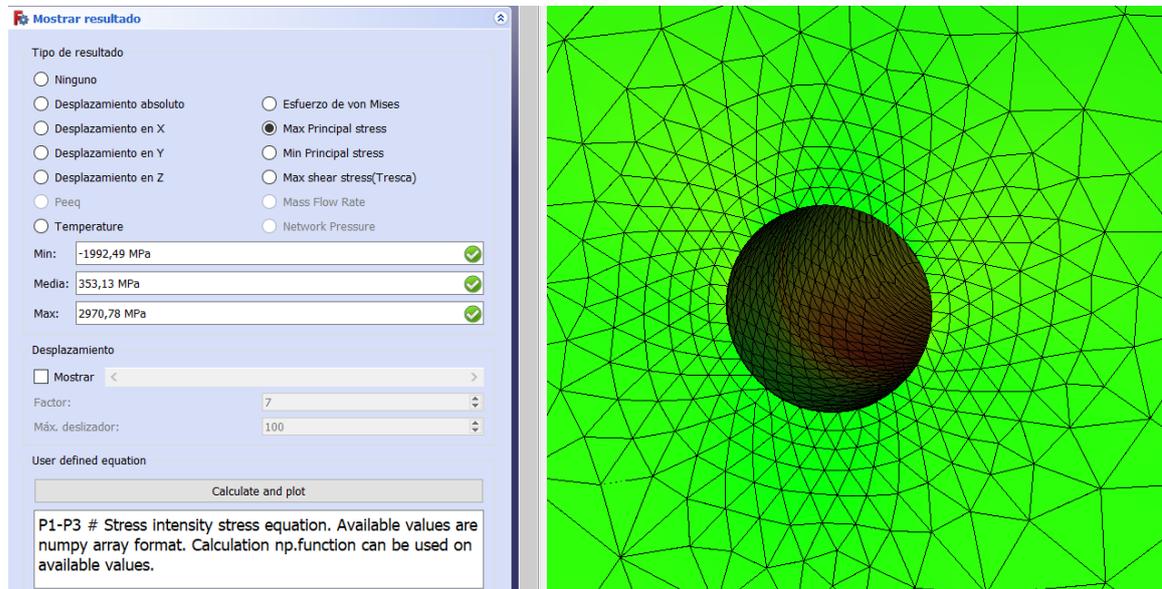
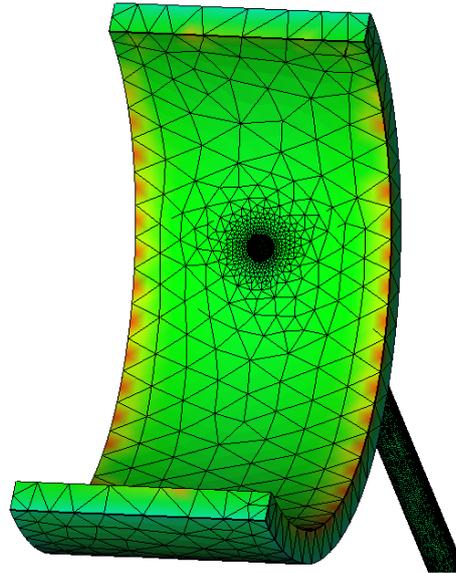
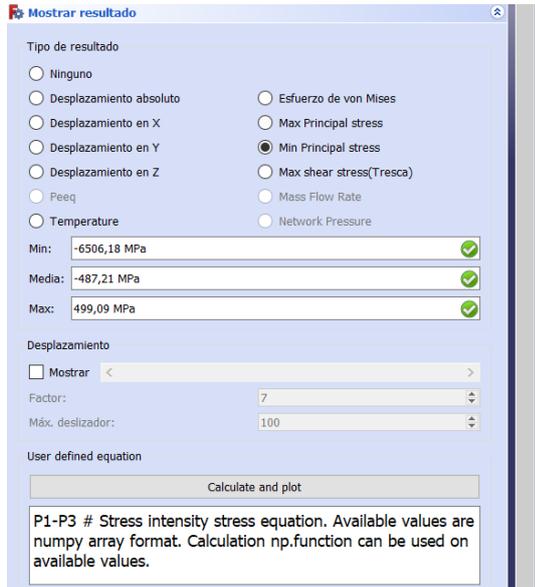


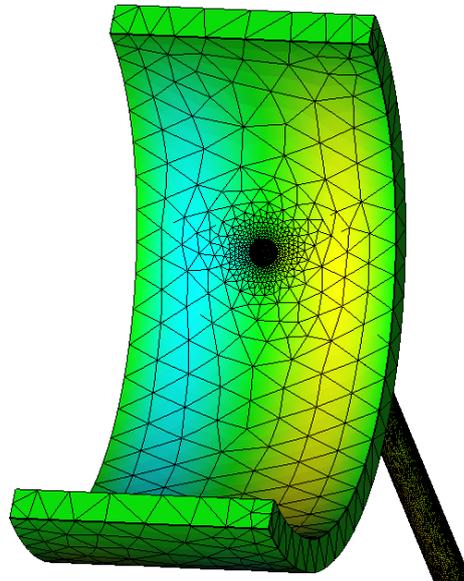
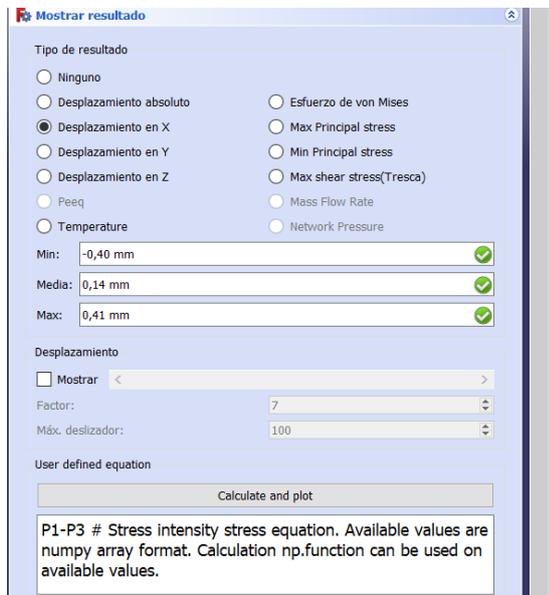
Figura D.16: Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.17:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.18:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

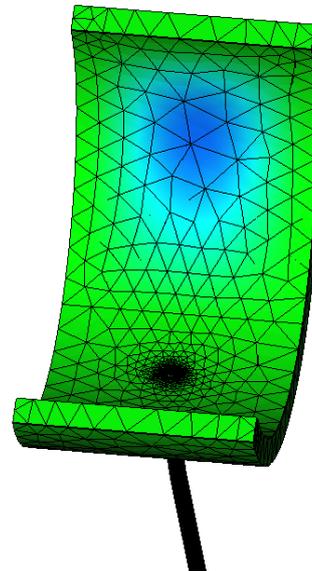
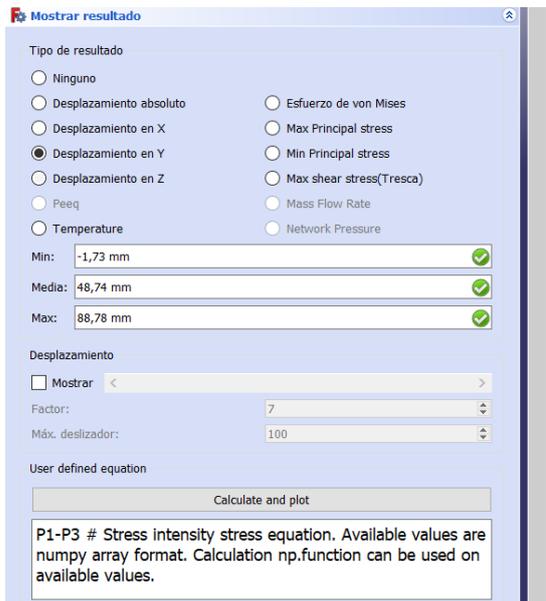


Figura D.19: Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

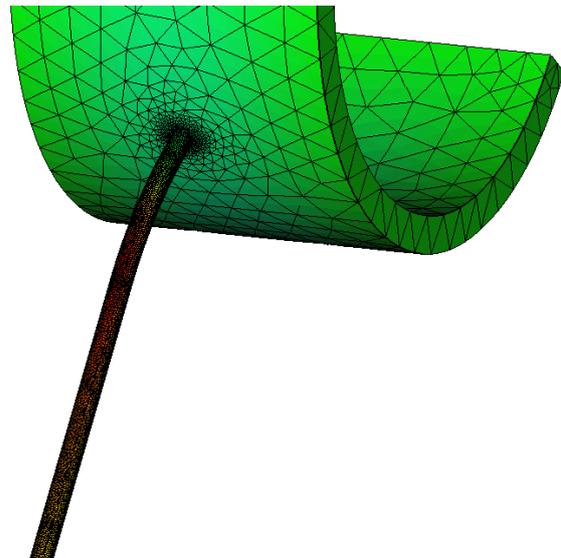
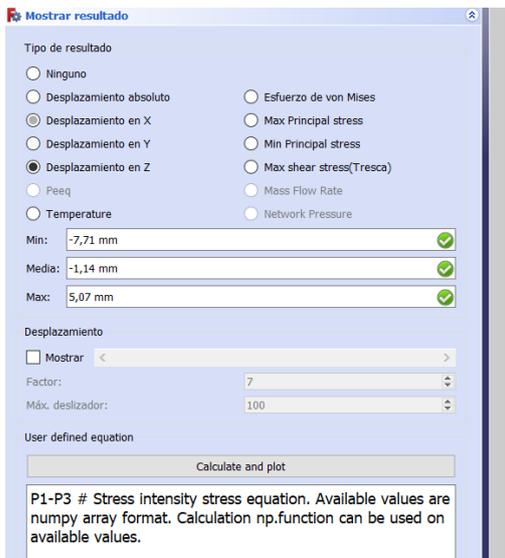
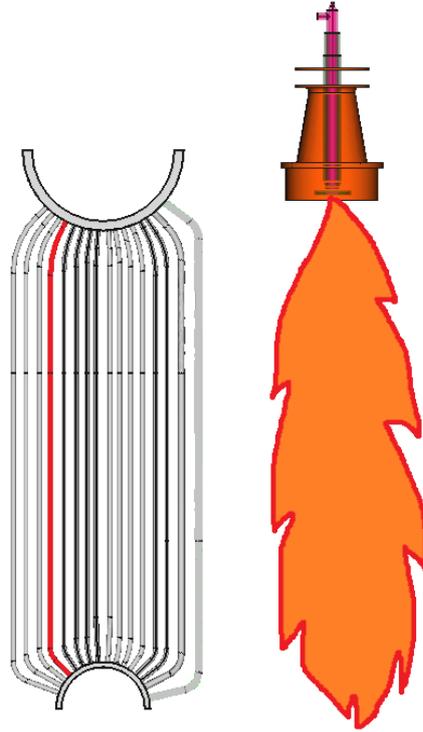


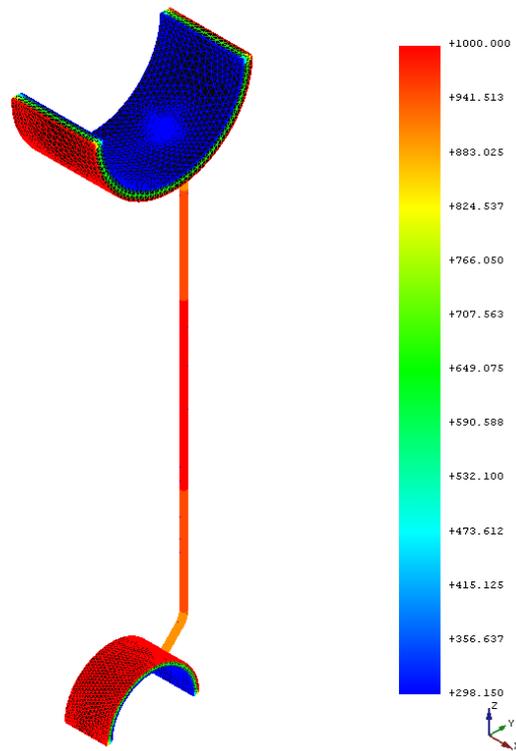
Figura D.20: Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.21:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.22:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

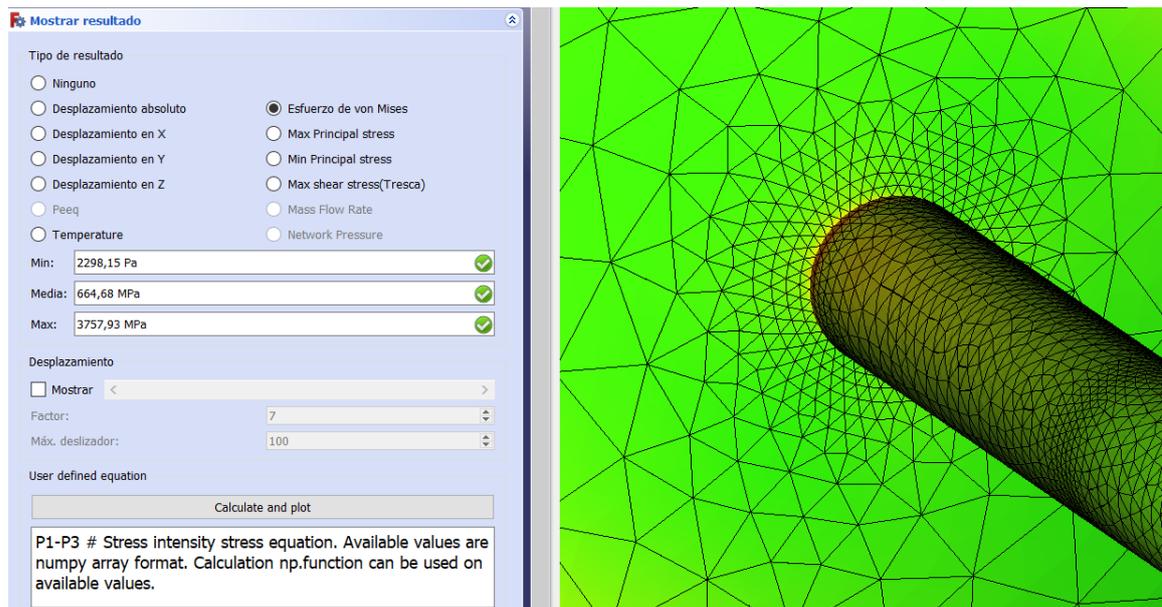


Figura D.23: Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

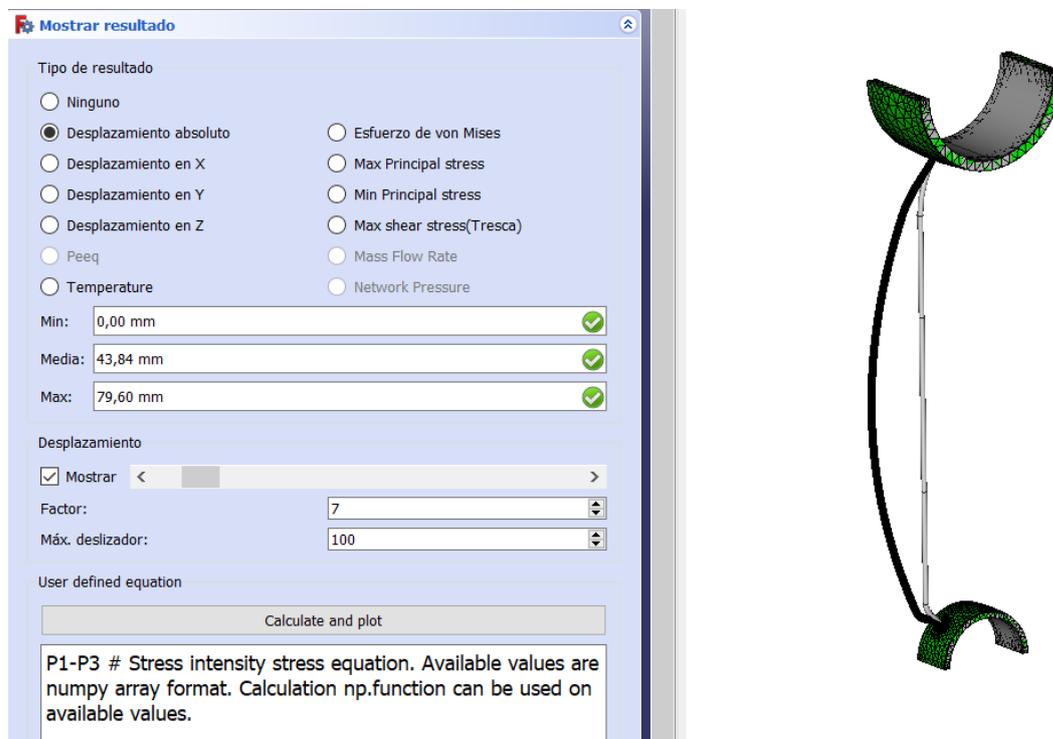
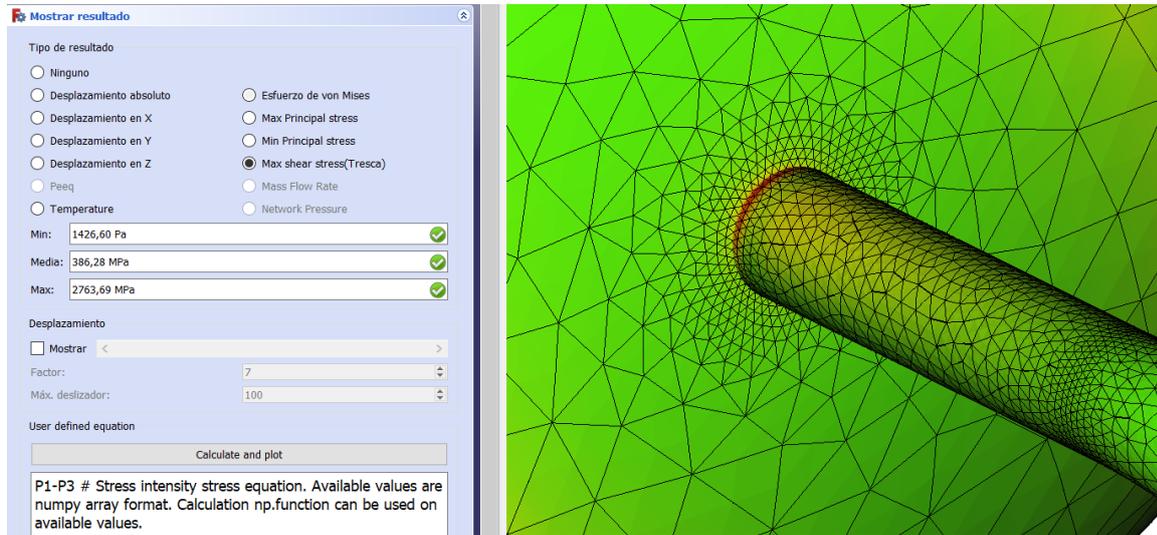


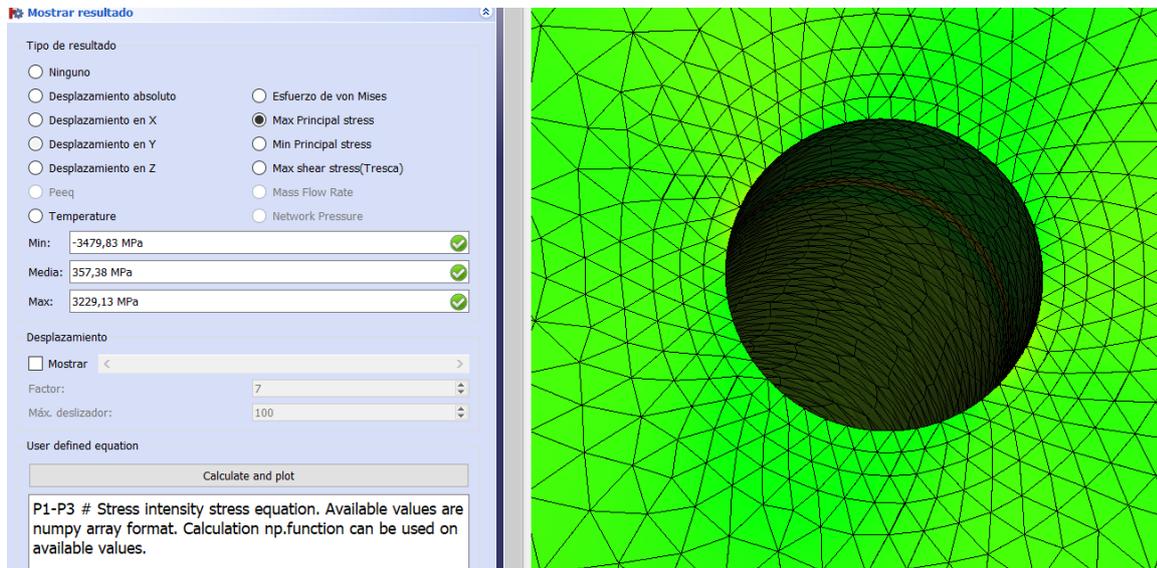
Figura D.24: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.25:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.26:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

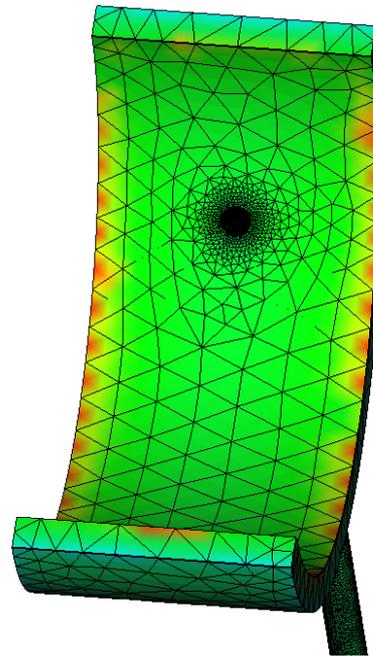
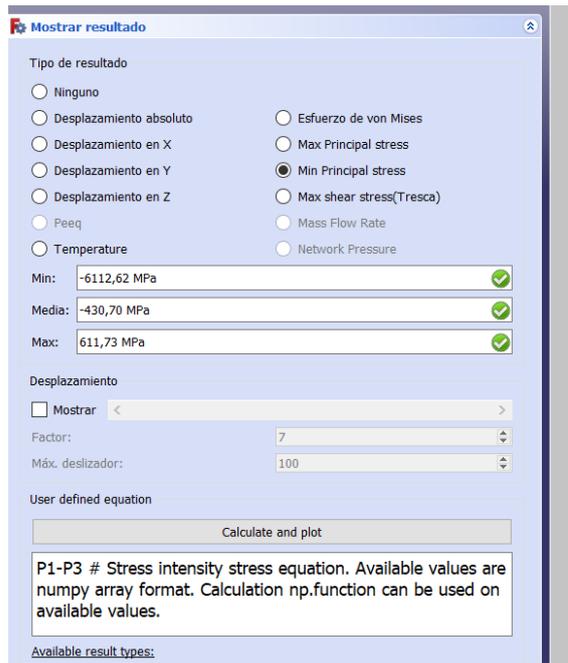


Figura D.27: Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

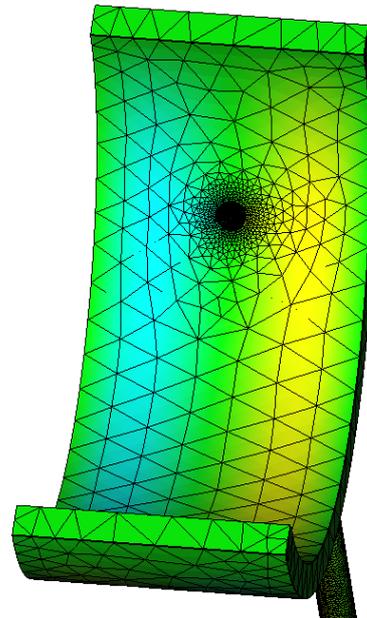
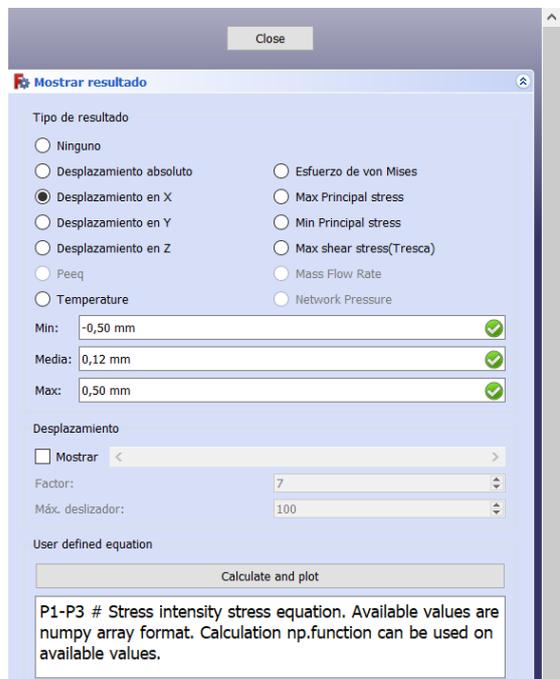
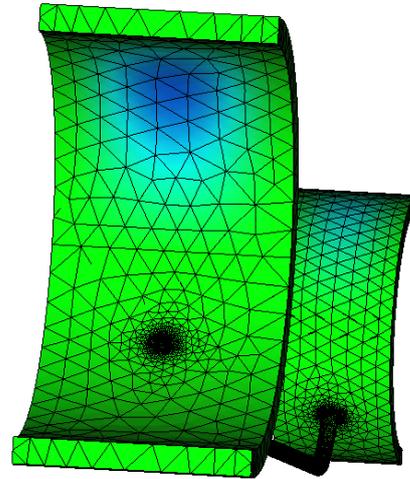
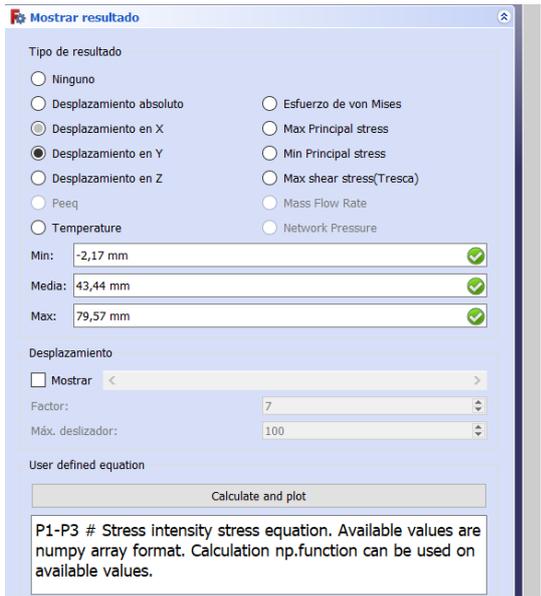


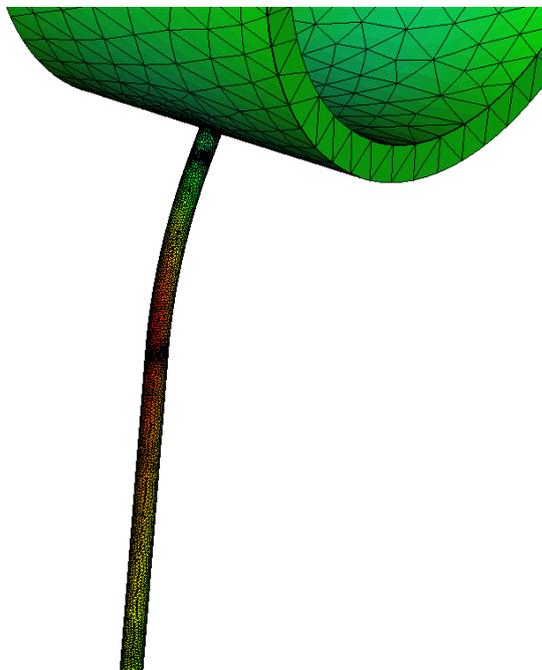
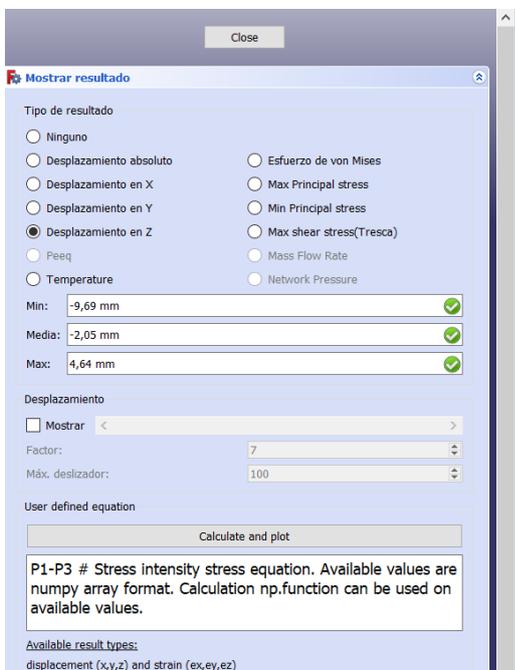
Figura D.28: Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



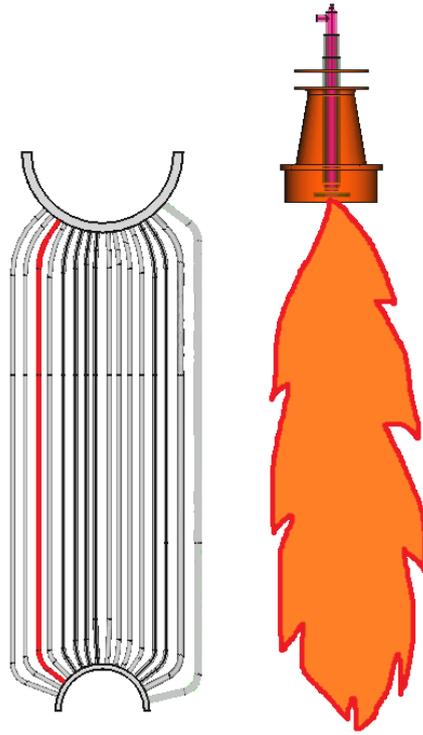
**Figura D.29:** Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



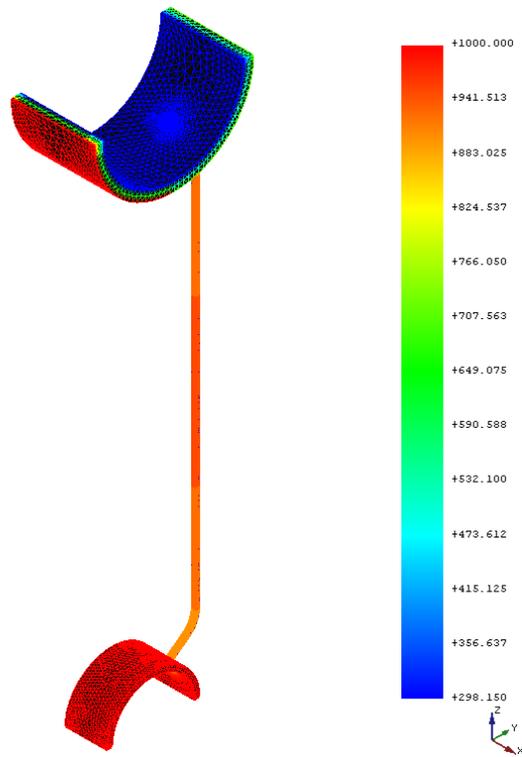
**Figura D.30:** Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.31:** Banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.32:** Temperaturas en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

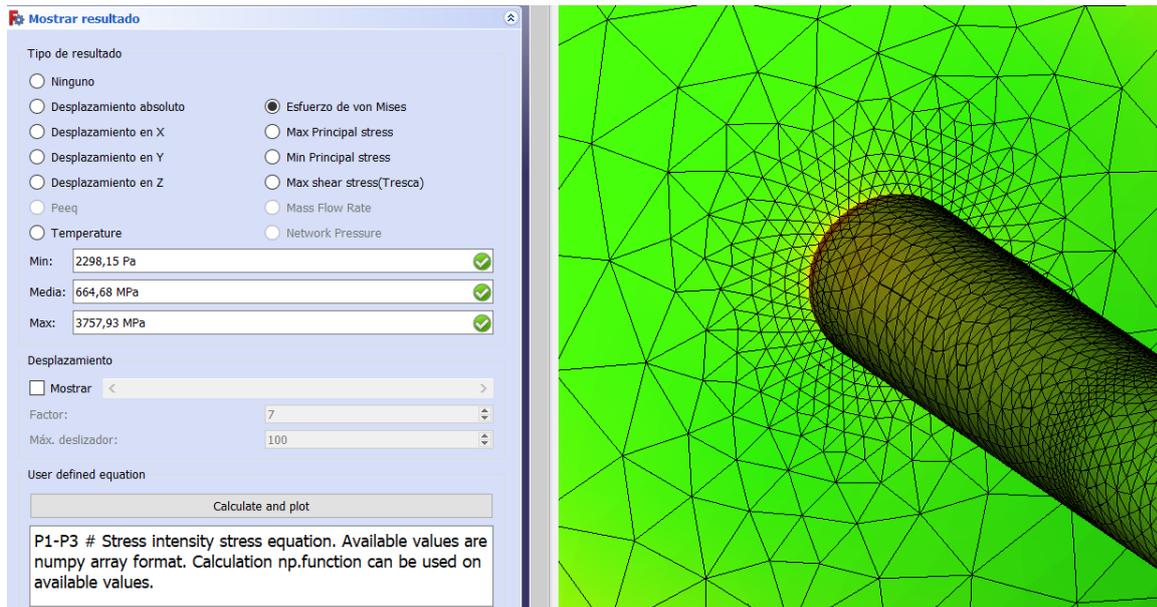


Figura D.33: Esfuerzo de Von Mises en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

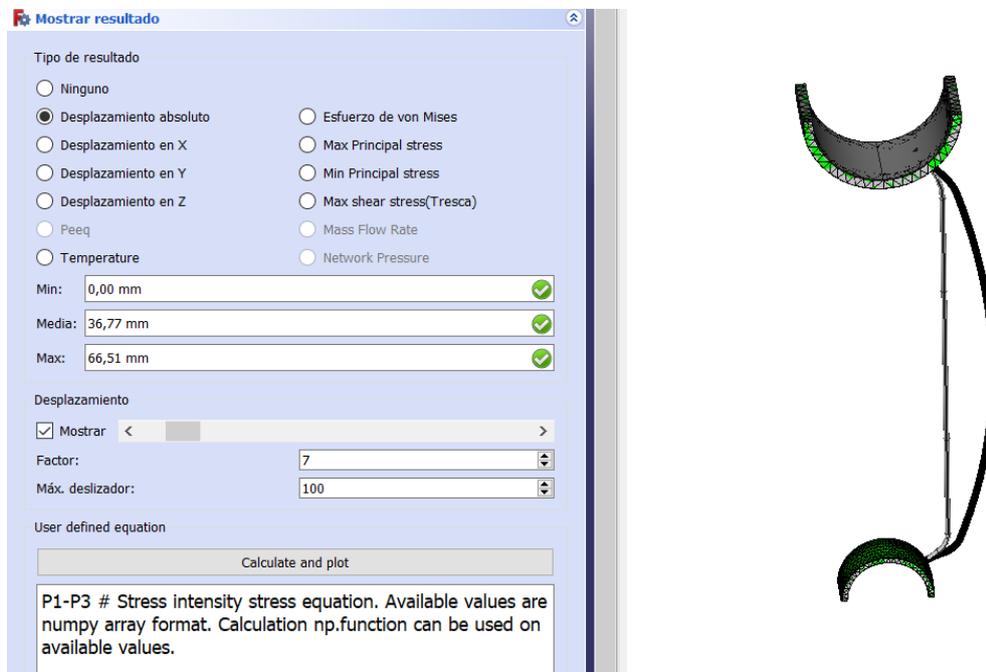
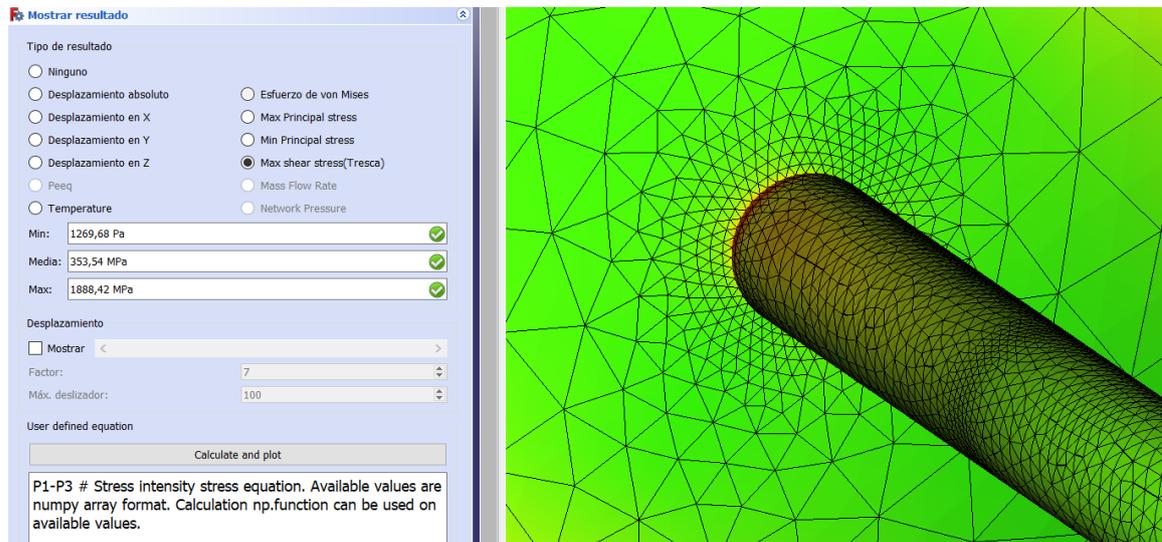


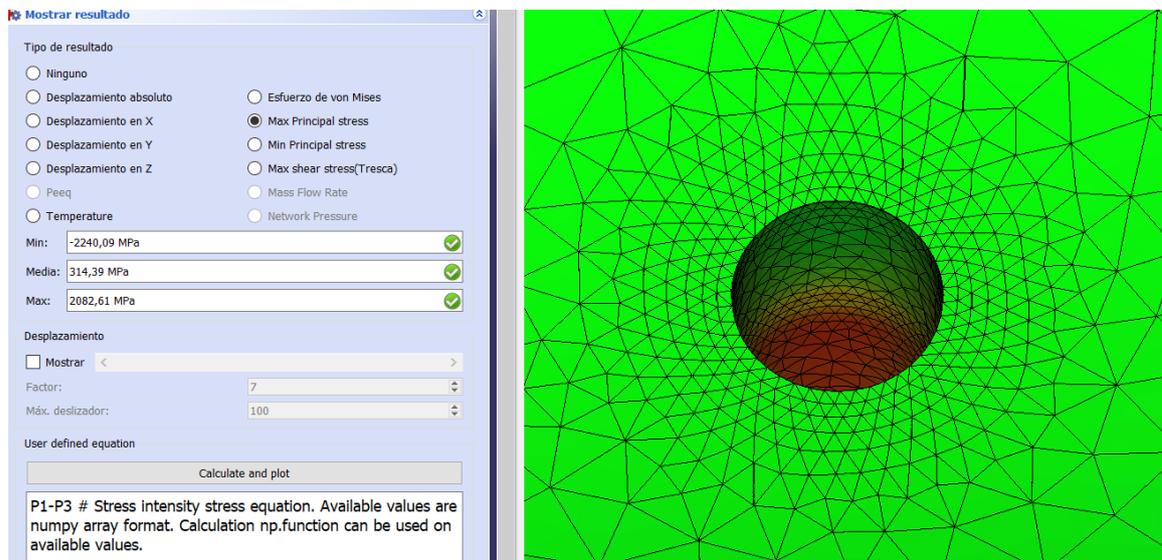
Figura D.34: Desplazamiento absoluto en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



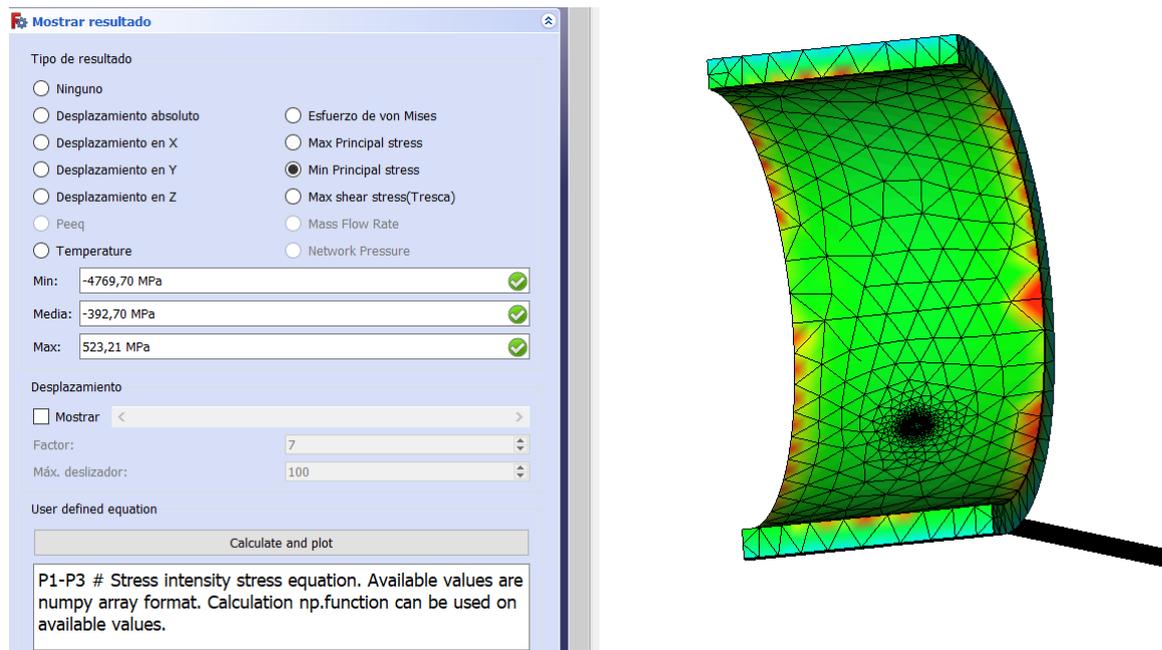
**Figura D.35:** Esfuerzos cortantes en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



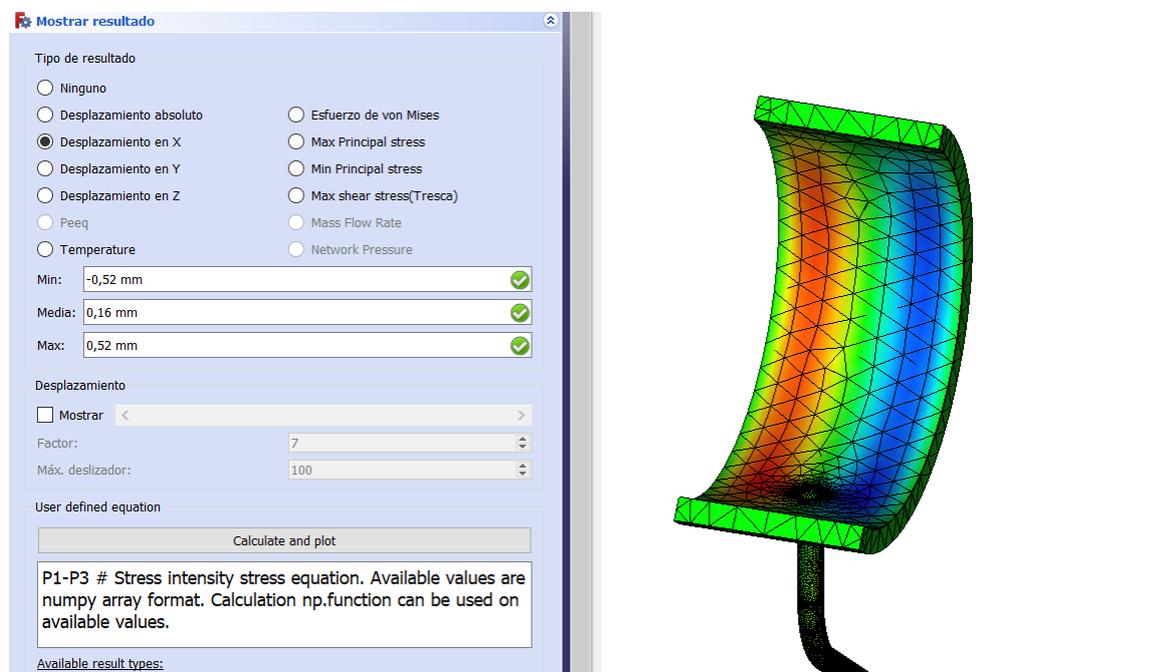
**Figura D.36:** Esfuerzo de tracción en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



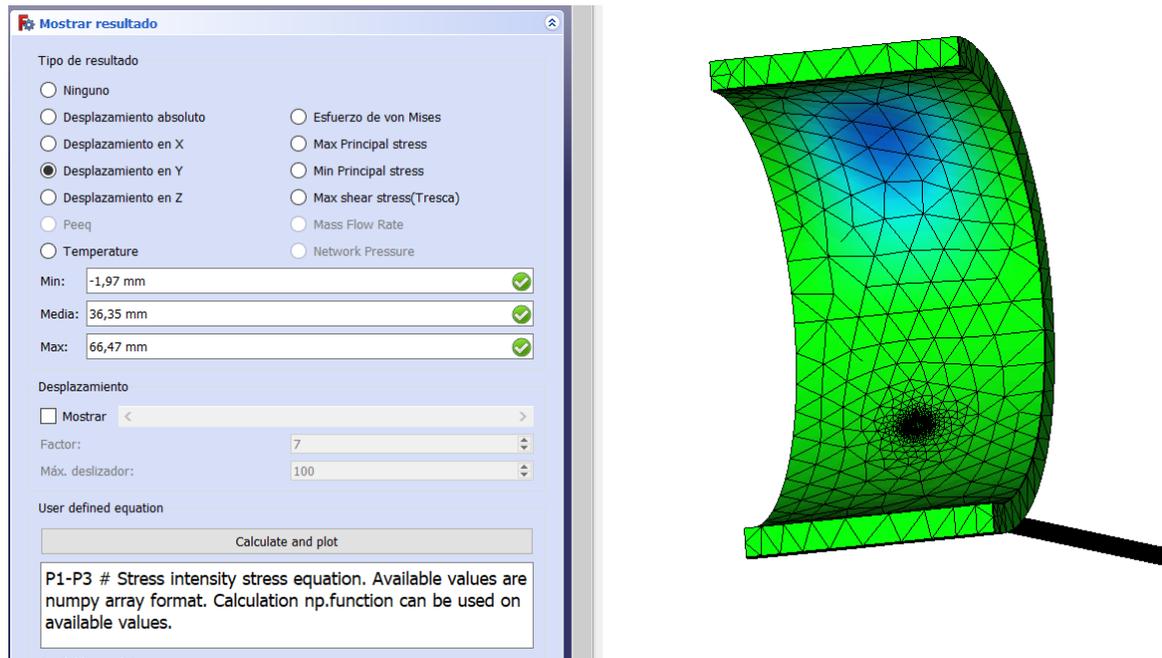
**Figura D.37:** Esfuerzo de compresión en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



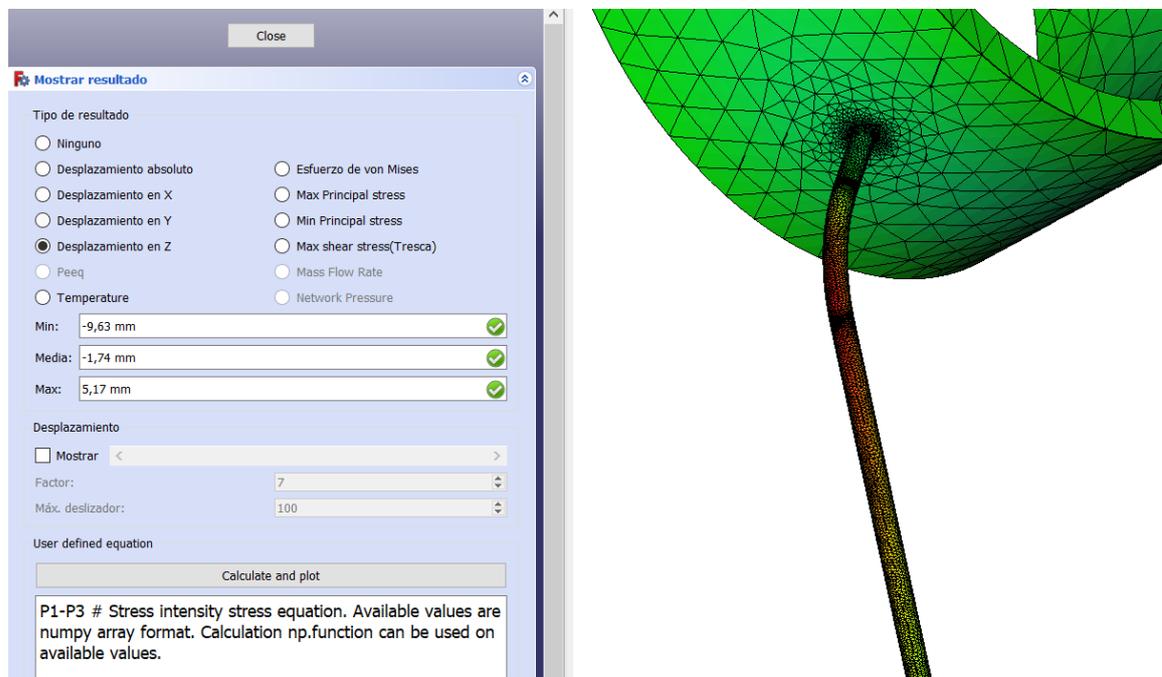
**Figura D.38:** Desplazamiento en el eje X en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura D.39:** Desplazamiento en el eje Y en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

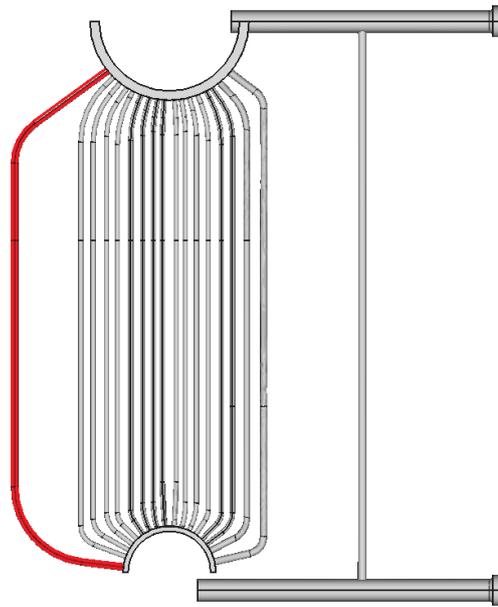


**Figura D.40:** Desplazamiento en el eje Z en el banco de tubos trasero del generador

Fuente: Elaboración propia

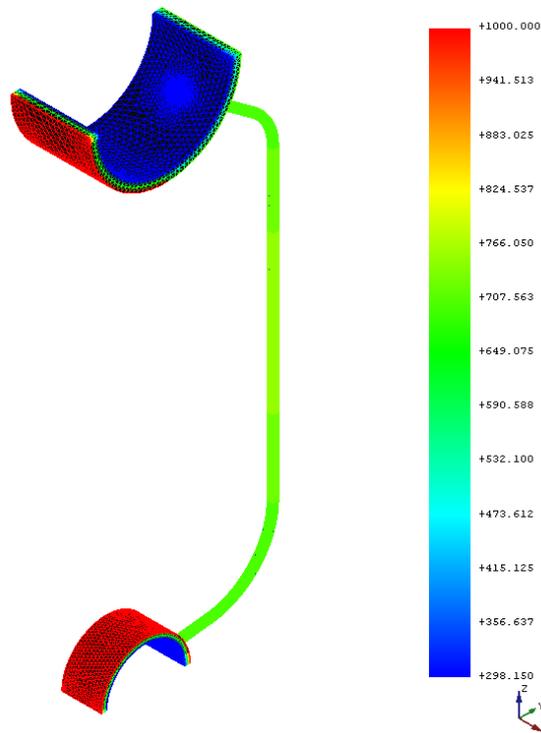


## **E Estudio termomecánico del generador de vapor (4)**



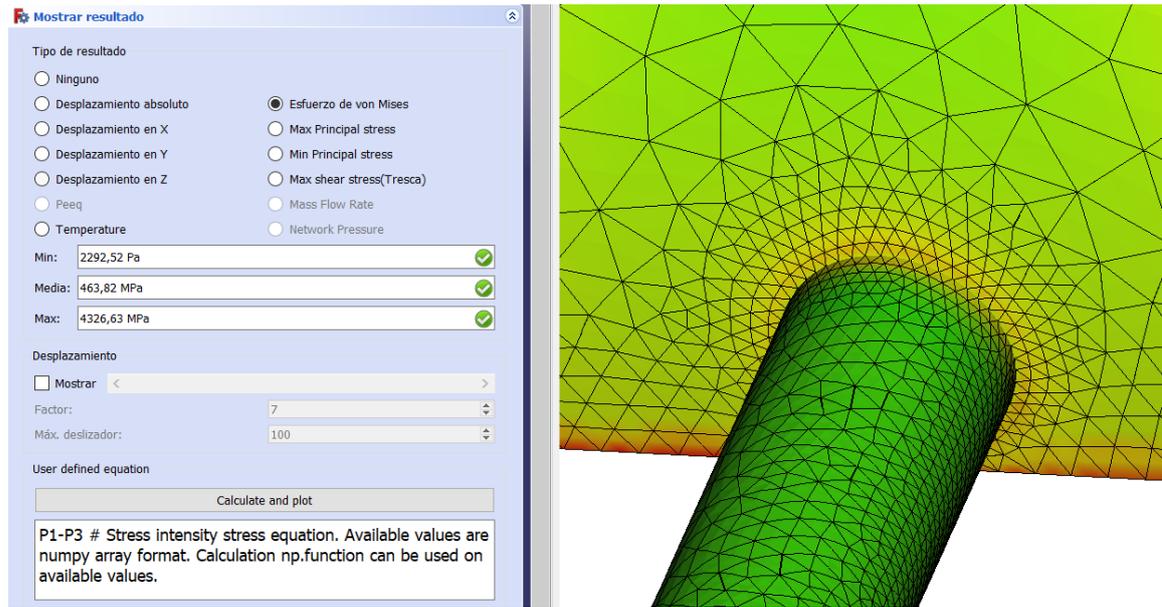
**Figura E.1:** Tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



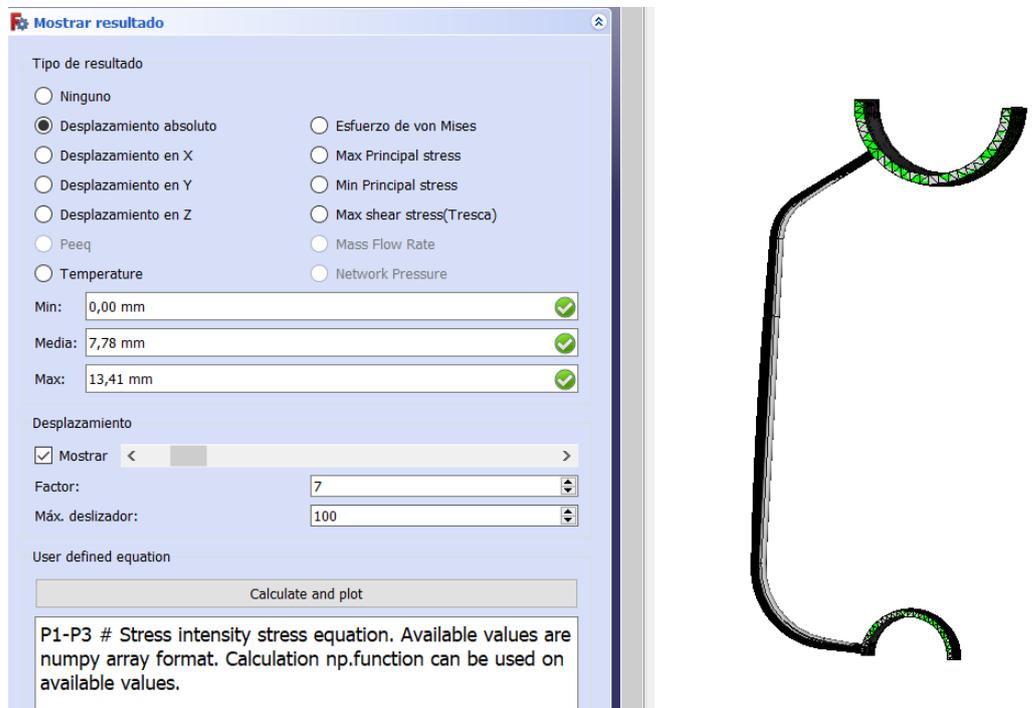
**Figura E.2:** Temperatura en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



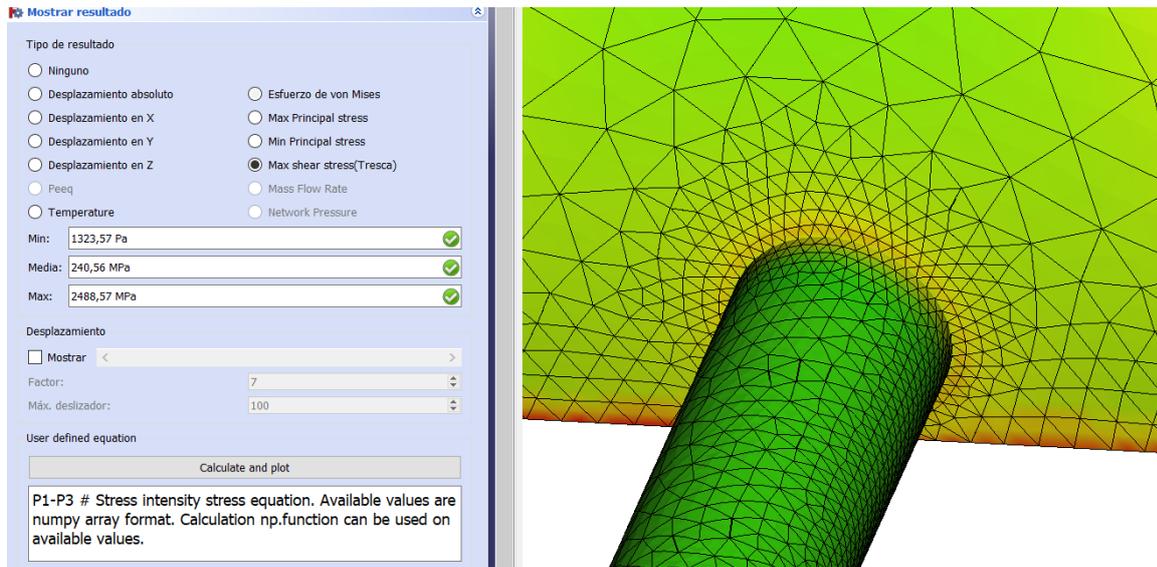
**Figura E.3:** Esfuerzos de Von Mises en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



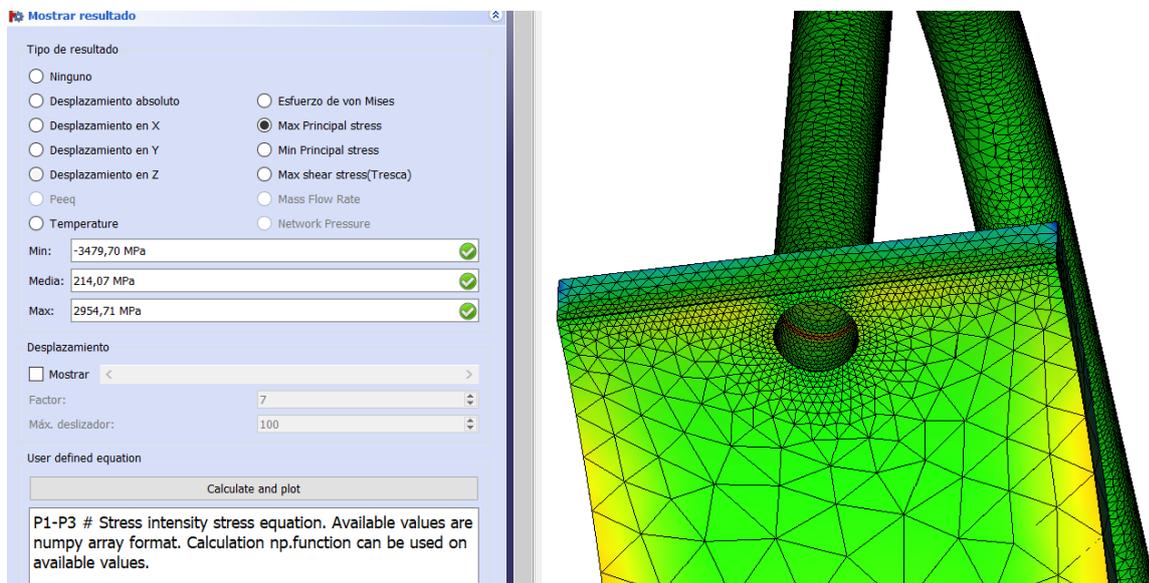
**Figura E.4:** Desplazamiento absoluto en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



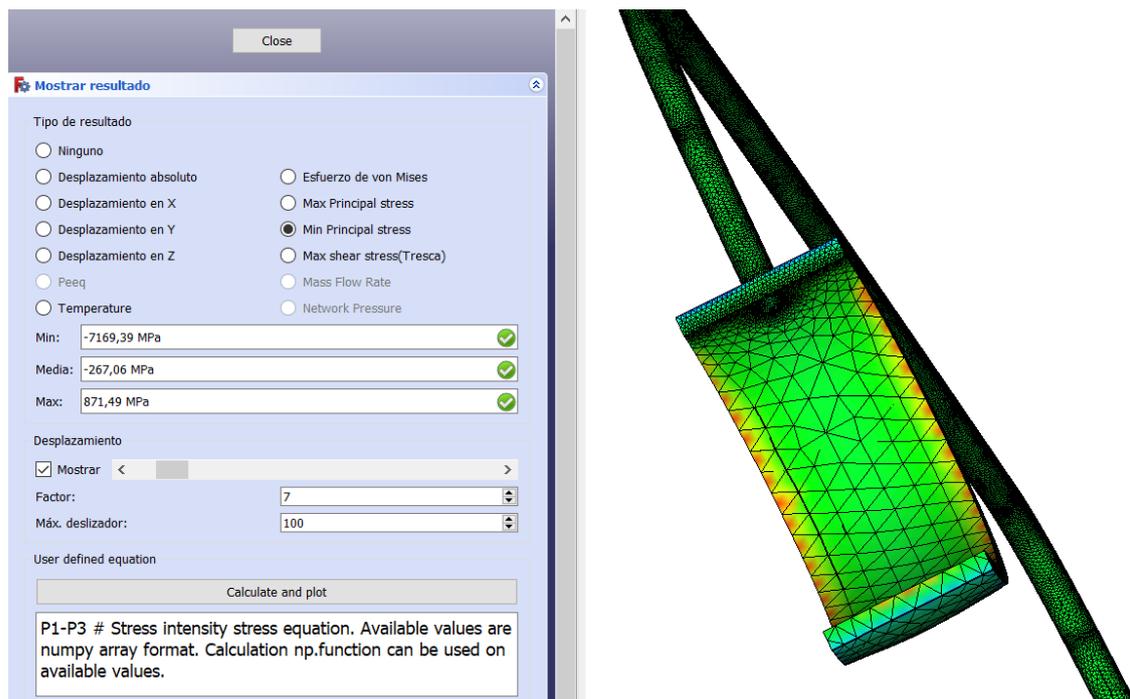
**Figura E.5:** Esfuerzos cortantes en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



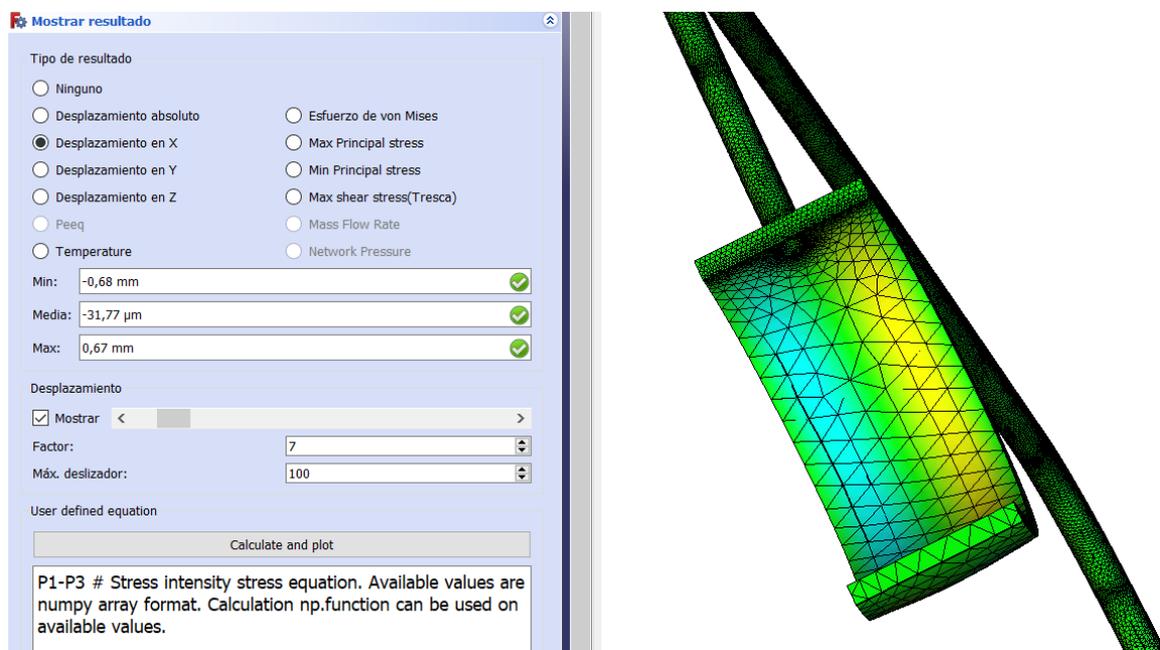
**Figura E.6:** Esfuerzo de tracción en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



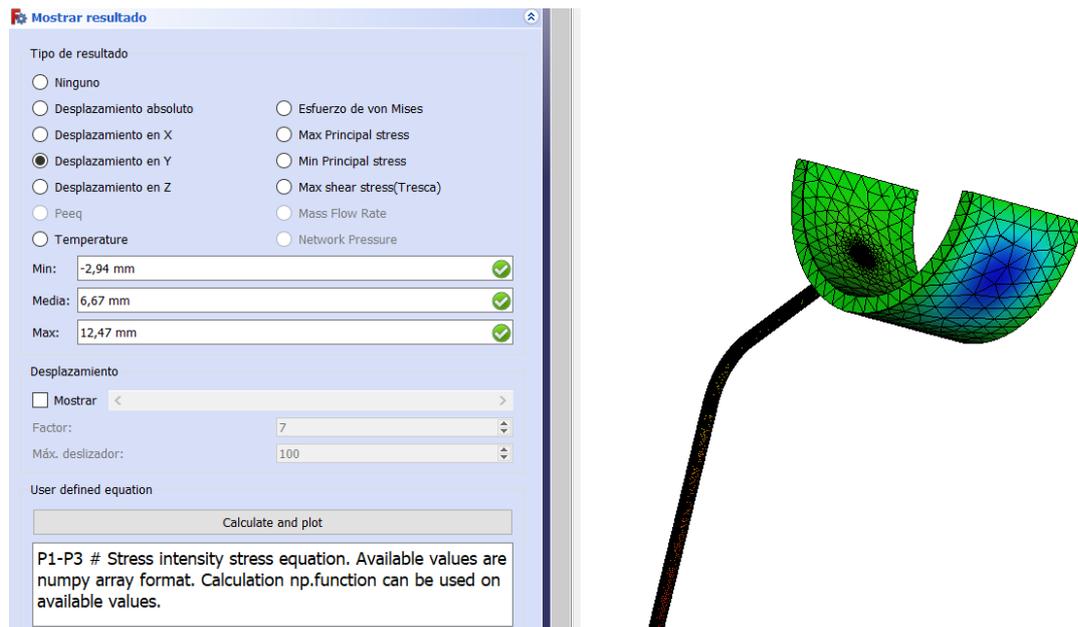
**Figura E.7:** Esfuerzo de compresión en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



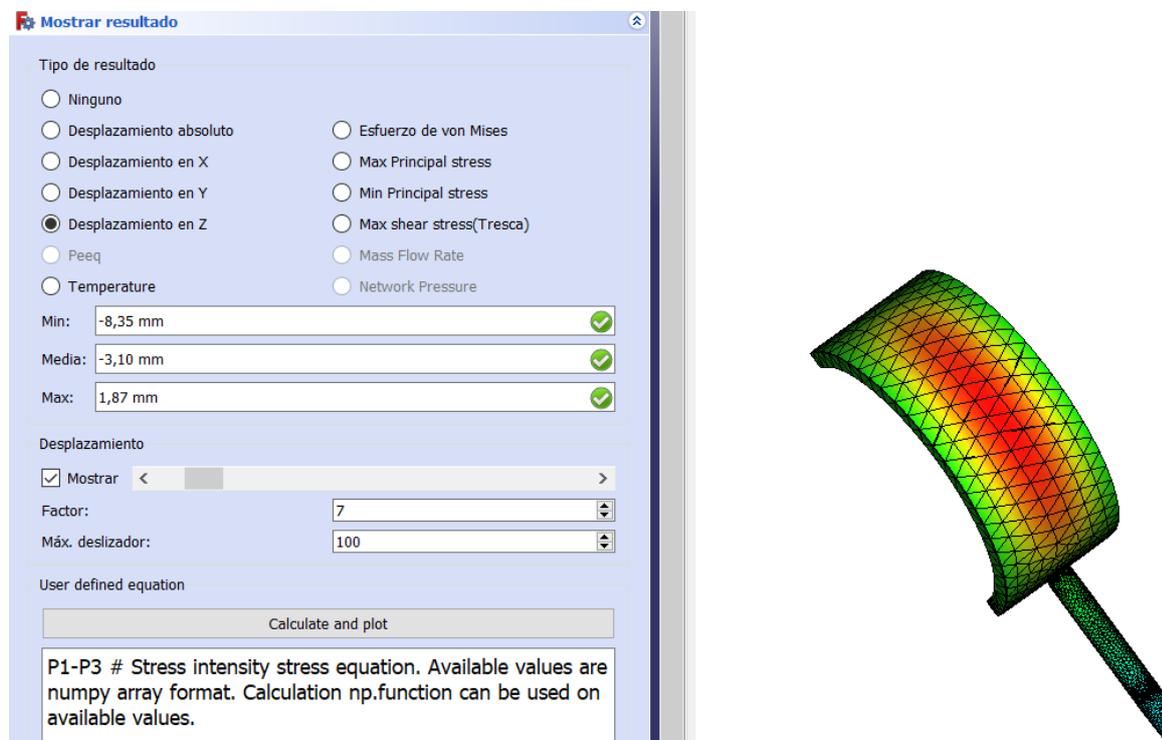
**Figura E.8:** Desplazamiento en el eje X en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



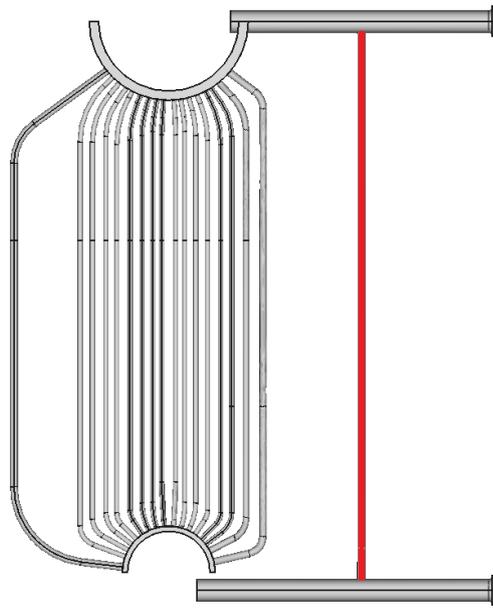
**Figura E.9:** Desplazamiento en el eje Y en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



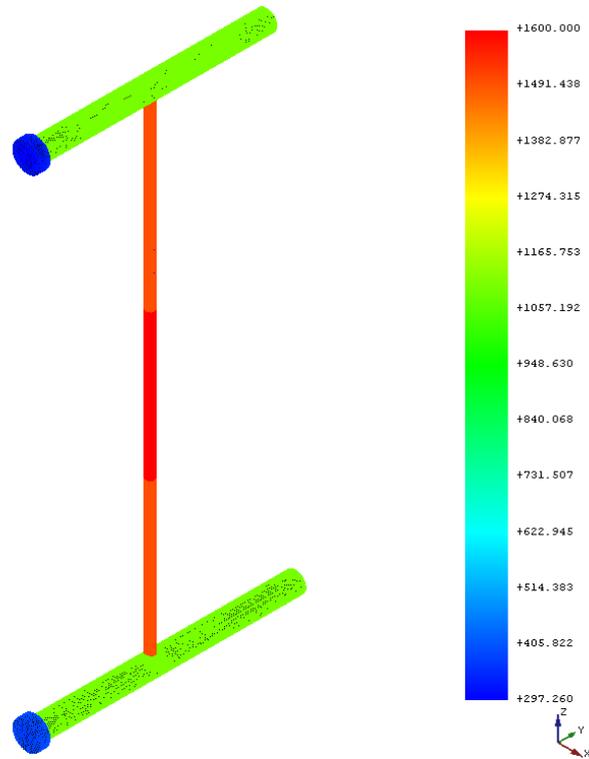
**Figura E.10:** Desplazamiento en el eje Z en los tubos de pared de salida de gases del generador

Fuente: Elaboración propia



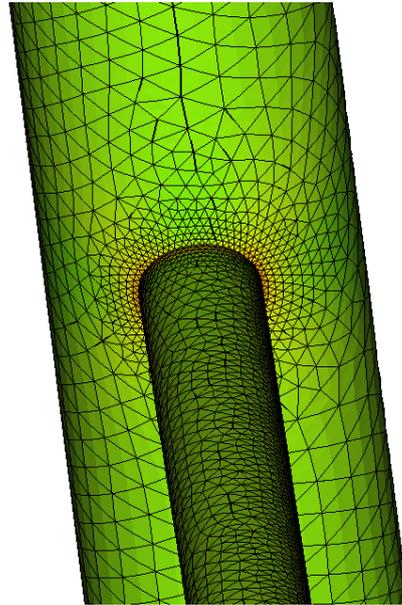
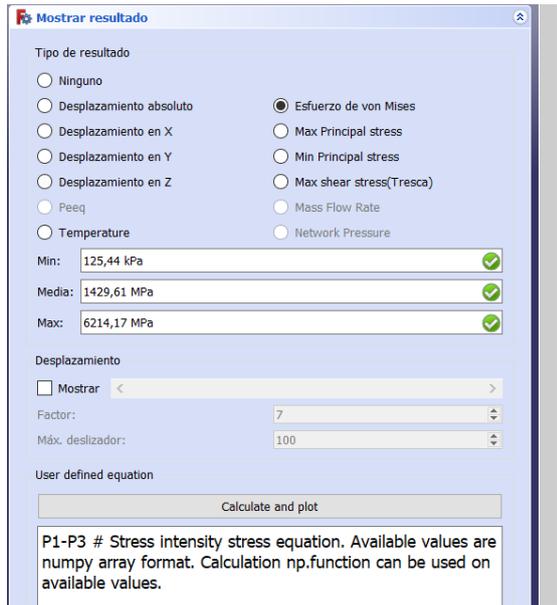
**Figura E.11:** Muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



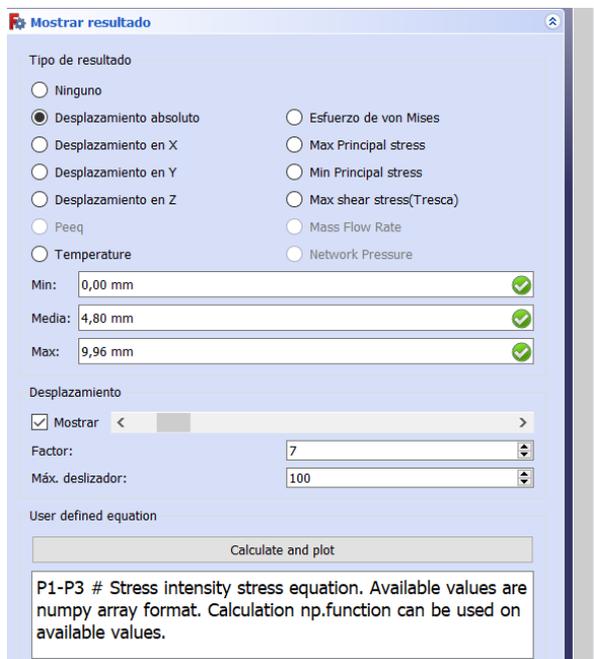
**Figura E.12:** Temperaturas del muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura E.13:** Esfuerzo de Von Misses en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura E.14:** Desplazamiento absoluto en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia

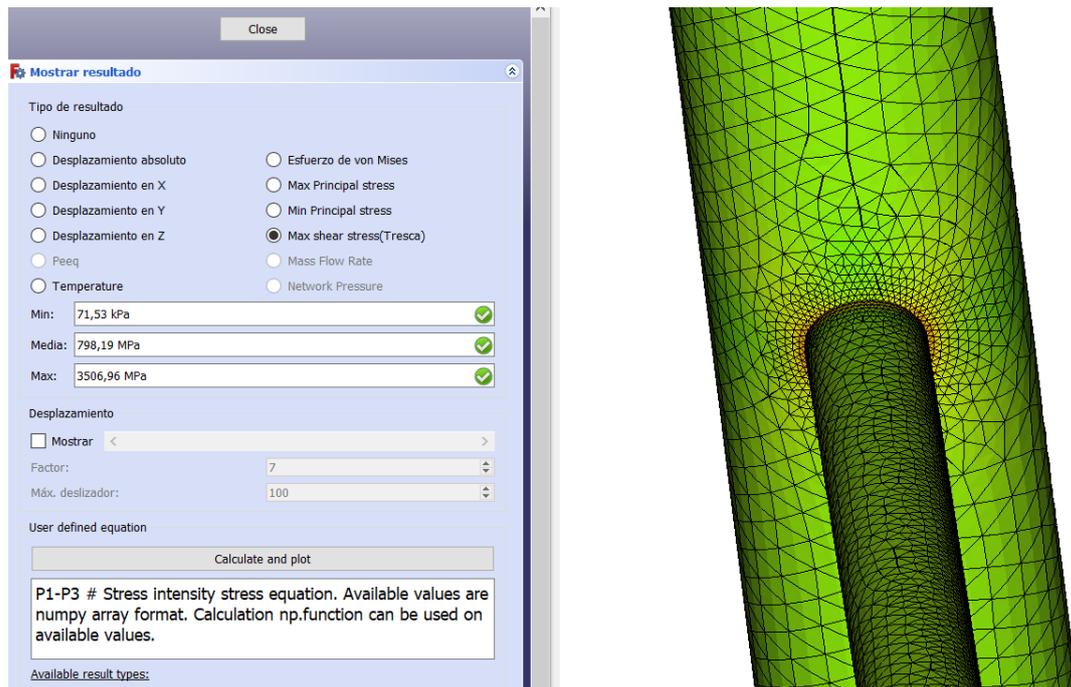


Figura E.15: Esfuerzos cortantes en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia

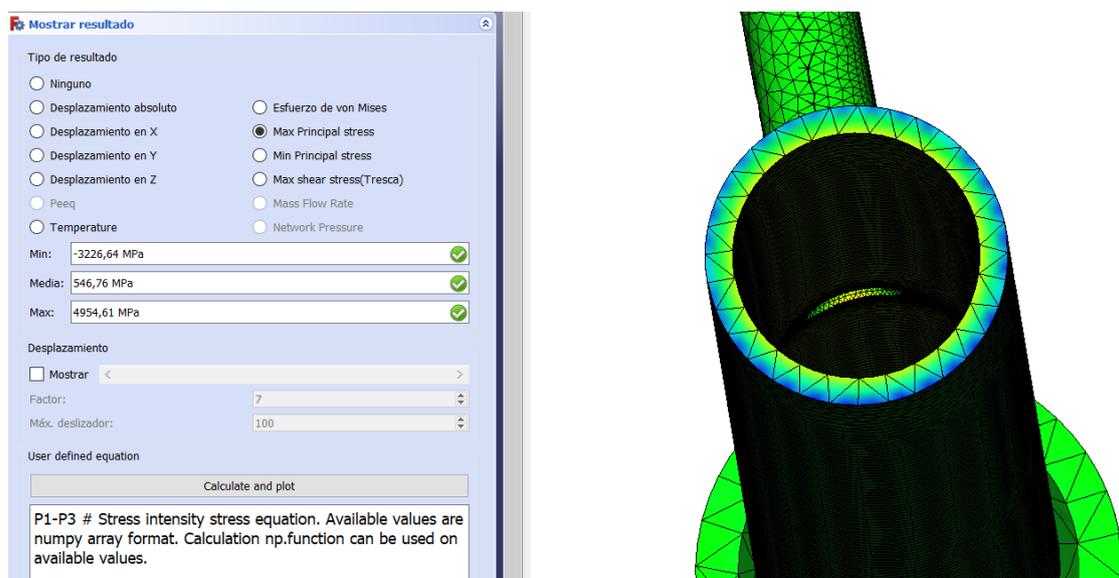
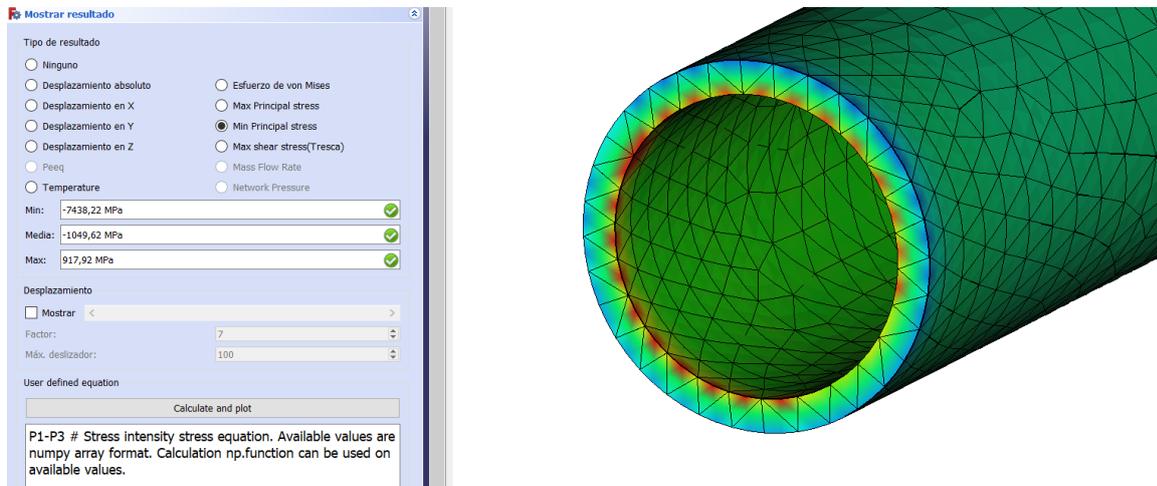


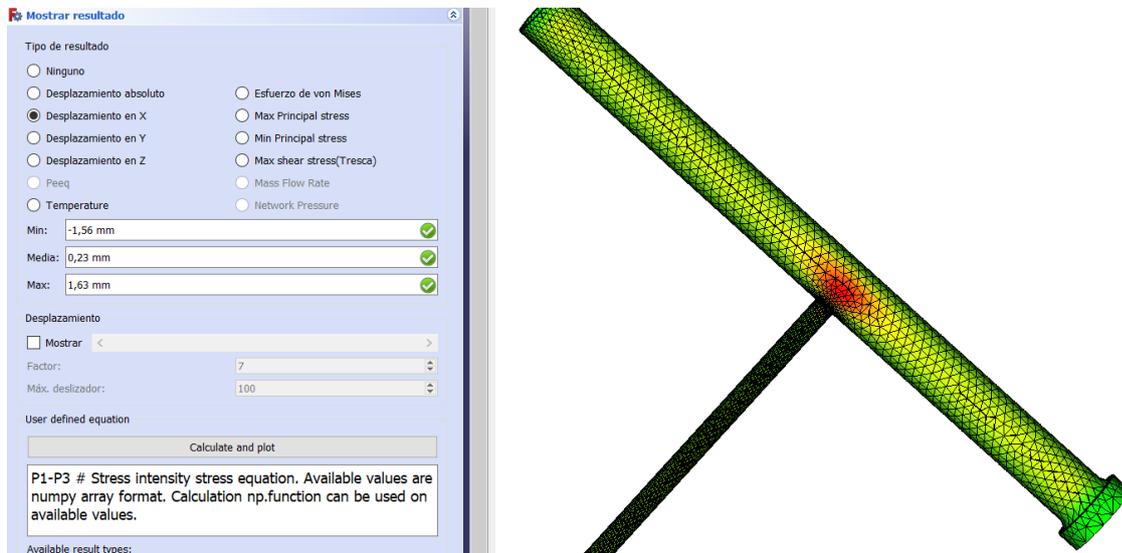
Figura E.16: Esfuerzo de tracción en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



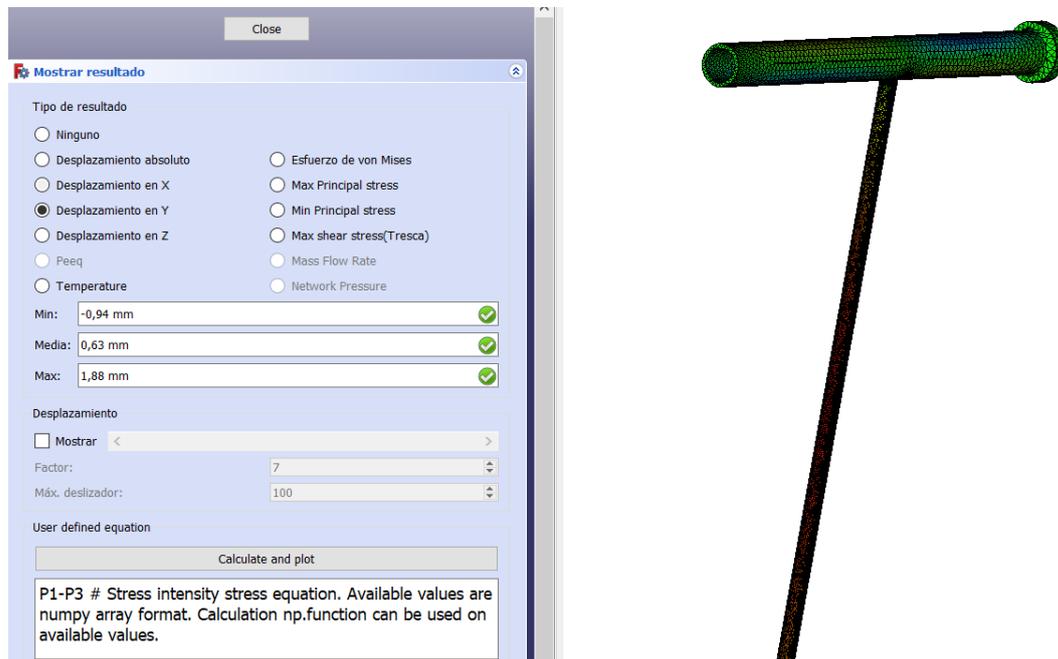
**Figura E.17:** Esfuerzo de compresión en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



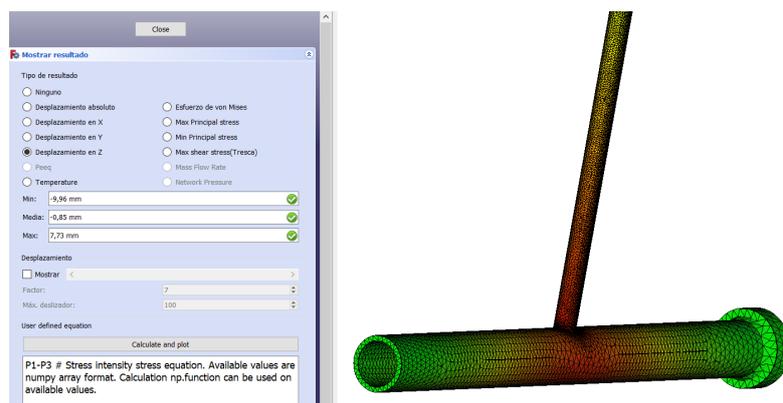
**Figura E.18:** Desplazamiento en el eje X en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura E.19:** Desplazamiento en el eje Y en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



**Figura E.20:** Desplazamiento en el eje Z en el muro de tubos frontal del generador

Fuente: Elaboración propia



# Bibliografía

- [1] *Modulo MEF*. [en línea], consultado el 15 de febrero de 2019. URL: [https://www.freecadweb.org/wiki/FEM\\_Module/es](https://www.freecadweb.org/wiki/FEM_Module/es).
- [2] *Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME (BPVC)*. [en línea], consultado el 21 de abril de 2019. URL: <http://www.columbec.com/norma-asma-calderas-recipientes>.
- [3] *EN 1.4854 (X6NiCrSiNCe35-25) Stainless Steel*. [en línea], consultado el 24 de junio de 2019. URL: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4854-X6NiCrSiNCe35-25>.
- [4] *Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery & Equipment*. [en línea], consultado el 9 de marzo de 2019. URL: <https://www.mhi-mme.com/products/boilerturbine/auxiliary-boilers>.
- [5] BABCOCK; & WILCOX, *Steam: Its Generation and Use*. Babcock & Wilcox Company, 1902.
- [6] CARLOS NAVARRO UGENA, J. L. P. C., *INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS: APLICACIÓN A LA MECÁNICA DE SÓLIDOS*. 2015. URL: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos/Capitulo-9.-Elementos-finitos>.
- [7] CONESA, J., *Mecanismos de transferencia de calor*. 2013. URL: <https://rua.ua.es/.../Mecanismos%20de%20transmisión%20de%20calor.pdf>.
- [8] EQUIPMENT, M. H. I. M. M. ., *219150052-Operation-and-Maintenance-1*. 2003. URL: <https://es.scribd.com/document/338644700/219150052-Operation-and-Maintenance-1-pdf>.
- [9] FEODOSIEV, V., *Resistencia de materiales: selección de problemas de elevada dificultad con soluciones detalladas : tracción, compresión, torsión...* Resistencia de materiales, URSS, 2004, ISBN 9785354009763.
- [10] LI, D., “Mechanical Stress Analysis of a 600MW Supercritical Boiler Superheater Outlet Header”. *Engineering*, 05(01), 2013: 66–68, ISSN 1947-3931.
- [11] VAN DER WALT, S., *Spherical Header Tutorial*. Eskom, 2016. URL: <https://github.com/opensimsa/opensim/tree/Documentation/FEA/AdvancedSphericalHeader>.