

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

### Prevención de roturas en los tubos receptores de plantas termosolares mediante grupos de Counterfactuals

Autor: Jorge León Artillo

Tutor: Jorge Galán Vioque, Juan Sebastián Valverde García y Miguel  
Angel Pérez Cutiño

**Departamento de Matemática Aplicada II**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Prevención de roturas en los tubos receptores de plantas termosolares mediante grupos de Counterfactuals**

Autor:

Jorge León Artillo

Tutor:

Jorge Galán Vioque, Juan Sebastián Valverde García y Miguel Angel Pérez Cutiño

Catedrático de Universidad / Profesor Contratado Doctor / Investigador Predoctoral

Departamento de Matemática Aplicada II  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado: Prevención de roturas en los tubos receptores de plantas termosolares  
mediante grupos de  
Counterfactuals

Autor: Jorge León Artillo  
Miguel Angel Pérez Cutiño

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

**M**e gustaría agradecer todo el apoyo de mis familiares y amigos, que me han apoyado durante todos los años de estudio y esfuerzo. Agradezco a todos los profesores que he tenido durante toda mi vida educativa, por darme la motivación para llegar hasta donde he llegado, tanto profesores de colegio e instituto como del grado. También agradecer a mis tutores Miguel Angel Pérez, Juan Valverde y Jorge Galán por su ayuda en la realización de este proyecto final de carrera.

*Jorge León Artillo*  
*Sevilla, 2023*





# Resumen

---

La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (AA) se han convertido en herramientas esenciales para el progreso contemporáneo, gracias a su eficacia y versatilidad que los hacen aplicables en diversos ámbitos. Para los ingenieros, estas capacidades de procesamiento de grandes cantidades de datos, anticipación de eventos y precisas clasificaciones ofrecen enormes oportunidades.

Los "counterfactuals", o explicaciones contrafactuales permiten conocer los cambios que deben producirse en un cierto evento para modificar el resultado esperado. Los algoritmos diseñados para crear explicaciones contrafactuales cobran gran relevancia en el análisis de eventos y clasificaciones. Comprender las causas de los acontecimientos, cómo podrían haberse evitado y qué acciones podrían prevenirlos es fundamental en la mejora y prevención de cualquier sistema.

En este estudio, se explora un amplio conjunto de datos relacionados con los tubos receptores de plantas termosolares. El objetivo principal es entrenar un modelo de aprendizaje automático con el que generar grupos de "counterfactuals". A través de estas explicaciones, se busca analizar tendencias y patrones de comportamiento en los tubos con el fin de prevenir posibles roturas.

En resumen, el estudio combina la eficacia del aprendizaje automático con las explicaciones "counterfactuals" para avanzar en la prevención de roturas en tubos receptores de plantas termosolares, lo que podría derivar en mejoras significativas en términos de seguridad y funcionamiento eficiente.



# Abstract

---

Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) have become essential tools for contemporary progress, thanks to their effectiveness and versatility that make them applicable in various fields. For engineers, these capabilities of processing large amounts of data, anticipating events, and providing accurate classifications offer enormous opportunities.

Counterfactuals, or counterfactual explanations, can provide the changes that must occur with a certain event to modify its expected outcome. Algorithms designed to create counterfactual explanations are of great relevance in event analysis and classifications. Understanding the causes of events, how they could have been avoided, and what actions could prevent them is crucial for the improvement and prevention of any system.

In this study, a broad dataset related to receiver tubes of solar power plants is explored. The main goal is to train a machine learning model to generate groups of counterfactual explanations. Through these explanations, the aim is to analyze trends and behavioral patterns in the tubes in order to prevent potential breakages.

In summary, the study combines the effectiveness of machine learning with counterfactual explanations to advance in the prevention of breakages in receiver tubes of solar power plants, which could result in significant improvements in terms of safety and efficient operation.



# Índice

---

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Resumen</i>                                  | III       |
| <i>Abstract</i>                                 | V         |
| <b>1 Introducción</b>                           | <b>1</b>  |
| 1.1 Contextualización inicial                   | 1         |
| 1.2 Introducción a los "counterfactuals"        | 2         |
| 1.3 Declaración de objetivos                    | 2         |
| 1.4 Introducción a la metodología               | 2         |
| <b>2 Fundamentos teóricos</b>                   | <b>5</b>  |
| 2.1 Plantas termosolares                        | 5         |
| 2.1.1 Tecnología cilindro-parabólica            | 7         |
| 2.1.2 Tubos receptores                          | 7         |
| 2.2 Modelos de aprendizaje automático           | 9         |
| 2.2.1 Tipos de aprendizaje                      | 9         |
| Aprendizaje supervisado                         | 9         |
| Aprendizaje no supervisado                      | 9         |
| 2.2.2 Tipos de modelos                          | 9         |
| Modelos lineales                                | 9         |
| Modelos de árbol                                | 10        |
| Redes neuronales                                | 10        |
| 2.2.3 Fases de desarrollo                       | 11        |
| Fase de entrenamiento                           | 11        |
| Fase de prueba o test                           | 11        |
| 2.3 "Counterfactuals"                           | 11        |
| <b>3 Metodología</b>                            | <b>13</b> |
| 3.1 Tratamiento de los datos                    | 13        |
| 3.1.1 Descripción del conjunto de datos         | 13        |
| 3.1.2 Selección previa de los datos             | 15        |
| 3.1.3 Acondicionamiento                         | 16        |
| 3.2 Entrenamiento del modelo                    | 17        |
| 3.2.1 Clasificador Random Forest                | 17        |
| 3.2.2 División del set de datos                 | 18        |
| 3.2.3 Evaluación de la precisión del modelo     | 18        |
| 3.3 Generación de "counterfactuals"             | 19        |
| 3.3.1 Librería DiCE                             | 19        |
| 3.3.2 Importancia global de las características | 19        |
| 3.4 Procedimiento                               | 19        |
| 3.4.1 Análisis de los datos de las centrales    | 20        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.4.2    | Entrenamiento del modelo, obtención de contrafactuales e importancia global de las características | 20        |
| 3.4.3    | Análisis con 3 variables   | 20        |
| 3.4.4    | Extracción de conclusiones   | 20        |
| <b>4</b> | <b>Análisis y resultados</b>   | <b>21</b> |
| 4.1      | Análisis de los datos de las centrales   | 21        |
| 4.2      | Explicaciones contrafactuales  | 28        |
| 4.2.1    | Modelo entrenado   | 28        |
| 4.2.2    | Ejemplos de "counterfactuals" individuales   | 29        |
| 4.2.3    | Importancia global de las características  | 30        |
| 4.3      | Tendencias generales   | 31        |
| <b>5</b> | <b>Conclusiones</b>  | <b>37</b> |
| 5.1      | Conclusiones específicas   | 37        |
| 5.2      | Conclusiones generales   | 38        |
| 5.3      | Propuestas de mejora   | 39        |
| <b>6</b> | <b>Anexos</b>  | <b>41</b> |
| 6.1      | Anexo 1: histogramas de los datos de las centrales.  | 41        |
| 6.1.1    | Datos central 1  | 41        |
| 6.1.2    | Datos central 2  | 45        |
| 6.1.3    | Datos central 3  | 48        |
| 6.1.4    | Datos central 4  | 51        |
| 6.1.5    | Datos central 5  | 54        |
| 6.1.6    | Datos central 6  | 57        |
| 6.1.7    | Datos central 7  | 60        |
| 6.2      | Anexo 2: gráficas de tendencias  | 63        |
|          | <i>Índice de Figuras</i>   | 65        |
|          | <i>Bibliografía</i>  | 71        |

# 1 Introducción

---

## 1.1 Contextualización inicial

Indudablemente, en la era contemporánea, la implementación de herramientas basadas en modelos de aprendizaje automático ha propiciado una revolución transformadora en la ingeniería y otras disciplinas. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático han llamado la atención a expertos de una multitud de campos debido a sus sorprendentes resultados. La capacidad de procesar grandes cantidades de datos, anticipar eventos y realizar clasificaciones con una precisión asombrosa ha impulsado un avance sin precedentes en la resolución de problemas y en la toma de decisiones estratégicas.

En este contexto de avance tecnológico, surgen cuestiones importantes como la planteada en este proyecto: la prevención de fallos en sistemas y componentes críticos. Un terreno particularmente interesante para aplicar estas herramientas es la prevención de roturas en los tubos receptores de plantas termosolares. En este entorno altamente especializado, la integridad de los tubos reviste una importancia vital, y cualquier rotura podría generar costosas interrupciones, pérdida de producción y riesgos para la seguridad operativa.

Es en este contexto que las herramientas de análisis de grandes cantidades de datos se revelan como esenciales. La recopilación de una cantidad masiva de información de los tubos receptores y otros componentes brinda una oportunidad única para identificar patrones, tendencias y comportamientos que puedan dar indicios de posibles roturas. Sin embargo, procesar manualmente esta abrumadora cantidad de datos resultaría una tarea monumental y propensa a errores. Aquí es donde el aprendizaje automático emerge como una solución innovadora, permitiendo la creación de modelos que puedan analizar, clasificar y predecir a una escala simplemente inalcanzable de forma manual.

En este sentido, el presente estudio se sitúa entre la prevención de roturas y las capacidades del aprendizaje automático. A través del análisis exhaustivo de una gran cantidad de datos relacionados con los tubos receptores de plantas termosolares, el objetivo primordial es el entrenamiento de un modelo de aprendizaje automático capaz no solo de discernir patrones sutiles, sino también de generar explicaciones contrafactuales. Estas explicaciones, de gran relevancia, ofrecen un nuevo nivel de comprensión al explorar escenarios hipotéticos en los cuales las roturas podrían haber sido evitadas o minimizadas.

Más allá de la mera identificación de tendencias, el estudio reconoce en las explicaciones contrafactuales una herramienta clave para enriquecer la toma de decisiones y mejorar la prevención de fallos en estas plantas termosolares esenciales. Este estudio, por ende, busca aprovechar la potencia de los counterfactuals para impulsar un análisis de datos más profundo y eficiente en el contexto de la ingeniería.

Como trabajo sin muchos antecedentes en el estado del arte, queriendo aplicar y combinar técnicas en un ámbito novedoso, este estudio pretende seguir una línea de trabajo prometedora sobre la que se puedan asentar futuras investigaciones que introduzcan mejoras en los datos y en la metodología.

## 1.2 Introducción a los "counterfactuals"

Los 'counterfactuals', también conocidos como explicaciones contrafactuales, son explicaciones del tipo: ¿qué debería haber pasado para que el modelo hubiese predecido otro resultado?, ¿cómo deberían ser las características o variables de entrada para obtener el resultado final que me interesa?. Emergen como una respuesta a la necesidad de comprender las predicciones formuladas por los modelos de aprendizaje automático. En un panorama donde estos modelos se han convertido en herramientas ampliamente utilizadas en diversos ámbitos de la sociedad, surge la necesidad de enlazar las predicciones con explicaciones claras que aborden el por qué de dichas predicciones y el camino para influir en sus resultados.

Imaginemos una situación en la que un modelo de aprendizaje automático predice que un tubo receptor de una planta termosolar podría estar en riesgo de ruptura. Los "counterfactuals" entran en juego al presentar posibles escenarios hipotéticos: ¿Cómo se podría haber evitado esta predicción? ¿Qué cambios en las condiciones podrían haber llevado a un resultado distinto? Estas explicaciones contrafactuales no solo nos permiten entender la lógica detrás de las predicciones, sino también explorar vías para alterar posibles resultados adversos.

En este estudio, se abordará la aplicación de "counterfactuals" en el análisis de datos sobre tubos receptores de plantas termosolares. Al explorar tendencias y comportamientos a través de estas explicaciones, se aspira a no solo predecir posibles roturas, sino también comprender cómo podrían haberse evitado, desempeñando así un papel fundamental en la prevención y mejora de sistemas críticos.

## 1.3 Declaración de objetivos

Los objetivos de este estudio se enfocan en analizar las explicaciones de las predicciones del modelo de aprendizaje automático entrenado, basado en datos de tubos receptores de plantas termosolares, para prevenir posibles roturas en estos componentes cruciales. Específicamente, el objetivo central radica en:

1. **Analizar explicaciones del Modelo:** examinar las explicaciones contrafactuales extraídas del modelo de aprendizaje automático, así como comprender cómo el modelo interpreta y asigna importancia a las diferentes características.

2. **Identificar Tendencias Significativas:** detectar tendencias y patrones relevantes a través de las explicaciones contrafactuales.

3. **Prever Posibles Roturas:** utilizar las tendencias y patrones identificados para anticipar y prevenir posibles roturas en los tubos receptores.

Al analizar tendencias y detectar posibles roturas, se espera contribuir al diseño y operación eficientes de las plantas termosolares, optimizando su rendimiento y reduciendo el riesgo de interrupciones costosas.

## 1.4 Introducción a la metodología

La metodología implementada en este proyecto se desglosa en varias fases. Se dispone de una gran fuente de datos referentes a los tubos receptores de distintas centrales termosolares, agrupados en columnas que representan diferentes características de medidas reales.

Para realizar el entrenamiento de los modelos de aprendizaje automático, emplearemos la librería de Python denominada "scikit-learn". Una vez finalizada esta etapa de entrenamiento, se empleará la librería DiCE ("DiCE: Diverse Counterfactual Explanations for Machine Learning Classifiers"). Estas herramientas están específicamente diseñadas para generar explicaciones de "counterfactuals". En este proceso, se realizará un análisis para identificar las características más influyentes, para centrar en ellas nuestro estudio.



Por último, se procederá a la agrupación de los datos y los "counterfactuals" generados. Esta etapa permitirá un análisis de las tendencias que puedan surgir, así como la extracción de conclusiones fundamentales que ayudarán en el entendimiento de los patrones en las roturas de los tubos receptores.



## 2 Fundamentos teóricos

---

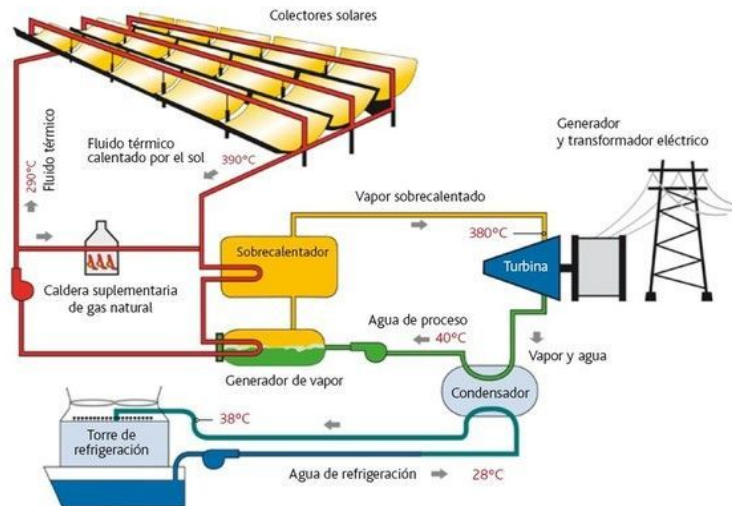
Para construir una base sólida para nuestra investigación, es esencial comprender algunos conceptos clave. En esta sección, vamos a explorar las ideas básicas que sustentan nuestro estudio sobre la prevención de roturas en tubos de plantas termosolares. También vamos a conocer cómo los modelos de aprendizaje automático y las explicaciones contrafactuales se unen para ayudarnos a entender y mejorar estos sistemas. En resumen, este capítulo nos dará las herramientas necesarias para abordar de manera efectiva el proyecto.

### 2.1 Plantas termosolares

La generación de energía solar termoeléctrica (STE), también conocida como energía termosolar de alta concentración (CSP), implica aprovechar la energía solar mediante la concentración de rayos solares para generar electricidad. Este proceso se basa en el uso de espejos colectores que guían y enfocan los rayos solares hacia un fluido caloportador, elevando su temperatura a valores entre 250 y 600 °C. Este fluido, que puede variar entre aceites sintéticos, sales fundidas o vapor, posteriormente se emplea para generar electricidad, ya sea mediante su expansión directa en una turbina o al transferir el calor a otro fluido (vapor) que activa una turbina.

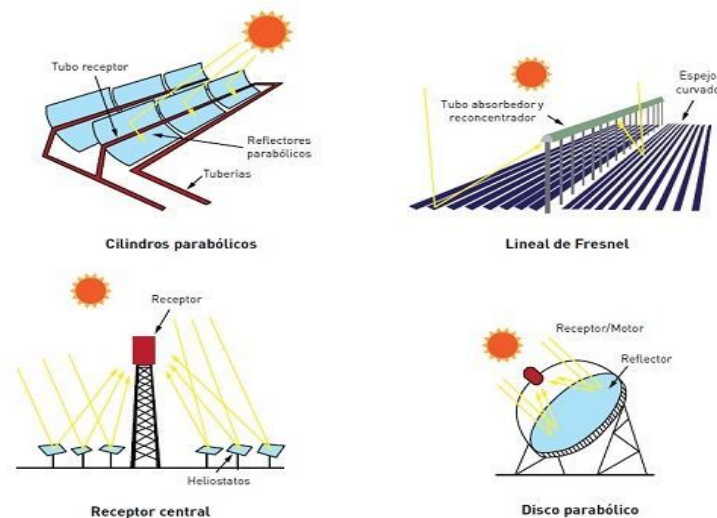


**Figura 2.1** Vista aérea de una planta termosolar de tecnología cilindro-parabólica. Está compuesta por sectores de placas y en el centro se encuentra la central que contiene la turbina y el alternador.



**Figura 2.2** Esquema del funcionamiento básico de una central termosolar. Los rayos solares se concentran en los tubos receptores que la transforman en energía térmica. El fluido caloportador que fluye en su interior absorbe esta energía térmica y la transfiere para generar vapor que accionará una turbina conectada a un alternador que libera energía eléctrica a la red.

Existen distintas tecnologías en el ámbito de las plantas termosolares, que combinan diseños variables de espejos, métodos de seguimiento solar y enfoques de generación de electricidad. A pesar de sus diferencias, todos estos sistemas operan bajo el mismo principio fundamental: convertir el calor en electricidad empleando un motor térmico, en su mayoría una turbina de vapor, que inyecta la electricidad en la red de distribución eléctrica.



**Figura 2.3** Los cuatro tipos básicos de centrales termosolares: con placas cilindro-parabólicas, lineal de Fresnel, con receptor central y de disco parabólico.

La tecnología CSP ofrece ventajas clave. En primer lugar, al igual que la energía fotovoltaica, capitaliza la energía solar disponible en abundancia. En segundo lugar, permite el almacenamiento de energía térmica, lo que la convierte en una fuente de energía renovable manejable. Además, puede ser combinada con combustibles fósiles y asegura la generación continua y adaptable de electricidad para satisfacer las necesidades de la red eléctrica. Esto es especialmente útil para cubrir la demanda en momentos de pico durante el día y la noche, y para mitigar las intermitencias asociadas con otras fuentes de energía renovable.

Optimizar la eficiencia de las plantas CSP sigue siendo un objetivo importante, dado que una parte significativa de la energía solar incidente se pierde durante los procesos de conversión y captación. En la última década, la tecnología CSP ha experimentado un crecimiento notorio, proyectando una producción de 360 TWh para 2040. Aunque aún existe margen para mejorar la eficiencia y reducir costos, su evolución ha sido veloz.

### 2.1.1 Tecnología cilindro-parabólica

Nos enfocamos ahora en un tipo específico de planta termosolar, que es del que proceden los datos de los que disponemos y, por tanto, con el que trabajaremos. Las plantas de colectores cilindro-parabólicos (CCP) operan a través de filas o bucles de espejos colectores con forma de parábola alargada. Estos espejos recogen y concentran la energía solar en un tubo receptor posicionado en el enfoque de la parábola. Un fluido caloportador, típicamente aceite sintético, fluye por estos tubos, absorbiendo el calor solar. Posteriormente, el fluido caliente se emplea para generar vapor a través de un intercambiador de calor, el cual impulsa un ciclo de Rankine y, en última instancia, una turbina de vapor conectada a un generador eléctrico. Tanto los espejos como los tubos siguen el movimiento solar en un solo eje.



**Figura 2.4** Placas de tecnología cilindro-parabólica. En la imagen se aprecian las placas dispuestas en orden y los tubos receptores en su centro.

Este diseño logra una concentración solar en los tubos receptores que alcanza temperaturas en el rango de 350 a 550 °C. Sin embargo, la mayoría de las plantas utilizan aceite sintético como fluido caloportador, lo que limita la temperatura a 400°C debido a la degradación del aceite. Una alternativa es la generación directa de vapor (GDV), que emplea agua como fluido caloportador y logra vapor sobrecalentado a unos 550 °C.

A pesar de los desafíos que presenta, la tecnología de colectores cilindro-parabólicos se encuentra en un estado maduro y está ampliamente implementada en todo el mundo, con una fuerte presencia en países como España y Estados Unidos. Uno de los elementos críticos en estas plantas son los tubos receptores.

### 2.1.2 Tubos receptores

Dentro de la tecnología de colectores cilindro-parabólicos en plantas de energía solar, uno de los elementos más cruciales es el tubo receptor. Su función principal es convertir la energía solar concentrada en energía térmica, la cual es absorbida por un líquido especial que circula a través del tubo como refrigerante. En términos de costos, este componente también es uno de los más caros en una planta solar.



Figura 2.5 Imagen de una planta termosolar CSP con tecnología cilindro-parabólica.

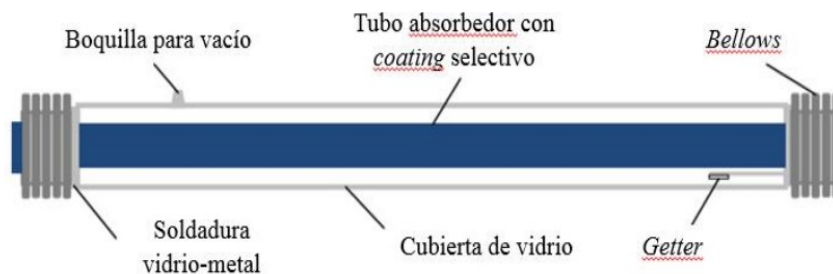


Figura 2.6 Esta imagen esquemática muestra las partes de un tubo receptor. Las partes principales consisten en la cubierta exterior de vidrio, la cámara de vacío, y el tubo absorbente por el que fluye el fluido caloportador.

El tubo receptor cumple una única y esencial tarea: transformar la energía solar en energía térmica de manera eficiente. Para ello, consta de varios elementos clave:

- **Tubo Absorbedor:** Este es el tubo interno del receptor, encargado de convertir la energía solar en energía térmica y transferirla al fluido caloportador que fluye en su interior. Generalmente, el tubo absorbedor está hecho de acero inoxidable, recubierto externamente con un recubrimiento selectivo de alta absorción y baja emisividad. Este recubrimiento consta de varias capas de materiales cerámicos y metálicos para lograr una alta absorción de la radiación solar y una baja emisión de radiación térmica. El recubrimiento varía según la temperatura de trabajo del tubo receptor.
- **Espacio Anular:** Es el espacio entre el tubo absorbedor y el tubo exterior, donde se crea un vacío para proteger el recubrimiento selectivo y minimizar las pérdidas de calor por convección.
- **Tubo Exterior:** Se trata de un tubo de vidrio que rodea el absorbedor y permite crear el vacío en el espacio anular. El vidrio utilizado es de borosilicato, con alta transmisividad óptica para minimizar la pérdida de energía solar al atravesar el tubo.
- **Bellows:** Son fuelles metálicos en los extremos del tubo receptor que permiten la expansión térmica diferencial entre el tubo de acero y el tubo de vidrio, evitando tensiones que puedan causar fracturas.

- **Soldadura Vidrio-Metal:** Es una unión crítica en la fabricación del tubo receptor, que consiste en unir un trozo delgado de kovar (aleación metálica) al extremo del tubo de vidrio. Esta soldadura puede ser propensa a fallos debido a tensiones residuales causadas por la diferencia en las tasas de expansión térmica de los materiales.
- **Getter:** Son compuestos metálicos instalados en el espacio anular para eliminar moléculas gaseosas. El getter evaporable de bario y el getter no evaporable se usan para mantener el vacío y detectar alteraciones.

Los tubos receptores representan una parte esencial en la tecnología de colectores cilindro-parabólicos, ya que son responsables de convertir la energía solar en energía térmica utilizable. La mejora de estos componentes contribuyen al desarrollo continuo de las plantas solares y su eficiencia.

## 2.2 Modelos de aprendizaje automático

El Aprendizaje Automático es una rama de la Inteligencia Artificial que se ocupa de crear algoritmos que pueden aprender a realizar predicciones, clasificaciones y a tomar decisiones sin tener que ser programados específicamente para un objetivo concreto. Estos algoritmos reducen considerablemente el tiempo de programación, debido a que no se deben realizar códigos específicos teniendo en cuenta todas las posibilidades presentes. El único requisito es proveer de una gran cantidad de datos al modelo para poder ser ajustado, adquiriendo los conocimientos necesarios para elegir entre diferentes acciones, resultados y escenarios.

### 2.2.1 Tipos de aprendizaje

#### Aprendizaje supervisado

Un enfoque de aprendizaje automático en el que proporcionamos al algoritmo tanto las preguntas (características) como las respuestas (etiquetas). Esto permite que el algoritmo aprenda y pueda hacer predicciones basadas en las características proporcionadas, aplicando el conocimiento de las respuestas conocidas.

**Algoritmo de clasificación:** procedimiento de aprendizaje supervisado que se emplea para determinar a qué categoría o grupo pertenece un elemento en estudio. El algoritmo encuentra patrones en los datos suministrados y los clasifica en diferentes grupos. Luego, utiliza estos patrones para predecir la categoría de nuevos elementos basados en sus características.

**Algoritmo de regresión:** método de aprendizaje supervisado que se usa para predecir valores numéricos, como precios, temperaturas o puntuaciones. El algoritmo analiza los datos proporcionados y construye una función que se ajusta a los puntos existentes. Con esta función, puede predecir valores numéricos para datos nuevos.

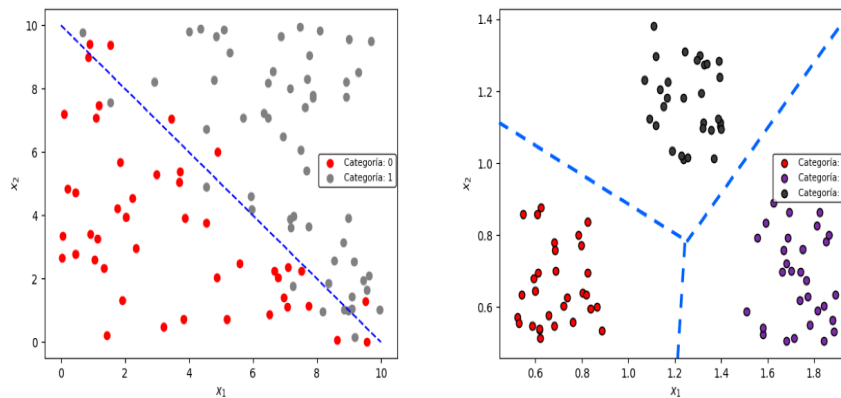
#### Aprendizaje no supervisado

Un enfoque del aprendizaje automático donde solo proporcionamos las características al algoritmo, sin etiquetas. El objetivo es que el algoritmo organice los datos según sus similitudes en términos de características. El algoritmo agrupa los datos de manera que los elementos que comparten características similares se coloquen juntos en un grupo, sin la necesidad de etiquetas predefinidas.

### 2.2.2 Tipos de modelos

#### Modelos lineales

Los modelos lineales son enfoques de aprendizaje automático que buscan establecer relaciones aproximadamente lineales entre las características y los resultados. Estos modelos, como la regresión lineal y la regresión



**Figura 2.7** Ejemplos en forma de gráfica de clasificadores geométricos con salidas de clasificación binaria y multiclase. La gráfica de la izquierda muestra una división de los datos en dos tipos, rojos y grises separados por una frontera. La gráfica de la derecha muestra una clasificación multiclase de tres tipos, rojo, gris y negro, separados por una frontera.

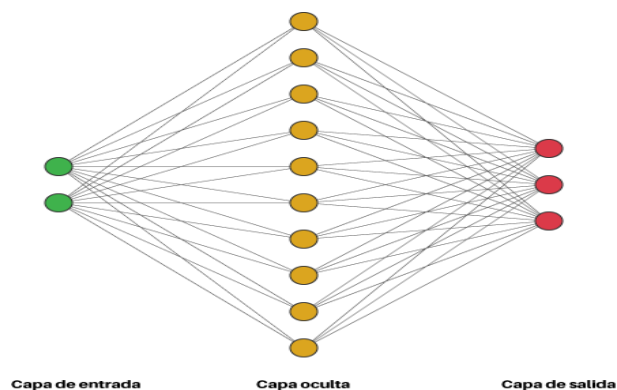
logística, se ajustan a una línea o plano que mejor se ajuste a los datos y se utilizan para predecir valores o probabilidades en función de las características dadas.

### Modelos de árbol

Los modelos de árbol son algoritmos que toman decisiones siguiendo un conjunto de reglas jerárquicas en forma de un árbol. Estos modelos dividen repetidamente los datos en subgrupos basados en las características, creando ramas y nodos en el árbol. Ejemplos incluyen árboles de decisión y random forests, que son conjuntos de múltiples árboles que combinan sus resultados para mejorar la precisión.

### Redes neuronales

Las redes neuronales artificiales se inspiran en la estructura y función del cerebro humano. Están compuestas por unidades llamadas neuronas artificiales que se interconectan en capas. Cada neurona procesa la información y pasa los resultados a las siguientes capas. Estas redes son eficaces en tareas complejas como el reconocimiento de patrones y el procesamiento de imágenes. Sin embargo, también pueden requerir un largo tiempo de entrenamiento y mucha capacidad computacional.



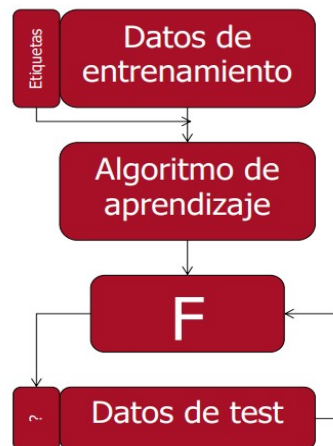
**Figura 2.8** Diagrama básico de una red neuronal simple. Las redes neuronales están compuestas por una capa de entrada, un conjunto de capas ocultas y una capa de salida. Las funciones matemáticas que presenta cada neurona y las uniones entre las capas determinan el tipo de red neuronal.



### 2.2.3 Fases de desarrollo

#### Fase de entrenamiento

La fase de entrenamiento es una etapa en el proceso de aprendizaje automático donde se proporciona al algoritmo un conjunto de datos de entrenamiento. Durante esta fase, el algoritmo ajusta sus parámetros y pesos internos para aprender patrones y relaciones en los datos. El objetivo es permitir que el algoritmo capture información significativa y mejore su capacidad para realizar predicciones o tomar decisiones.



**Figura 2.9** Esquema de las fases de desarrollo del aprendizaje supervisado. Se introduce un conjunto de datos con sus etiquetas correspondientes en el algoritmo de aprendizaje. Tras el aprendizaje, se valida el modelo introduciendo datos de prueba en las funciones resultantes y se validan los resultados.

#### Fase de prueba o test

La fase de prueba es la etapa en la que se evalúa la eficacia y la precisión del modelo de aprendizaje automático que se ha entrenado previamente. En esta fase, se utiliza un conjunto de datos de prueba que el algoritmo no ha visto durante el entrenamiento. El rendimiento del modelo se mide al comparar las predicciones o resultados generados por el algoritmo con los resultados reales conocidos en los datos de prueba. Esto ayuda a determinar cuán bien generaliza el modelo a nuevos datos y si está listo para su implementación en situaciones del mundo real.

## 2.3 "Counterfactuals"

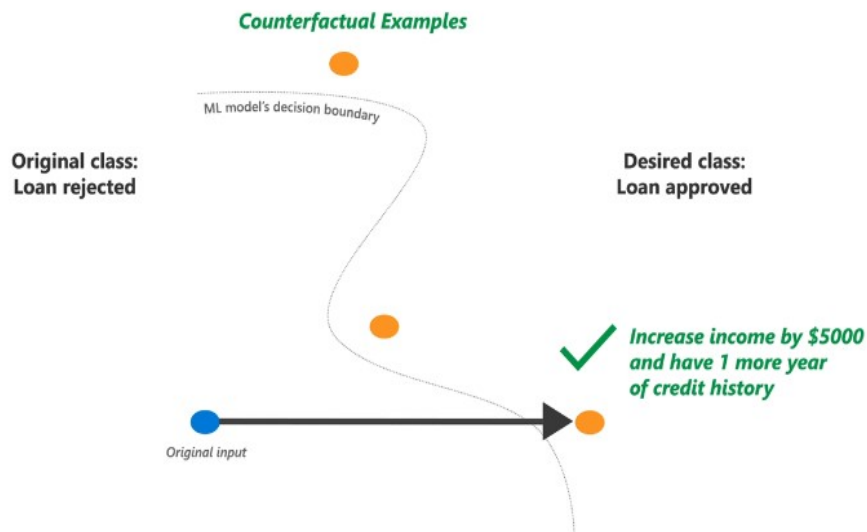
Los "counterfactuals", en el contexto del aprendizaje automático, desempeñan un papel crítico al proporcionar explicaciones interpretativas para las decisiones tomadas por modelos de "machine learning". A medida que estos modelos influyen en decisiones fundamentales, surge la necesidad de entender cómo funcionan y por qué toman ciertas decisiones. En esencia, los contrafácticos permiten explorar "qué hubiera pasado si" al mostrar versiones de características modificadas de un mismo caso que habría recibido una decisión diferente del modelo.

En nuestro caso, supongamos que el modelo de machine learning analiza varias características de los tubos, como temperaturas, presiones, eficiencia y pérdida, para determinar si un tubo está en buen estado o roto. Si un análisis para ciertas características de un tubo en particular ha sido considerado como "roto" por el modelo, en lugar de simplemente recibir una explicación genérica, los contrafácticos proporcionarían un enfoque mucho más detallado.

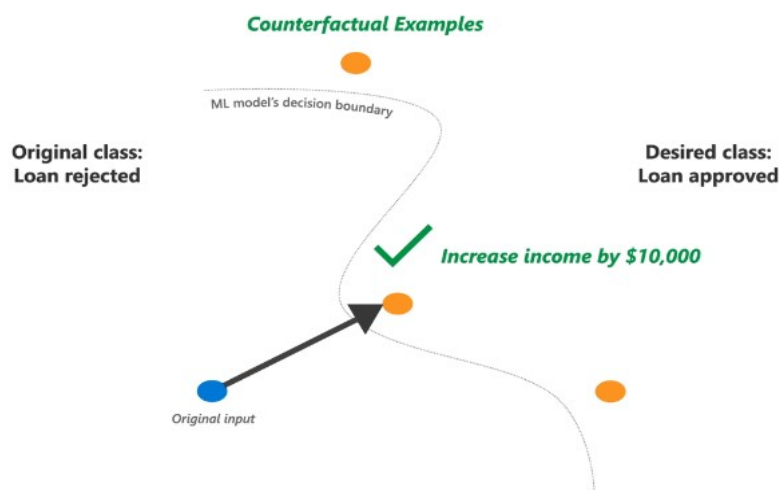
Un contrafáctico en este contexto podría indicar: "Si la temperatura del tubo hubiera sido 20 grados más baja y la pérdida de eficiencia hubiera disminuido en un 10%, el modelo habría considerado que el tubo

estaba en buen estado". Esto no solo da una visión clara de qué características específicas influirían en la decisión, sino que también proporciona una guía tangible sobre cómo ajustar las condiciones del tubo para obtener un resultado diferente en situaciones futuras .

Así, los "counterfactuals" ofrecen explicaciones concretas y prácticas para entender los resultados del modelo y permiten a los operadores de la planta tomar decisiones informadas sobre cómo optimizar el funcionamiento de los tubos receptores en la central termosolar. Sin embargo, distintas explicaciones pueden asociarse a un mismo ejemplo (ver Figuras 2.10 y 2.11); por tanto es de vital importancia un análisis que indique cuál de las explicaciones aportadas tiene *más lógica* o resulta *más viable*, lo cual es dependiente del caso de uso.



**Figura 2.10** "Counterfactuals" explicando fronteras entre las clases. Se determina que para cambiar la salida resultante se debe aumentar el ingreso en \$ 5000 y aumentar en un año el historial de créditos.



**Figura 2.11** "Counterfactuals" explicando fronteras entre las clases. En este segundo ejemplo, se determina que para cambiar la salida resultante se deb aumentar el ingreso a \$ 10000.

## 3 Metodología

---

La metodología practicada en cualquier tarea de investigación constituye una parte fundamental de la misma. Tener una estructura clara y efectiva de la forma de trabajar, orientada al cumplimiento de los objetivos marcados es esencial para el éxito de un proyecto. En este capítulo se relata la hoja de ruta seguida durante el desarrollo de este trabajo, así como una descripción más profunda de los elementos relacionadas con el mismo y de las herramientas empleadas para el análisis de los datos.

### 3.1 Tratamiento de los datos

Uno de los elementos fundamentales a la hora de trabajar con modelos de aprendizaje automático es el conjunto de datos disponible. La cantidad y calidad de estos es determinante en la precisión de los modelos desarrollados. Los datos deben satisfacer algunas características importantes para que puedan dar lugar a resultados fiables de los que sacar conclusiones.

Los datos deben ser una muestra representativa de la población a la que representan, deben tener una cantidad suficiente para que el modelo pueda entrenarse correctamente y aprender de los patrones que se producen en estos y deben incluir las características relevantes que afecten al sistema. Además, el acondicionamiento de los datos es importante para el correcto funcionamiento de los modelos en su fase de entrenamiento, así como para evitar posibles efectos numéricos negativos en los resultados. Esto muestra la relevancia que tiene tener una metodología clara en el tratamiento del conjunto de datos.

#### 3.1.1 Descripción del conjunto de datos

Los datos de los que disponemos han sido proporcionados por los tutores de este trabajo y provienen de 7 centrales termosolares distintas. Todas de ellas con tecnología cilindro-parabólica, siendo este requisito indispensable debido a que analizaremos los tubos receptores presentes en este tipo de plantas.

Es importante tener en cuenta que estos datos provienen de centrales reales, pero debido al carácter confidencial que tienen nos referiremos a ellas bajo los nombres de central 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 respectivamente, para preservar la privacidad. Cabe resaltar que la calidad de los datos tomados de estas plantas termosolares avala nuestros resultados. Las medidas han sido recopiladas en diversas inspecciones realizadas por la compañía Virtualmech<sup>1</sup>. Los datos de temperatura de la funda de vidrio han sido tomados mediante imágenes termográficas capturadas con drones. Esta información, así como otras características aportadas por la planta (temperatura del fluido, posiciones, etcétera), permiten el uso de modelos computacionales que determinan los valores de presión de hidrógeno en la cámara de vacío, así como otras características relacionadas a la eficiencia/pérdida de los tubos receptores. Los valores de rotura de la funda de vidrio de los HCE han sido aportados por las plantas termosolares.

---

<sup>1</sup> <https://virtualmech.com/>

El conjunto de datos contempla 155.509 casos y se compone de 20 columnas que representan los valores del estado de un tubo para ciertas condiciones de sus características. Las nombres de las columnas son los siguientes:

- **"T\_HTF[C]"** : valor de la temperatura que alcanza el fluido caloportador en grados Celsius.
- **"T\_glass[C]"** : valor de la temperatura que alcanza el vidrio (tubo exterior) que limita el exterior con la cámara de vacío en grados Celsius.
- **"hce\_LocInLoop"** : posición de la tubería dentro de un lazo. Este número hace referencia al orden de los tubos en el lazo al que corresponden.
- **"PH2[mBar]"** : valor de la presión que alcanza el hidrógeno presente en la cámara de vacío, entre el tubo exterior y el tubo absorbedor, en milibares.
- **"Loss[W/m]"** : se refiere a la pérdida de energía por metro que se produce en el fluido que recorre el interior de los tubos. Esta puede deberse a diversas causas como la fricción con las paredes del tubo y provoca pérdidas en la energía cinética y en la presión del fluido.
- **"Eff"** : valor de la eficiencia de la obtención de energía térmica mediante la conversión de la energía luminosa, cuyo valor solo puede estar entre 0 y 1. Tiene una relación inversa con la pérdida debido a que cuanto más energía pierde el fluido caloportador, menos eficiente es la obtención de energía térmica.
- **"Eff\_ref"** : valor de la eficiencia de referencia. Es la eficiencia real máxima esperada para el tubo. Interesa que la eficiencia real sea lo más próxima a la eficiencia de referencia. En ningún caso podrá superar su valor.
- **"Delta\_Eff"** : diferencia entre la eficiencia y la eficiencia de referencia. Un valor indicativo de si el tubo trabaja de manera óptima o se aleja de su rendimiento esperado. Sus valores son negativos o iguales a 0.
- **"Tag"** : código alfanumérico que identifica a cada tubo.
- **"T\_glass Inf\_Limit"** : valor de la temperatura inferior límite del vidrio exterior del tubo en grados Celsius.
- **"T\_glass Sup\_Limit"** : valor de la temperatura superior límite del vidrio exterior del tubo en grados Celsius.
- **"Air Presence"** : variable que indica la posibilidad de que haya aire en el interior de la cámara de vacío. La variable solo puede tomar los valores "No" y "Possible", indicando si existe o no la posibilidad de que haya entrado aire en la cámara de vacío. Cabe destacar que el hecho de que no haya entrado aire en la cámara no significa que el tubo no pueda estar roto.
- **"Mechanical Integrity"**: variable que indica la aparente correcta integridad mecánica de los tubos. Toma un valor positivo ("ok") para todos nuestros datos por lo que no es relevante para nuestro análisis.
- **"plant\_name"** : indica el nombre de la central a la que pertenece el tubo. Por los motivos de confidencialidad expuestos anteriormente, no se mostrarán los nombres en este documento y se trabajará de forma anónima.

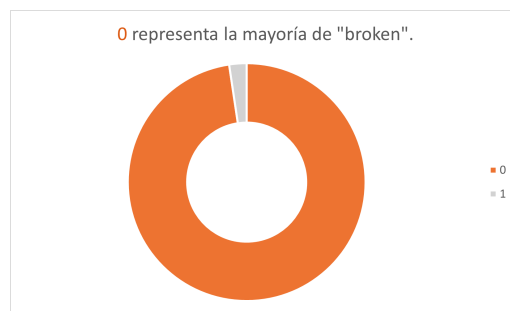
- **"month"** : dato relativo a los meses en que fue realizada la inspección. En nuestros datos toma los valores de 6 y 7 exclusivamente.
- **"hce\_letter"** : dato relativo al tipo de tubo específico. Clasificación por letras de la A a la H, que indica la localización del tubo dentro del campo solar. Información ya presente en "Tag".
- **"hce\_column"** : dato relativo al tipo de tubo específico. La variable toma valores discretos del 1 al 96.
- **"Custom\_Tag"** : etiqueta que contiene información relativa al tubo específico y no aporta información distinta al "Tag".
- **"inversion\_in"** : las plantas solares están divididas en columnas, y cada lazo en la planta inicia en una columna (de entrada) y termina en otra adyacente (de salida). La variable *inversion\_in* denota la columna de la planta solar en la cual cambia el orden de entrada/salida por lazo.
- **"img\_capture\_time"** : tiempo exacto en el que se tomaron las medidas indicando hora y fecha.
- **"broken"** : variable que indica si el tubo está roto o no. La variable es binaria, por lo que tomará el valor 0 si el tubo no está roto y el valor 1 si sí está roto.

### 3.1.2 Selección previa de los datos

Una vez descrito el conjunto de datos del que se dispone, se deben comentar sus características y seleccionar cuáles nos interesan para nuestro proyecto, con el fin de evitar añadir información que pueda resultar más perjudicial que beneficiosa y simplificar el trabajo.

El número tan grande de casos que contempla el conjunto de datos representa una ventaja importante a la hora de entrenar el modelo, ya que uno de los requisitos para su correcto entrenamiento era que el conjunto de datos fuese lo suficientemente grande. La precisión de nuestro modelo se verá beneficiada.

La variable "broken" es indispensable en el trabajo ya que representa nuestra variable objetivo, la salida que debe devolver nuestro modelo una vez entrenado. La cantidad de casos en los que "broken" vale 0, es decir, el tubo no está roto, es mucho mayor, siendo 151.833, mientras que los casos en los que la variable "broken" vale 1 (el tubo está roto), son sólo 3676. Esto puede influir en la precisión del modelo, que será superior prediciendo casos en los que los tubos no estén rotos que en los casos en los que sí estén rotos. Este factor se debe tener en cuenta, pero no debería ser preocupante si se alcanzan unos niveles de precisión adecuados.



**Figura 3.1** Gráfico circular que representa la cantidad de tuberías que no están rotas ("broken" = 0) y las que sí lo están ("broken" = 1). Existe una diferencia en la proporción de las clases importante, lo que puede descompensar la precisión del modelo según la clase de la salida.

A la hora de entrenar el modelo de forma eficiente debemos prescindir de aquellos datos que no aporten información para nuestro objetivo. En primer lugar, empezando por la variable de "inversion\_in", es posible prescindir de ella debido a que aporta información irrelevante para la determinación de la variable "broken", además de que los valores entre las diferentes centrales son muy parecidos. Pasa lo mismo con la variable "mechanical Integrity", que al tomar prácticamente el mismo valor en todos los casos no aporta información al modelo.

La variable "month" sería una variable interesante a tener en cuenta para determinar como afecta el paso del tiempo a la rotura de los tubos receptores, pero en nuestro caso concreto solo toma los valores 6 o 7, por lo que no nos aporta información. Con otro conjunto de datos con tiempos diversos, sería importante añadir esta variable. La ventaja de no utilizarla es la posibilidad de estandarizar tendencias con independencia del tiempo. En cualquier caso, las inspecciones a las plantas termosolares suelen producirse en verano, debido a la mayor concentración solar existente en esta época del año.

En lo referente a las variables que aportan información del tubo específico, como lo son "Tag", "Custom\_tag", "hce\_letter" y "hce\_column", no nos interesa diferenciar entre los tubos de manera individual por dos motivos. El primero es que las etiquetas son muy parecidas entre todas las centrales. El segundo es que estamos buscando analizar tendencias de manera general, sin importar el tubo específico del que proceden los datos.

Para seguir reduciendo el número de variables, para simplificar y ser eficientes con el modelo, podemos asumir que la variable "Air presence" no se antoja muy precisa indicando solo la posibilidad de que haya aire en el interior del tubo. La variable "img\_capture\_time" podría aportar información relevante, pero para nuestro estudio no analizaremos el tiempo en el que se toman los datos, para simplificar el modelo y bajo la hipótesis de que la variación del número de tuberías rotas en diferentes momentos del día es despreciable.

Escoger entre variables que aporten información similar puede ser beneficioso para nuestro objetivo de acondicionar los datos reduciendo las entradas innecesarias al modelo para mejorar sus prestaciones. Las variables "T\_glass Inf\_Limit" y "T\_glass Sup\_Limit" se comportan de la misma manera que la variable "T\_HTF[C]", aumentando y disminuyendo en la misma medida, por lo que nos quedamos exclusivamente con "T\_HTF[C]". Un caso similar ocurre con "Eff", "Eff\_ref" y "Delta\_Eff", siendo el último la diferencia de los dos anteriores, por lo que podemos prescindir de esta variable.

Finalmente, tras todo el discernimiento entre las variables para escoger aquellas que nos sean útiles a la hora de entrenar el modelo, intentando mantener el compromiso entre simplicidad y veracidad, nos quedan las siguientes variables: "T\_HTF[C]", "T\_glass[C]", "hce\_LocInLoop", "PH2[mBar]", "Loss[W/m]", "Eff", "Eff\_ref" y por supuesto "broken".

### 3.1.3 Acondicionamiento

El acondicionamiento de los datos es importante a la hora de entrenar un modelo de aprendizaje automático para evitar comportamientos erróneos y problemas numéricos.

Una buena opción para entrenar de manera eficiente el modelo, sería reducir el número de variables de entrada mediante técnicas como el análisis de componentes principales (PCA). Esto sería buena idea de manera general pero no para nuestro caso de manera particular debido a que trabajaremos con explicaciones contrafactuales. Los componentes hallados aplicando PCA harían que el modelo funcionase correctamente, pero al no corresponderse de manera directas con nuestras variables seleccionadas, no podríamos hallar explicaciones útiles mediante "counterfactuals". Es decir, el modelo prediciría correctamente, pero no podríamos hallar explicaciones del tipo: "este tubo no se habría roto si su presión y su eficiencia hubiesen sido más bajas".

Generalmente, se deben evitar ciertos valores en las variables. Tener una característica cuyos valores sean en su mayoría cercanos o iguales a 0 puede producir errores numéricos en los modelo. Analizando nuestras variables, la única que se corresponde con lo mencionado es "PH2[mBar]". La solución empleada es bastante simple pero efectiva: cambiar de milibares a microbares, con lo que los valores se alejan del 0 al ser multiplicados por 1000, resolviendo posibles errores numéricos.

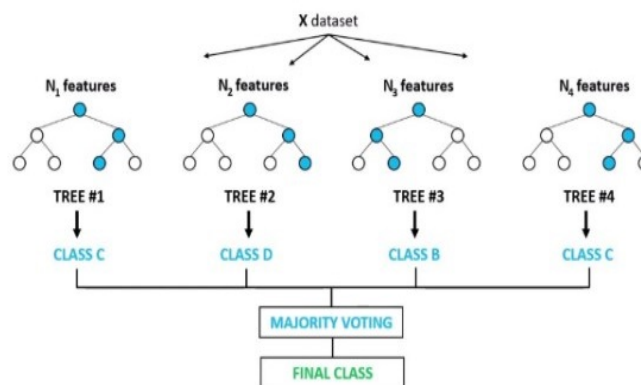
Tras una revisión de los valores de las características, los datos son válidos para el entrenamiento del modelo de aprendizaje automático. En nuestro caso no es necesario aplicar técnicas de normalización porque no tendrían influencia en el algoritmo de aprendizaje escogido (Random Forest) y desvirtuarían las explicaciones contrafactuales generadas.

## 3.2 Entrenamiento del modelo

La segunda etapa del trabajo consiste en el entrenamiento de un modelo de aprendizaje automático que sea capaz de predecir en base a las características de entrada si el tubo está roto o no. En este proyecto se trabaja con el lenguaje de alto nivel Python. Este lenguaje ofrece una amplia gama de bibliotecas y herramientas especializadas, como TensorFlow, PyTorch y Scikit-Learn, que agilizan el proceso de desarrollo de modelos y simplifican la implementación de algoritmos complejos. En concreto se emplea la biblioteca Scikit-Learn debido a su facilidad para generar modelos de clasificadores de forma sencilla y potente.

### 3.2.1 Clasificador Random Forest

Un clasificador Random Forest es un modelo de aprendizaje automático que combina múltiples árboles de decisión para realizar predicciones más precisas y robustas. La elección de utilizar un Random Forest como parte de esta metodología se basa en su capacidad para manejar datos complejos y su compatibilidad con la librería DiCE, la cual será presentada más adelante. Este enfoque se ha seleccionado con el propósito de obtener explicaciones efectivas y comprensibles mediante el uso de la técnica de counterfactuals.



**Figura 3.2** Esquema del funcionamiento del clasificador Random Forest. Se basa en la creación de multitud de árboles de decisión, seleccionando subconjuntos de entradas en cada uno. La salida resultante será la salida mayoritaria entre todos los árboles.

Un Random Forest opera generando múltiples árboles de decisión, cada uno entrenado en una muestra aleatoria y variada del conjunto de entrenamiento. La predicción final se obtiene mediante la combinación de las predicciones individuales de estos árboles, utilizando técnicas como el promedio de votos en el caso de clasificación. Esta agregación de múltiples modelos disminuye la probabilidad de sobreajuste y mejora la capacidad del modelo para generalizar a datos no vistos.

Las ventajas de un clasificador Random Forest son diversas. En primer lugar, es capaz de manejar características tanto numéricas como categóricas, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de conjuntos de datos. Además, es menos susceptible al sobreajuste en comparación con un solo árbol de decisión, gracias a la variabilidad introducida por el muestreo aleatorio. Esto lo convierte en un modelo robusto y capaz de lidiar con ruido y variabilidad en los datos.

Otra ventaja es su capacidad inherente para evaluar la importancia de las características en el proceso de toma de decisiones. Esto proporciona una comprensión adicional sobre qué características tienen un mayor impacto en la predicción, lo cual puede ser útil para la interpretación y explicación de los resultados.

El clasificador Random Forest cuenta con diversos parámetros e hiperparámetros que influyen en su comportamiento y rendimiento. Entre los parámetros más importantes se encuentra el número de árboles en el bosque (100), que puede ajustarse para equilibrar precisión y eficiencia computacional. Asimismo, los hiperparámetros como la profundidad máxima de los árboles (no limitada) y el número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo (2) controlan el nivel de complejidad y regularización del modelo. La optimización adecuada de estos parámetros e hiperparámetros se ajustan de manera experimental en el proceso de entrenamiento. En nuestro caso, se emplearon los valores mostrados anteriormente entre paréntesis.

En este contexto, la elección de un clasificador Random Forest no solo se justifica por su poder predictivo, sino también por su idoneidad para generar "counterfactuals" a través de la librería DiCE.

### **3.2.2 División del set de datos**

La división de los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba es una práctica esencial en el proceso de entrenamiento de modelos de aprendizaje automático. Esta división implica separar el conjunto de datos original en dos partes: una destinada a entrenar el modelo y otra para evaluar su rendimiento. Los datos de entrenamiento se utilizan para ajustar los parámetros del modelo y permitir que aprenda patrones en los datos. Por otro lado, los datos de prueba se mantienen aparte y se utilizan para medir la capacidad del modelo para generalizar a datos no vistos previamente, lo que ayuda a estimar su desempeño en situaciones del mundo real. La división en datos de entrenamiento y prueba es fundamental para evitar el sobreajuste del modelo y garantizar una evaluación imparcial de su capacidad predictiva.

En nuestro caso, la división se realizará mediante las herramientas de Sikit-Learn, estableciendo el set de entrenamiento como el 80% del conjunto de datos y el set de test como el 20%. Estos porcentos de división son estándar en la literatura relacionada al aprendizaje automático.

### **3.2.3 Evaluación de la precisión del modelo**

La precisión del modelo es una métrica que evalúa la proporción de predicciones positivas realizadas por el modelo que son realmente correctas en relación con todas las predicciones positivas. En otras palabras, mide la exactitud de las predicciones positivas entre todas las predicciones positivas y negativas realizadas.

Es importante evaluar las métricas de forma separada para cada clase de la variable "broken" (0 y 1) porque los desequilibrios en la distribución de clases pueden llevar a resultados engañosos. En situaciones en las que una clase es mucho más frecuente que la otra, como se comentó en la sección 3.1.2, un modelo puede alcanzar una alta precisión al predecir la clase mayoritaria pero perder detalles importantes en la predicción de la clase minoritaria. Evaluar por separado permite detectar este tipo de desequilibrios y entender cómo el modelo se desempeña en ambas clases.

La diferencia entre la precisión y la exhaustividad (recall) radica en qué enfoque toman en cuenta. La precisión se centra en la proporción de predicciones positivas correctas entre todas las predicciones positivas realizadas por el modelo. Por otro lado, la exhaustividad se centra en la proporción de predicciones positivas correctas entre todos los casos reales positivos en el conjunto de datos. En resumen, la precisión se enfoca en la precisión de las predicciones positivas, mientras que la exhaustividad se enfoca en la capacidad del modelo para capturar todos los casos reales positivos. [NO ES OBLIGATORIO, PERO podrías poner las fórmulas y queda explicado rápidamente.]

En caso de obtener valores inaceptables en la precisión del modelo, se debe repetir la fase de entrenamiento y reajustar los parámetros.



### 3.3 Generación de "counterfactuals"

Una vez obtenido el modelo de una manera correcta, se procede a la generación de explicaciones contrafactuales. La exploración de escenarios hipotéticos en las entradas que cambiasen la salida es fundamental para la extracción de conclusiones sobre la prevención de la rotura de los tubos receptores. La generación de estas explicaciones viene de la mano de la librería DiCE.

#### 3.3.1 Librería DiCE

La biblioteca DiCE, desarrollada por Microsoft, desempeña un papel fundamental en el análisis de modelos de aprendizaje automático (ML). Su funcionalidad reside en la generación de puntos de datos hipotéticos denominados "contrafactuales", que permiten explorar escenarios alternativos y comprender la respuesta del modelo ante diversos cambios en las características de entrada. DiCE aborda tanto el análisis de proximidad (cambios mínimos en los datos de entrada) como la diversidad (diferentes formas de alcanzar la misma salida del modelo), permitiendo así una comprensión más profunda del razonamiento interno del modelo.

Una característica destacada de DiCE es su capacidad para generar conjuntos de ejemplos contrafactuales, lo que permite evaluar la robustez y consistencia de las decisiones del modelo en diferentes contextos. Además, DiCE facilita la personalización de los valores permitidos para las características, garantizando que los contrafactuales generados sean factibles en términos prácticos y realistas.

La biblioteca también brinda la posibilidad de analizar la importancia local de las características en función de su frecuencia de cambio en los ejemplos contrafactuales. Esto permite identificar cuáles características tienen un impacto significativo en las predicciones del modelo en diferentes situaciones. A través de parámetros como "features\_to\_vary" y "permitted\_range", DiCE otorga control y flexibilidad al usuario para refinar la generación de contrafactuales y, por ende, el análisis de la importancia de las características.

DiCE representa una herramienta poderosa para la interpretación y análisis de modelos de ML, al permitir la exploración detallada de cómo los cambios en las características de entrada afectan las predicciones del modelo. Su enfoque en la proximidad, diversidad y viabilidad, junto con su capacidad para analizar la importancia de características, lo convierten en una gran elección en el proyecto.

#### 3.3.2 Importancia global de las características

Una de las opciones más interesantes que ofrece DiCE, en particular para este trabajo, es el de ofrecer puntuaciones de la importancia de las características sobre la influencia de éstas en la salida del modelo. Esta puntuación está relacionada con la dependencia de la salida a una característica para cambiar su valor. La puntuación de "T\_glass[C]" será alta si, por ejemplo, para pasar de un tubo roto a uno que no lo está, se generan 100 posibles "counterfactuals", y en la mayoría ha sido necesario cambiar su valor. Si el cambio de estado de la tubería no depende en la mayoría de casos de esta característica, obtendrá un valor bajo en su puntuación de importancia.

La puntuación generada aporta información crucial sobre qué variables son fundamentales en nuestro análisis. Estas son las más relevantes para el cambio de estado de la salida "broken" y serán en las que se centre más atención.

### 3.4 Procedimiento

El procedimiento para extraer resultados que garanticen el cumplimiento de los objetivos es una parte fundamental en cualquier proyecto. Tras haber definido los pasos a seguir en las anteriores secciones, esta sección pretende definir los pasos de manera práctica y clara.

### **3.4.1 Análisis de los datos de las centrales**

En primer lugar se realizará un estudio sobre los datos de las diferentes centrales. Mediante diferentes gráficas e histogramas, se pretende tener una visión general de la distribución de los tubos rotos y los no rotos en función de cada una de las características seleccionadas y conocer la cantidad de casos en función de los valores de dichas variables.

Este análisis tiene como objetivo encontrar tendencias y parecidos en los datos recopilados en las diferentes centrales para comprobar si es posible la extracción de conclusiones generales, que se puedan aplicar a todas las plantas en su conjunto, o por el contrario, las diferencias entre las características de las plantas sean tan grandes que impidan que se puedan analizar de manera conjunta.

El entrenamiento del modelo puede hacerse de manera individual, por cada central de la que se disponen datos, o de manera conjunta. El resultado esperado sería encontrar resultados homogéneos debido a la similitud de los tubos receptores de una planta a otra, lo que posibilita analizar tendencias más interesantes ya que presentan un carácter general.

### **3.4.2 Entrenamiento del modelo, obtención de conterfactuals e importancia global de las cracterísticas**

El desarrollo de esta parte sucede como se describe en las anteriores secciones. Se pretende entrenar un modelo con un grado de precisión aceptable con el que sacar "counterfactuals". Una vez logrado, se obtienen las puntuaciones de la importancia de las características, para obtener información de la relevancia de las variables.

### **3.4.3 Análisis con 3 variables**

La idea de esta parte es trabajar con 3 variables exclusivamente para poder visualizar resultados con facilidad. La selección de las variables se hará basado en las puntuaciones de la importancia global, en la relación entre las variables, para asegurarse de que aportan información que no sea redundante, y en que sean variables con posibilidad de variarse fácilmente.

Trabajar con 3 variables facilitará la posibilidad de extraer gráficos que nos ayuden a discernir las fronteras o rangos en los que los tubos funcionen correctamente de aquellas condiciones que rompan los tubos.

### **3.4.4 Extracción de conclusiones**

En esta última etapa del capítulo de la metodología, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las gráficas y datos que representan las explicaciones contrafactuales generadas mediante DiCE. Los resultados obtenidos serán sometidos a un riguroso análisis en busca de tendencias y patrones en el comportamiento de los tubos receptores. El objetivo principal es extraer información valiosa que contribuya significativamente a la prevención de la rotura de los tubos. La combinación de la interpretación de los resultados de los contrafactuales y la posterior identificación de patrones permitirá una comprensión más profunda de los factores que influyen en la integridad de los tubos receptores y, en última instancia, proporcionará claves para la toma de decisiones informadas en el ámbito de la prevención y seguridad en las plantas termosolares.

## 4 Análisis y resultados

---

**E**n este capítulo, nos adentraremos en la fase crucial de este estudio: los resultados. Aquí, presentaremos de manera detallada los hallazgos y conclusiones derivados de la metodología implementada. A través de análisis, gráficos y datos concretos, se pretende desvelar las tendencias, patrones y descubrimientos que hemos obtenido al explorar los datos y someterlos a un riguroso proceso de modelado y análisis. Estos resultados constituyen el núcleo de nuestro trabajo y proporcionan una visión clara de las implicaciones y aplicaciones prácticas de nuestra investigación en el campo de la prevención de la rotura de tubos receptores en plantas termosolares.

### 4.1 Análisis de los datos de las centrales

Empezaremos mostrando los resultados tras realizar un análisis a los datos de los que disponemos. Se realizan histogramas de los datos de las centrales que se escogieron como nuestras variables de entrada, haciendo un recuento de las tuberías rotas y no rotas.

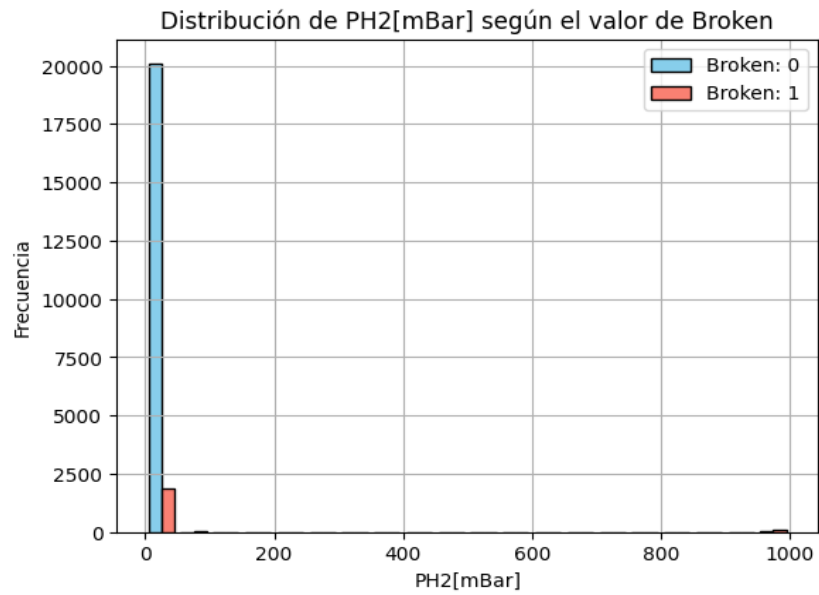
Para no extender el análisis en esta sección, se comparan exclusivamente los histogramas con los datos de la central 1 y la central 2, aunque el análisis es extrapolable a los datos de las demás centrales, que serán mostrados en el apéndice.

En la figura 4.1 podemos apreciar como prácticamente la totalidad de casos de los tubos, tanto rotos como no rotos, tienen valores próximos a 0 para la presión del hidrógeno en la cámara de vacío en la central 1.

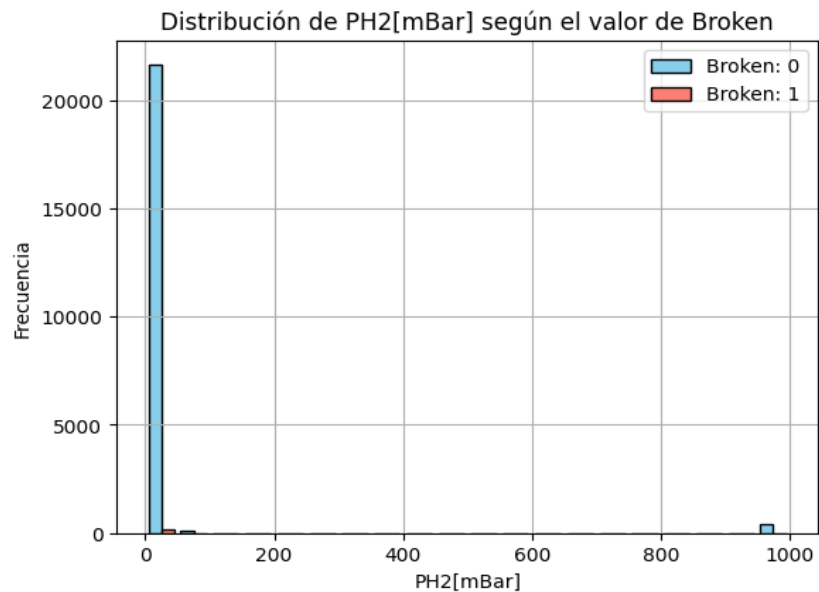
En la figura 4.2, que contiene los datos de la central 2, las presiones del hidrógeno en los tubos siguen prácticamente la misma distribución. Podemos apreciar también como una mínima parte de los tubos también tienen presiones elevadas, en torno a 1 bar, sin estar rotos.

En los histogramas que muestran la distribución según la temperatura del vidrio, figuras 4.3 y 4.4, se perciben algunas diferencias más notables como la presencia de un rango de temperaturas mayor en la segunda central, habiendo un repunte a partir de los 125 grados. Algunas de las centrales se parecen más a la distribución de la central 1 y otras a la de la central 2.

La similitud en la distribución conforme a la temperatura del fluido es evidente, habiendo aún así más casos de tubos rotos en la central 1. Esta distribución es muy parecida en todas las centrales.



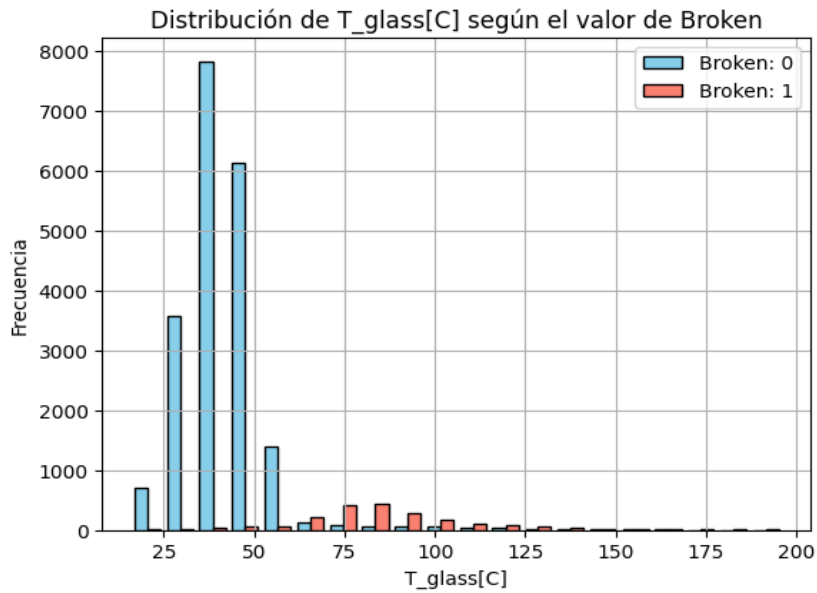
**Figura 4.1** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.



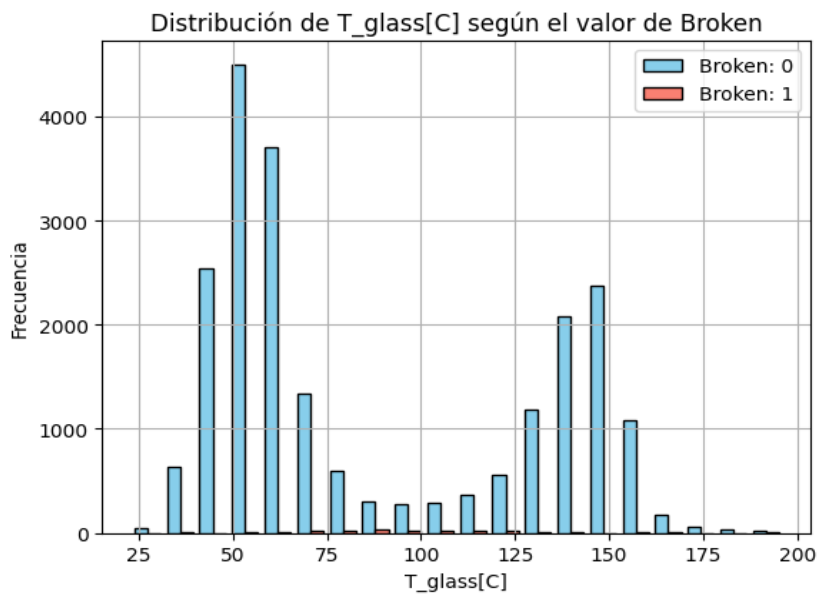
**Figura 4.2** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.

Con respecto al número del orden de los tubos dentro de los lazos, solo comentar que es prácticamente idéntico para todas las centrales, y que parece observarse una leve tendencia a que se rompan los tubos en las posiciones iniciales, finales y en los puntos de inversión del sentido del flujo.

En la pérdida de energía por metro, si parece haber alguna diferencia, parecido al caso de la temperatura del vidrio. En la segunda central, algunos tubos funcionan correctamente teniendo algo más de pérdida.



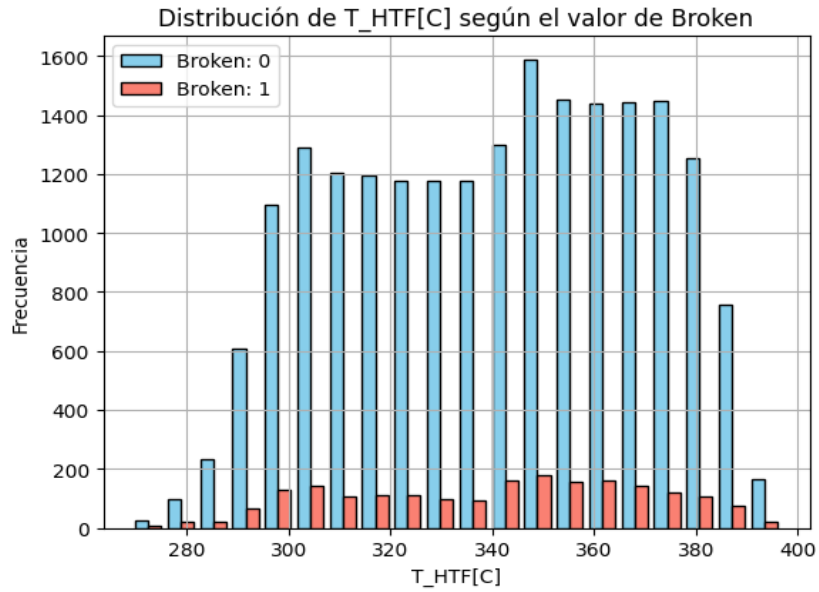
**Figura 4.3** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.



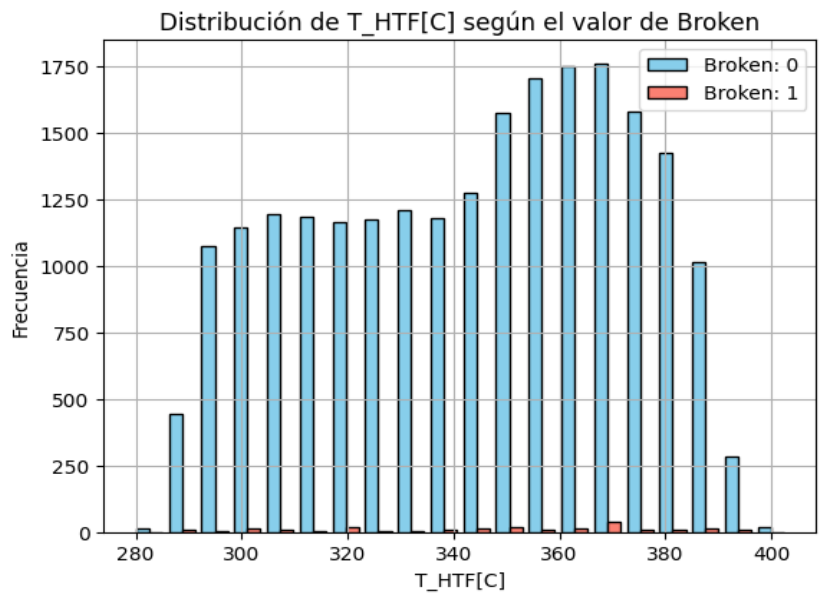
**Figura 4.4** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.

Los datos de la eficiencia tienen una clara relación inversa con la pérdida, por lo que las conclusiones son las mismas que en el anterior caso.

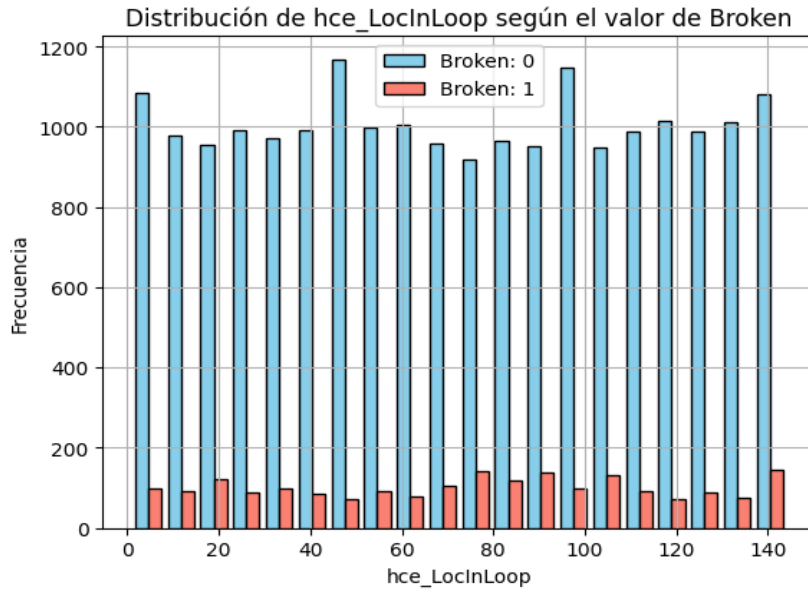
Valorando con carácter general las tendencias de las variables en las diferentes centrales, podemos asumir que tienen comportamientos similares, como se puede comprobar con el resto de centrales adjuntadas en el apéndice. Esto quiere decir que podemos ejecutar análisis de forma conjunta, sin asumir mucho error. El modelo puede generar explicaciones contrafactuales con los datos del conjunto de las centrales o con los datos de alguna central en concreto y las conclusiones deben ser parecidas.



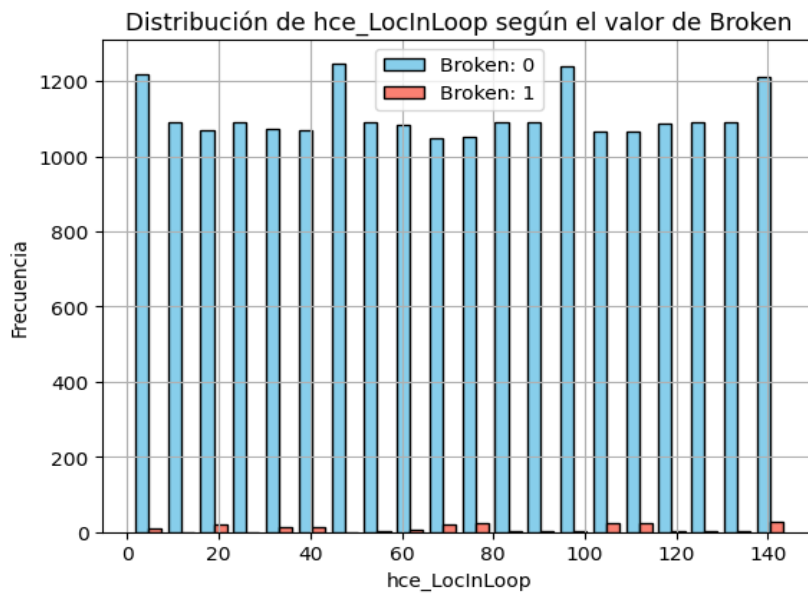
**Figura 4.5** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



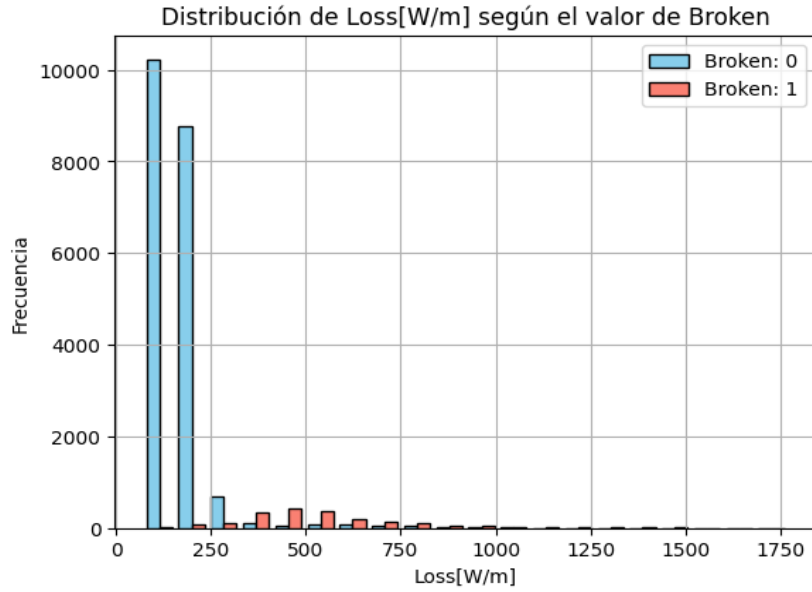
**Figura 4.6** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



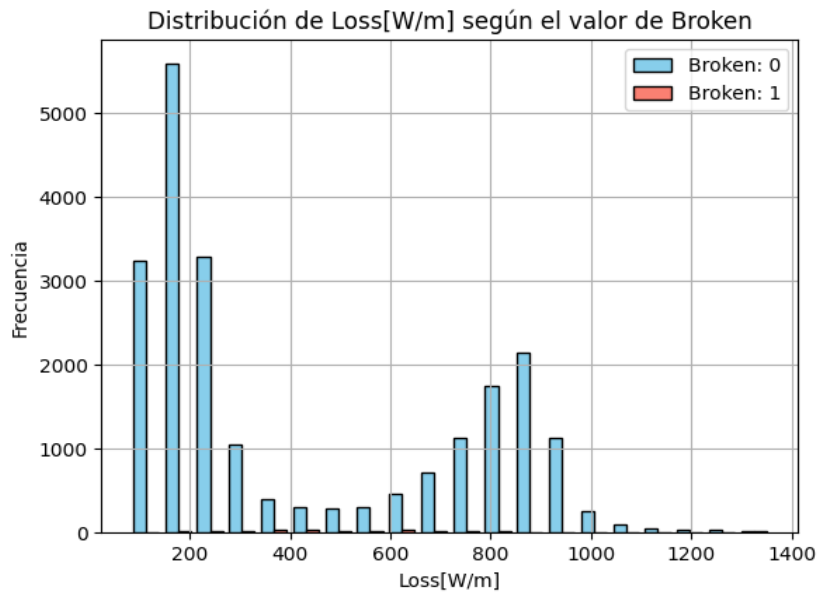
**Figura 4.7** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.



**Figura 4.8** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.

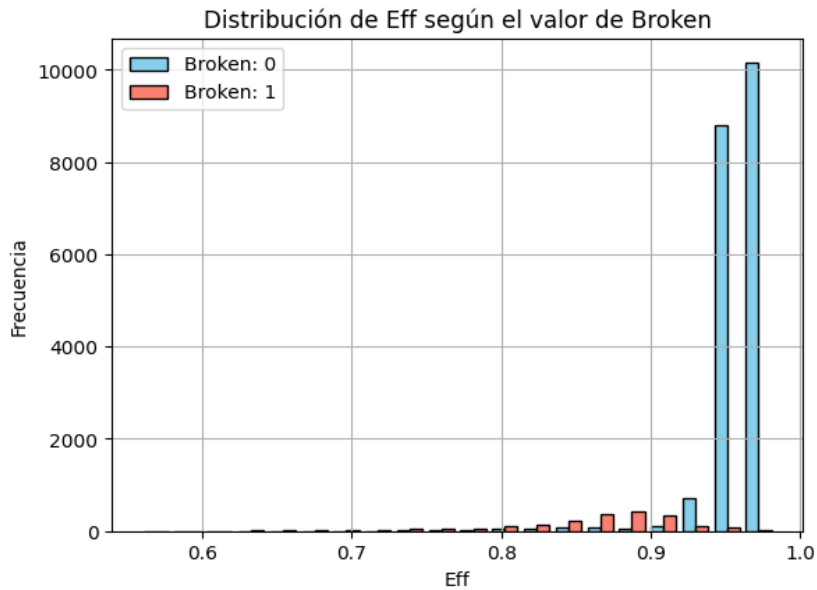


**Figura 4.9** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.

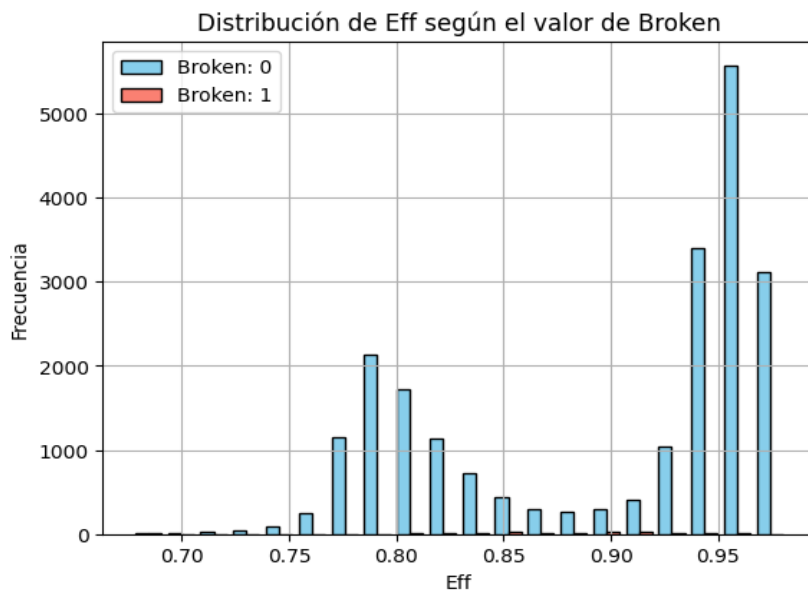


**Figura 4.10** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.





**Figura 4.11** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.



**Figura 4.12** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

## 4.2 Explicaciones contrafactuales

En esta sección se aborda toda la parte central del procedimiento desde el entrenamiento del modelo hasta la obtención de la importancia global de las características en el contexto de los 'counterfactuals'.

### 4.2.1 Modelo entrenado

Una vez entrenado el modelo con éxito, empleando para ello el clasificador 'Random Forest' con los parámetros mencionados en 3.2.1, usando los datos de todas las centrales en su conjunto, obtenemos los siguientes resultados referentes a la precisión del modelo, calculándose las métricas como:

Precisión = Verdaderos Positivos/(Verdaderos Positivos + Falsos Positivos)

Exhaustividad = Verdaderos Positivos/(Verdaderos Positivos + Falsos Negativos)

La puntuación final consiste en la media de la precisión y la exhaustividad.

Precisión del clasificador Random Forest:

0.985338563436435

Métricas para la clase 0:

Precisión: 0.9897501391754265

Exhaustividad: 0.9952909408239207

Puntuación F1: 0.9925128070405884

Métricas para la clase 1:

Precisión: 0.7469026548672566

Exhaustividad: 0.5741496598639456

Puntuación F1: 0.6492307692307692

Comprobando la precisión obtenida para la clase "broken" con valor 1, se puede afirmar que la precisión es insuficiente para obtener resultados completamente fiables. Unos índices tan bajos de acierto se deben a la diferencia general entre los casos de tubos que no están rotos, en comparación con los que sí están rotos.

Una solución posible es entrenar el modelo en base a exclusivamente los datos de una de las centrales. En nuestro caso la central 1 tiene un mejor balance entre los distintos casos. Al tener más casos de tubos rotos podremos mejorar la precisión de nuestro modelo.

Una vez entrenado con éxito el modelo con los datos de la central 1 se obtienen los siguientes resultados.

Precisión del clasificador Random Forest:

0.9699774266365688

Métricas para la clase 0:

Precisión: 0.9831432821021319

Exhaustividad: 0.9853416149068323

Puntuación F1: 0.9842412209951606

Métricas para la clase 1:

Precisión: 0.851010101010101

Exhaustividad: 0.8320987654320988

Puntuación F1: 0.8414481897627966

Los resultados obtenidos con el modelo de la central 1 presentan una precisión muy superior al modelo entrenado para el conjunto completo de datos. Con este modelo podemos extraer conclusiones más precisas.

#### 4.2.2 Ejemplos de "counterfactuals" individuales

En este apartado mostramos algunos ejemplos individuales de explicaciones contrafactuales. Un tubo que no estaba roto pasa a estarlo en una serie de casos. La imagen muestra las explicaciones generadas aleatoriamente en base al modelo entrenado y a una instancia perteneciente al conjunto de datos de la central 1.

|   | T_HTF[C]   | T_glass[C] | hce_LocInLoop | PH2[uBar] | Loss[W/m]  | Eff      | Eff_ref  | broken |
|---|------------|------------|---------------|-----------|------------|----------|----------|--------|
| 0 | 323.200012 | 29.0       | 56            | 0.1       | 121.301231 | 0.970334 | 0.970334 | 0      |

Diverse Counterfactual set (new outcome: 1.0)

|   | T_HTF[C] | T_glass[C] | hce_LocInLoop | PH2[uBar] | Loss[W/m]  | Eff      | Eff_ref  | broken |
|---|----------|------------|---------------|-----------|------------|----------|----------|--------|
| 0 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 947474.9  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 1 | 323.2    | 61.9       | 56.0          | 114665.3  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 2 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 460419.4  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 3 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 194782.7  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 4 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 499172.2  | 121.301233 | 0.970334 | 0.940884 | 1      |
| 5 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 952932.9  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 6 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 182097.3  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 7 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 528514.6  | 121.301233 | 0.970334 | 0.970334 | 1      |
| 8 | 323.2    | 29.0       | 56.0          | 865530.6  | 121.301233 | 0.970334 | 0.954951 | 1      |
| 9 | 323.2    | 174.7      | 56.0          | 0.1       | 121.301233 | 0.650704 | 0.970334 | 1      |

**Figura 4.13** Una instancia perteneciente al conjunto de datos seguida de 10 "counterfactuals" generados aleatoriamente. En cada uno cambia una o más variables con el objetivo de cambiar la salida. El cambio más frecuente es el de la presión de hidrógeno, aunque también cambia la temperatura del vidrio y la eficiencia en algunos ejemplos. Los ejemplos son generados de manera aleatoria por lo que en cada simulación los cambios serán diferentes.

En la imagen se muestra un caso particular de generación de counterfactuals en los que vemos como se generan 10 posibles casos en los que se rompería el tubo receptor.

Podemos apreciar varios rasgos interesantes en este caso particular, como por ejemplo que la mayoría de las explicaciones implican un aumento brusco de la presión del hidrógeno. Esta dependencia era de esperar debido a que obtuvo una alta puntuación en la importancia global (ver sección siguiente), que implica la dependencia que tiene el cambio de estado en una característica concreta, contabilizada como el número de explicaciones en las que ésta varía.

Hay dos casos de particular interés en nuestro ejemplo, en los que no sólo varía la presión. En la explicación número 2, la presión toma un valor más bajo que en el resto de casos, pero se ve respaldada por un aumento de la temperatura del vidrio. En estas condiciones el tubo estaría roto.

El otro caso, más particular aún, muestra que no varía la presión y, sin embargo, el tubo está roto. Para los datos mostrados, ese aumento de la temperatura del vidrio con ese descenso de la eficiencia representan unas condiciones para las que el tubo estaría roto.

La generación de este tipo de explicaciones a gran escala nos permite obtener tendencias de carácter general, así como acotar aquellas zonas en las que los tubos se encuentran correctamente de las zonas en las que los tubos estarían rotos según nuestro modelo entrenado.

|   | T_HTF[C] | T_glass[C] | hce_LocInLoop | PH2[uBar] | Loss[W/m]          | Eff                | Eff_ref            | broken |
|---|----------|------------|---------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|
| 0 | 323.2    | 44.8       | -             | 6475.6    | 121.30123324786705 | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 1 | 323.2    | -          | -             | 9569.2    | 1576.908           | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 2 | 323.2    | -          | -             | 696.8     | 1714.5435          | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 3 | 323.2    | -          | -             | 8210.2    | 121.30123324786705 | 0.84099549         | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 4 | 323.2    | 97.9       | -             | 3255.3    | 121.30123324786705 | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 5 | 310.7    | -          | -             | 9335.7    | 121.30123324786705 | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 6 | 323.2    | -          | -             | 6527.6    | 121.30123324786705 | 0.8544331          | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 7 | 323.2    | -          | -             | 2350.0    | 641.155            | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 8 | 323.2    | 142.8      | -             | 7292.1    | 121.30123324786705 | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |
| 9 | 323.2    | -          | -             | 4600.9    | 1190.3242          | 0.9703340238765484 | 0.9703340238765484 | 1.0    |

**Figura 4.14** 10 "counterfactuals" generados aleatoriamente. La diferencia con la figura anterior reside en que se limita el rango de variación de la presión, para visualizar otras explicaciones más variadas. Se pueden apreciar variaciones en todas las variables menos en la posición del tubo y en la eficiencia de referencia que se han bloqueado su cambio por su sentido físico en la realidad.

### 4.2.3 Importancia global de las características

A la hora de realizar el estudio de la importancia global de las características, es importante recordar que la puntuación se basa en la necesidad de que una característica varíe para que la instancia pase a ser de la clase opuesta. Además, estas puntuaciones se basan en explicaciones aleatorias, por lo que, aunque tendrán una tendencia clara debido a la gran cantidad de datos que se analizan, no representan una verdad absoluta.

Las cifras de las puntuaciones de la importancia global de las características, en base al modelo entrenado para la central 1 se presentan a continuación.

PH2[uBar] Global Importance: 0.8611

T\_glass[C] Global Importance: 0.1362

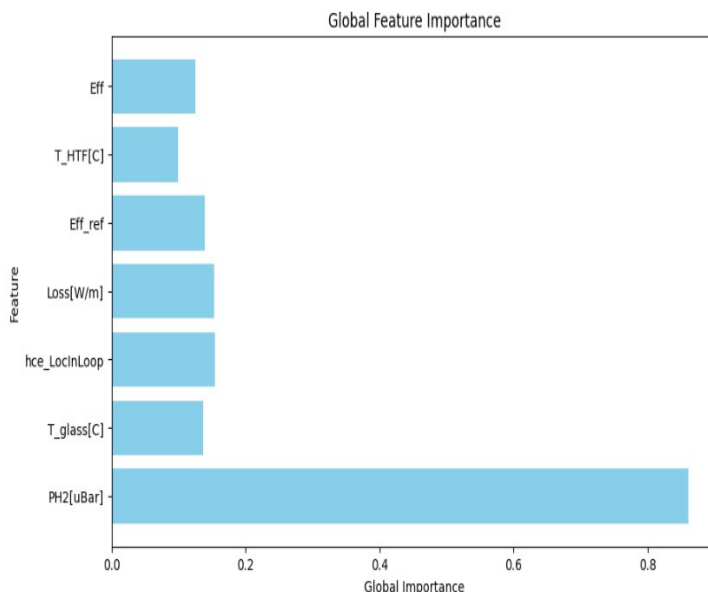
hce\_LocInLoop Global Importance: 0.1545

Loss[W/m] Global Importance: 0.1531

Eff\_ref Global Importance: 0.1385

T\_HTF[C] Global Importance: 0.0994

Eff Global Importance: 0.1246



**Figura 4.15** Puntuación de la importancia global de las características con los datos de la central 1. Las características con mayor puntuación varían en mayor número de casos en los counterfactuals generados. Esto implica que la salida del modelo depende en mayor medida del valor de esa variable.

De estas puntuaciones se puede extraer algunas conclusiones relevantes. La importancia de variaciones de la presión del hidrógeno para que un tubo receptor pase de un estado a otro es evidente. Podemos definir esta característica como un factor clave. No obstante, pueden existir explicaciones que no requieran a la fuerza una variación de la presión.

Otra reflexión que nos dejan las puntuaciones es la igualdad entre las demás características. Las explicaciones serán por tanto variadas más allá de la cierta dependencia al valor de la presión del hidrógeno.

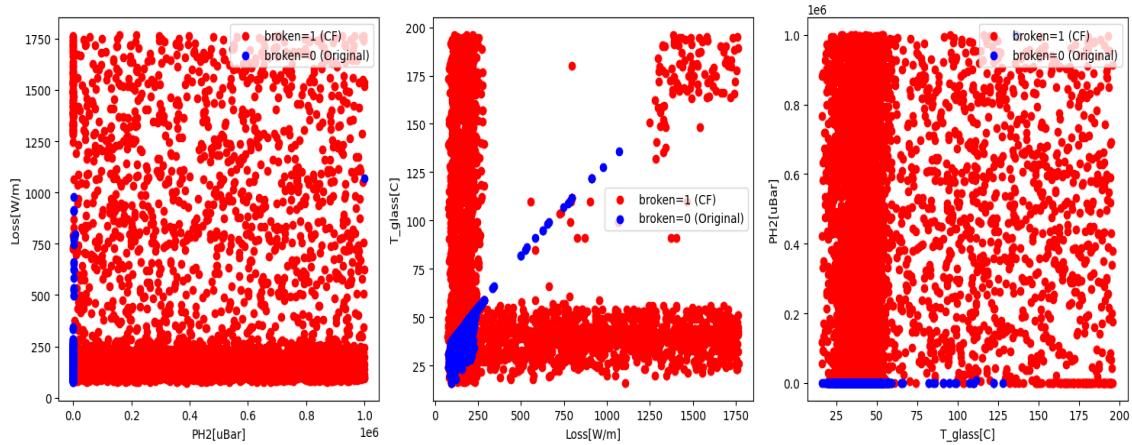
Siguiendo la metodología establecida, se escogen 3 características para el análisis gráfico de las tendencias. De las puntuaciones sacamos en claro que la variable "PH2[uBar]" debe ser escogida para dicha representación. En la elección de las otras dos variables podemos elegir intentando abarcar la mayor información posible. La segunda con puntuación más alta es la posición del tubo en el lazo, pero al ser esta una característica inmutable en nuestro análisis, optaremos por tomar la siguiente variable que sería "Loss[W/m]". La eficiencia de referencia es, de igual manera, una característica fija del tubo, y la eficiencia tiene una relación inversa con la pérdida por lo que no nos aportaría mucha más información. Las dos opciones finales podrían ser la temperatura del vidrio y la temperatura del fluido. Nos quedaremos con "T\_glass[C]", que tiene una puntuación levemente superior.

## 4.3 Tendencias generales

En esta sección se presentan resultados obtenidos para el modelo de la central 1, extrapolable para todas las centrales como vimos al inicio del capítulo, en base a las variables seleccionadas en la sección anterior por su

naturaleza y su relevancia en los "counterfactuals". Los resultados se corresponden con una selección de los datos de prueba reservados, es decir, un conjunto de datos que no han sido empleados en el entrenamiento de los modelos.

Para el modelo entrenado con los datos de la central 1, se han seleccionado 1000 instancias de los datos de prueba en las que los tubos receptores tenían un valor de "broken" igual a 0, no rotos. A cada una de estas instancias se le han sacado 5 explicaciones contrafactuales, que muestran como romper esas tuberías. En las siguientes gráficas se muestran en azul los tubos que no están rotos, casos reales, y en rojo los tubos que sí están rotos, explicaciones generadas.



**Figura 4.16** Gráficas de las tendencias de la central 1 que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios.

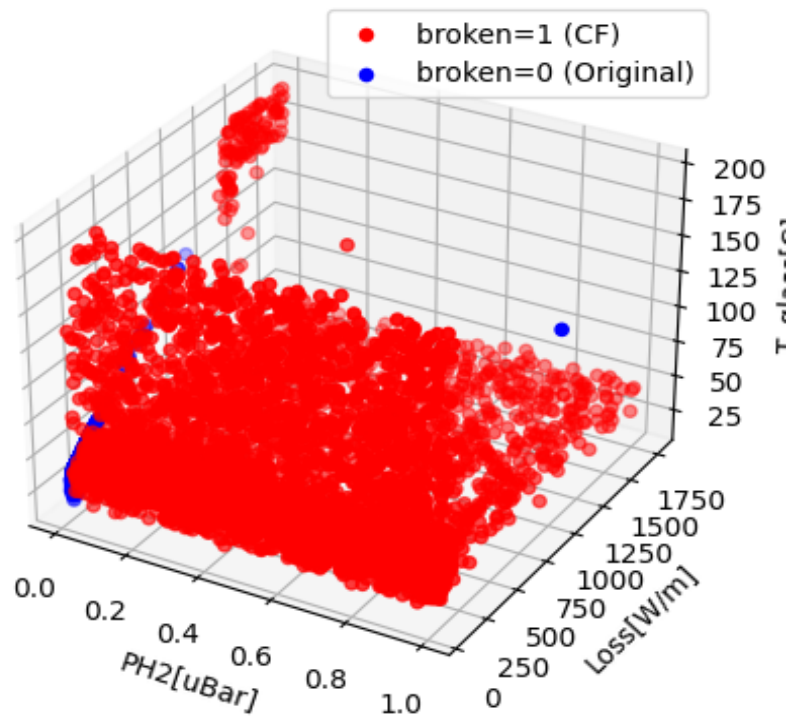
En estas gráficas se pueden apreciar ciertas tendencias claras. Como ya podíamos predecir tras obtener la puntuación tan alta en la presión en la importancia global, el valor de la presión es determinante en la decisión de si un tubo está roto o no.

Es importante destacar que la concentración de puntos rojos en ciertas zonas, mientras que otras zonas están con menos puntos y más espacio en blanco, no implica que tubos en esas zonas no estuviesen rotos; probablemente sí lo estarían si no se encuentran muy próximos a la parte azul. Lo que podemos extraer de la concentración de puntos rojos en ciertas zonas es que son las explicaciones más repetidas, por tanto las más probables o las que más fácilmente generarían la rotura del tubo.

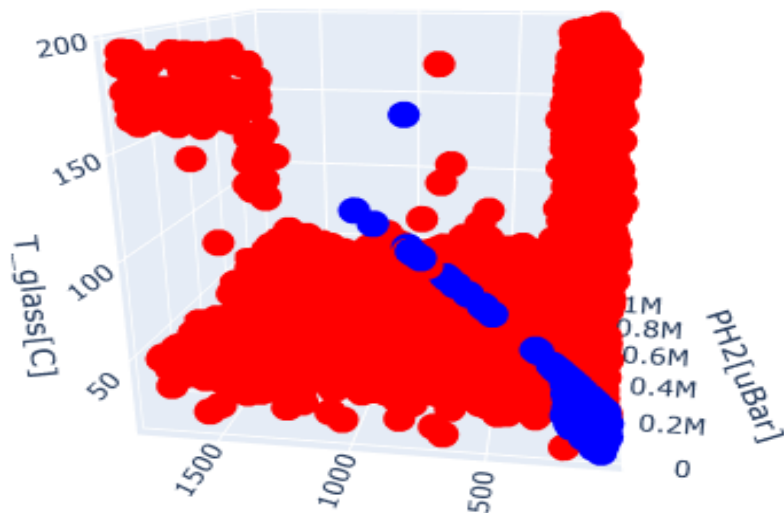
En los casos en los que la presión varía poco o nada, un aumento de la temperatura del vidrio sin que aumentase la pérdida no sería posible. Del mismo modo, un aumento de la pérdida, sin que aumentase la temperatura del vidrio, significaría con altas probabilidades que el tubo está roto.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones, podemos realizar de nuevo explicaciones limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar (1000 uBar), para comprobar específicamente el comportamiento de los tubos cuando la cámara de vacío no presenta ningún problema.

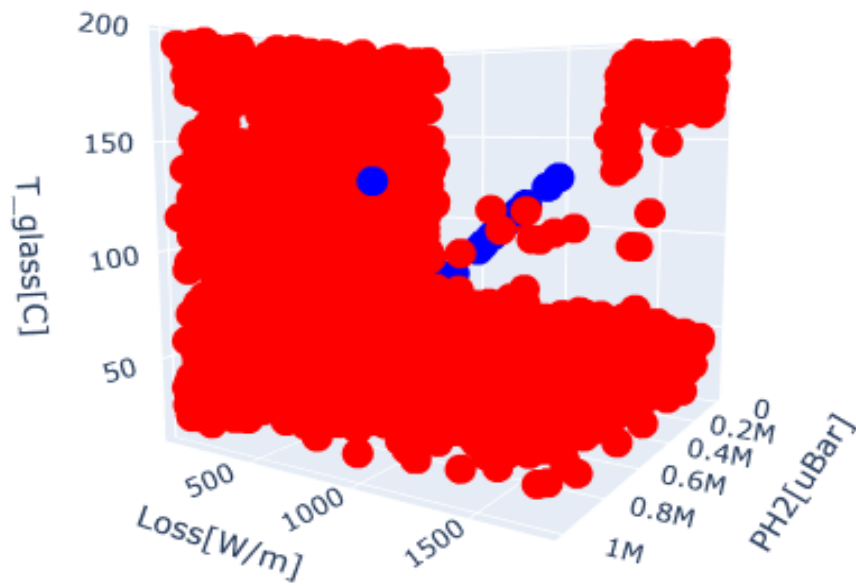
En estas representaciones en las que la presión prácticamente no varía, podemos observar como la mayoría de las explicaciones de rotura de los tubos tienen tendencia a un aumento de la pérdida energética, ya que se concentran hacia la derecha de la franja marcada por los tubos que no están rotos, en la gráfica de pérdida frente a temperatura del vidrio, figura 4.22.



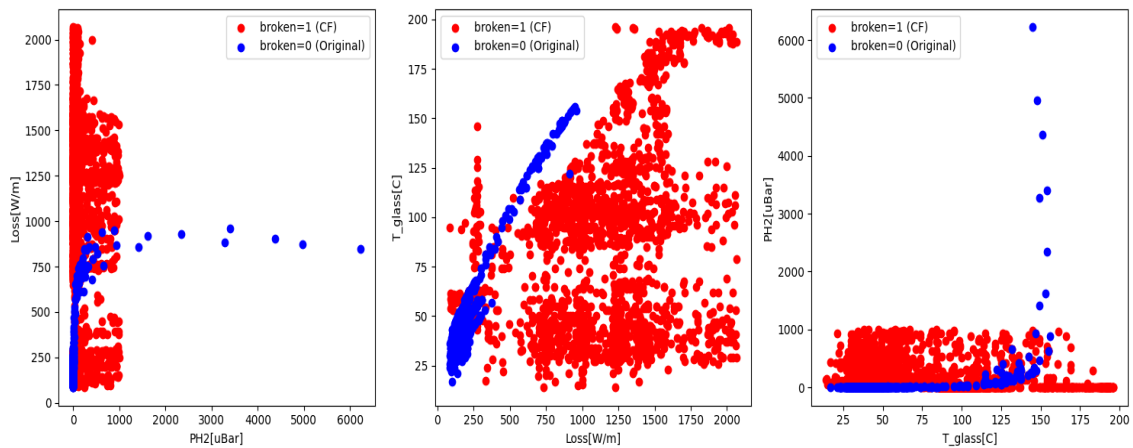
**Figura 4.17** Gráfica de las tendencias de la central 1 que representan las características en 3D. Representa los mismos datos que la figura previa pero representando las tres variables conjuntamente.



**Figura 4.18** Gráfica de las tendencias de la central 1 que representan las características en 3D, mostrando diferentes perspectivas. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares.

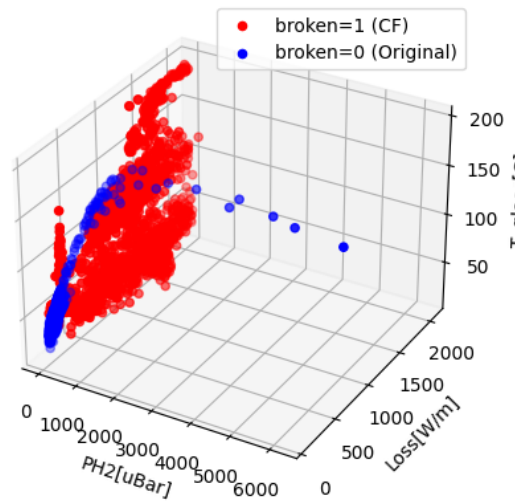


**Figura 4.19** Gráfica de las tendencias de la central 1 que representan las características en 3D, mostrando diferentes perspectivas. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares.

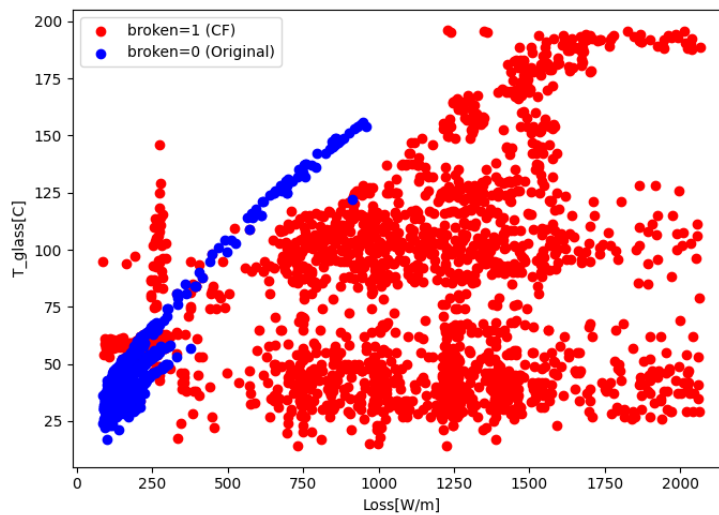


**Figura 4.20** Gráficas de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios.





**Figura 4.21** Gráfica de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representa las tres características, PH2, Loss y T glas, en los ejes. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios.



**Figura 4.22** Gráfica de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representa Loss y T glas, en los ejes. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios.



## 5 Conclusiones

---

**E**n este capítulo final, llegamos al cierre de nuestro estudio sobre la prevención de roturas en los tubos de plantas termosolares mediante el uso de modelos de aprendizaje automático y explicaciones contrafactuales. A lo largo de esta investigación, hemos explorado las bases teóricas de las plantas termosolares, los modelos de aprendizaje automático y la relevancia de los "counterfactuals". Ahora, es el momento de resumir los hallazgos clave, discutir las implicaciones de nuestro trabajo y señalar direcciones futuras en este campo de estudio importante para la ingeniería y la eficiencia energética.

### 5.1 Conclusiones específicas

A lo largo de este trabajo, se han desarrollado con éxito grupos de "counterfactuals", o de explicaciones contrafactuales, que muestran ejemplos de como pasar de roto a no roto o viceversa, en los tubos receptores de plantas termosolares. Estas explicaciones son francamente útiles si se generan estudiando casos concretos de tuberías.

Se han estudiado las similitudes entre datos de diferentes centrales, mostrando tendencias muy parecidas en sus características, por lo que, si salvamos excepciones, las conclusiones son extrapolables de manera general en todas las centrales termosolares con tecnología cilindro-parabólica.

Se ha evaluado la importancia de las diferentes características, comportándose de manera parecida aquellas variables que seleccionamos en nuestro estudio, "T\_HTF[C]", "T\_glass[C]", "hce\_LocInLoop", "Loss[W/m]", "Eff", "Eff\_ref", salvando "PH2[mBar]" que se muestra como determinante en el estado de los tubos receptores. Se puede afirmar que la variable más importante de controlar en la prevención de roturas es la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío. Es decir, la preservación de la cámara de vacío es determinante en el correcto funcionamiento de los tubos receptores. La presión del hidrógeno se debe mantener lo más próxima a 0 posible para evitar roturas. Un leve aumento de la presión supone, salvo alguna excepción concreta, una rotura del tubo. Un aspecto a destacar en este sentido es que existen métodos para reducir los valores de presión de hidrógeno en la cámara de vacío. La idea es remplazar el hidrógeno por gases nobles como el argón, mejorando así la eficiencia del intercambio térmico. Con el empleo de los counterfactuals, es posible conocer el momento crítico en el cual debe aplicarse el tratamiento con argón para prevenir la rotura del HCE.

Del análisis de los datos de las centrales, con respecto a la posición de los tubos en el orden del lazo, existe cierta tendencia de rotura en los tubos que se encuentran en la inversión del flujo y en los primeros y en los últimos tubos de cada lazo. Un esfuerzo mayor en el mantenimiento de los tubos situados en estas posiciones puede ayudar en la prevención de roturas.

Tanto el aumento de las pérdidas como el aumento de la temperatura del vidrio aumentan en gran medida las posibilidades de rotura de los tubos receptores. Se pueden establecer valores aproximados como óptimos y

críticos. Las temperaturas del vidrio óptimas estarían comprendidas entre 0 y 50 grados Celsius. Aumentos de la temperatura entre 50 y 75 pasarían a ser temperaturas de riesgo de rotura mientras que por encima de 75 el riesgo de rotura es crítico. De igual manera, valores en la pérdida de entre 0 y 250 W/m sería valores con poca probabilidad de rotura. Entre 250 y 350 aumenta la probabilidad de rotura. Más allá de estos valores entramos en la zona de riesgo crítico.

Cuando se ha limitado el aumento de la presión, para valorar el comportamiento de los tubos receptores en función de la temperatura del vidrio y de la pérdida energética, vemos que la tendencia de los puntos de los tubos rotos se concentraba en la zona con altas pérdidas en lugar de en la zona de altas temperaturas del vidrio exterior. Esto nos lleva a pensar que la probabilidad de rotura es mayor si las pérdidas son elevadas que si la temperatura del vidrio es elevada, siendo ambas situaciones riesgos de rotura.

## 5.2 Conclusiones generales

El método de "counterfactuals" utilizado en este estudio ha demostrado ser una herramienta poderosa en la prevención de roturas en los tubos de plantas termosolares y, en general, ha aportado beneficios significativos a nuestro trabajo de investigación. Aquí están algunas conclusiones generales sobre los beneficios tanto del método de "counterfactuals" como del trabajo en su conjunto:

- **Mejora en la interpretación de modelos de aprendizaje automático:** Los "counterfactuals" permiten una comprensión más profunda de cómo los modelos de aprendizaje automático toman decisiones. Esto resulta fundamental para los ingenieros y operadores de plantas termosolares, ya que pueden entender qué características específicas influyen en las predicciones del modelo.
- **Optimización del mantenimiento preventivo:** Al proporcionar escenarios hipotéticos de cómo podrían haberse evitado las roturas, los "counterfactuals" ofrecen una guía práctica para la toma de decisiones en cuanto al mantenimiento preventivo de los tubos receptores. Esto puede ayudar a ahorrar costos al evitar reparaciones innecesarias y reducir el tiempo de inactividad de la planta.
- **Aumento de la eficiencia operativa:** Al identificar tendencias y patrones a través de las explicaciones contrafactuales, este enfoque puede llevar a una operación más eficiente de las plantas termosolares. La capacidad de anticipar y prevenir roturas significa una mayor disponibilidad de energía y, en última instancia, un mejor rendimiento de la planta.
- **Reducción de riesgos y costos:** Al prevenir roturas en los tubos receptores, se minimizan los riesgos asociados, como interrupciones costosas en la producción y riesgos para la seguridad operativa. Esto puede llevar a una considerable reducción de costos a largo plazo.
- **Aplicabilidad en otros campos:** Aunque este estudio se centró en plantas termosolares, el enfoque de utilizar "counterfactuals" para mejorar la toma de decisiones basadas en modelos de aprendizaje automático es altamente aplicable en otros campos, como la medicina, la logística o la gestión de riesgos.

En resumen, el método de "counterfactuals" se ha destacado como una herramienta esencial en la prevención de roturas en plantas termosolares, brindando beneficios significativos en términos de eficiencia, reducción de costos y toma de decisiones informadas. Este trabajo representa un paso hacia la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad de las plantas termosolares, pretendiendo que su aplicación tenga un impacto positivo.

Se considera que el estudio asienta una base interesante e innovadora sobre la que mejorar, desarrollar y construir nuevos métodos e investigaciones con las que enriquecer tanto el ámbito del sector energético como otros campos de estudio de la sociedad.

### 5.3 Propuestas de mejora

A lo largo de este estudio, hemos explorado a fondo la aplicación de modelos de aprendizaje automático y explicaciones contrafactuales en el análisis de datos relacionados con tubos receptores de plantas termosolares. Hemos obtenido valiosas percepciones sobre cómo prevenir posibles roturas y mejorar la eficiencia de estas plantas críticas. Sin embargo, como en cualquier campo de investigación en constante evolución, este trabajo abre la puerta a una serie de oportunidades para futuras investigaciones y mejoras. En esta sección, delinearemos algunas de estas sugerencias, destacando áreas clave donde se puede ampliar y profundizar aún más en nuestro enfoque.

Una opción que se propone como posible mejora y enriquecimiento del estudio es la exploración de counterfactuals mediante modelos de "deep learning". Estos modelos de aprendizaje automático pueden ofrecer otras rutas como la de usar otro método en la generación de "counterfactuals", basados en el gradiente de las funciones a optimizar.

Otra limitación apreciada durante el transcurso del estudio, es la baja cantidad de datos relacionados a tubos receptores rotos en comparación a la cantidad de datos de los tubos que no lo estaban. Una obtención de mayor número de datos sobre los tubos rotos mejoraría el comportamiento de los modelos y por tanto del resultado. Así mismo, puede ser de interés el estudio de técnicas en la rama de la Inteligencia Artificial para el procesamiento de datos con un desbalance notorio en la variable que se desea predecir.

Es esencial recordar que la innovación y la mejora son procesos continuos. Las sugerencias de mejoras futuras aquí presentadas son solo el primer paso hacia un horizonte de numerosas posibilidades. El éxito de cualquier investigación radica en su capacidad para evolucionar y adaptarse a medida que surgen nuevos desafíos y oportunidades.

Este estudio representa un punto de partida en un campo de investigación relativamente inexplorado. Al combinar y aplicar innovadoras técnicas en un ámbito interesante, hemos sentado las bases para futuras investigaciones. Esperamos que este trabajo inspire y guíe a otros investigadores a construir sobre esta sólida base, introduciendo mejoras tanto en los datos como en la metodología. Creemos que esta línea de trabajo prometedora no solo contribuirá al avance en nuestro campo de estudio, sino que también podría tener un impacto significativo en otras áreas de la sociedad. A medida que avanzamos hacia el futuro, esperamos ver cómo esta investigación sirve como plataforma para enriquecer el sector energético y más allá, impulsando un mayor conocimiento y desarrollo en múltiples disciplinas.

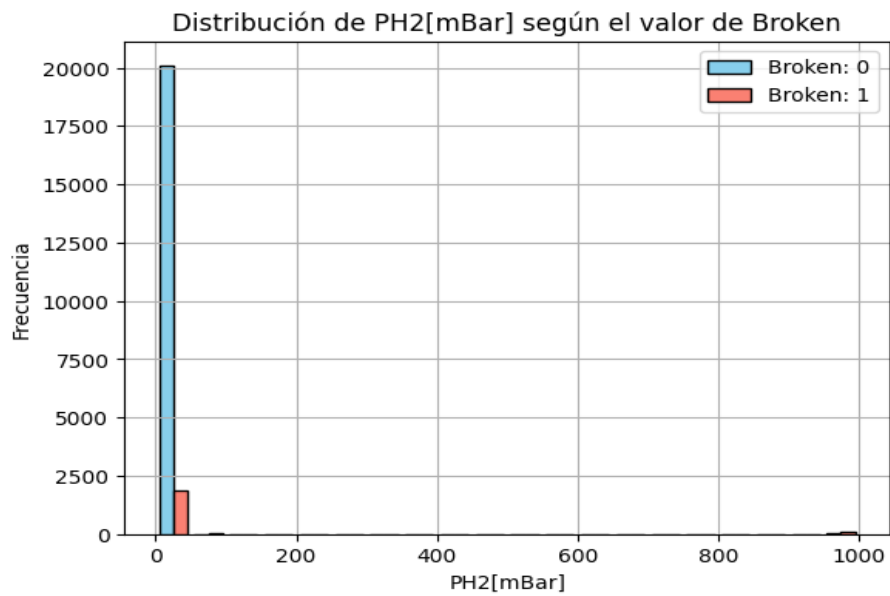


# 6 Anexos

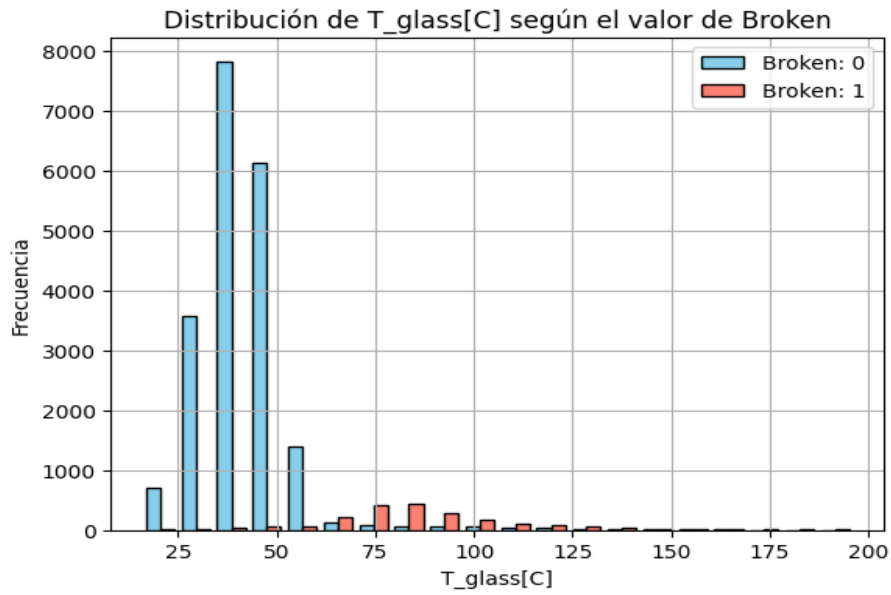
---

## 6.1 Anexo 1: histogramas de los datos de las centrales.

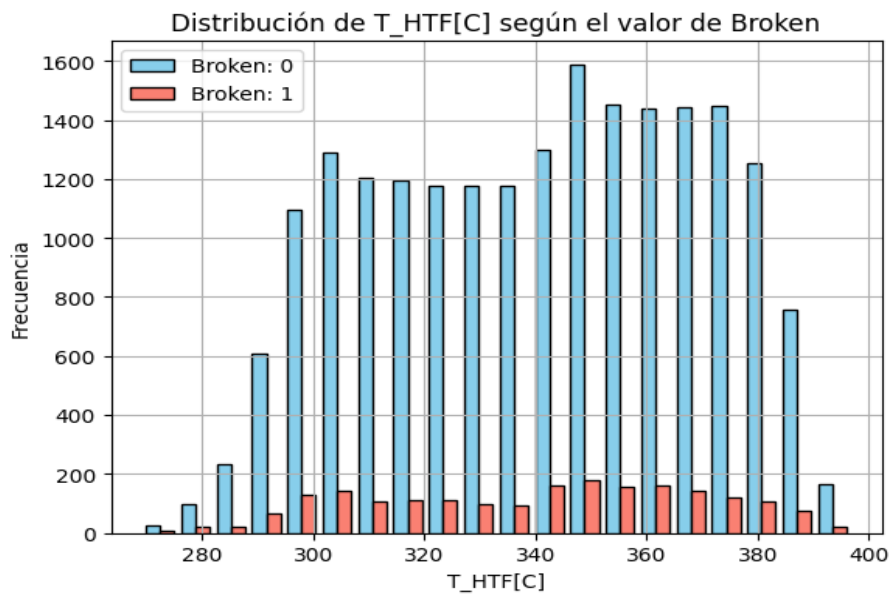
### 6.1.1 Datos central 1



**Figura 6.1** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.

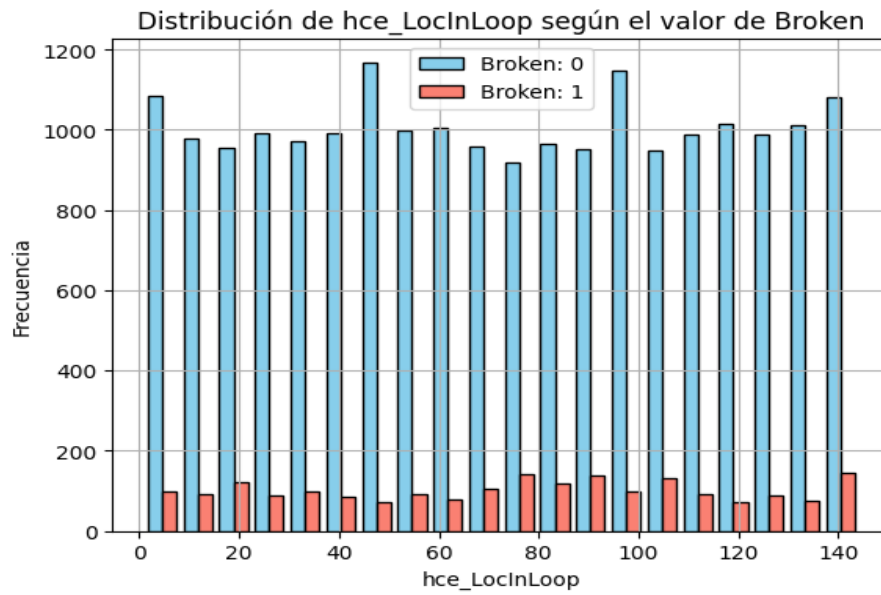


**Figura 6.2** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.

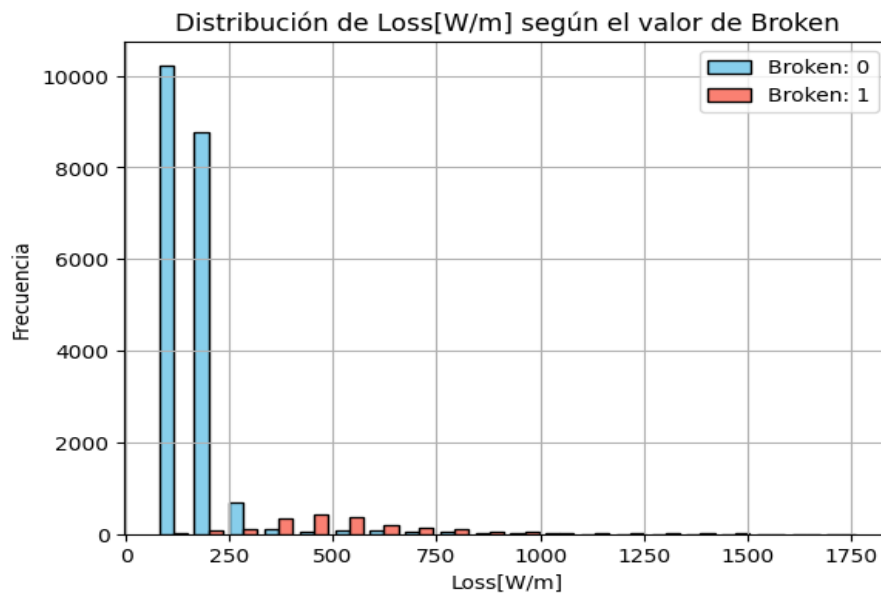


**Figura 6.3** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.

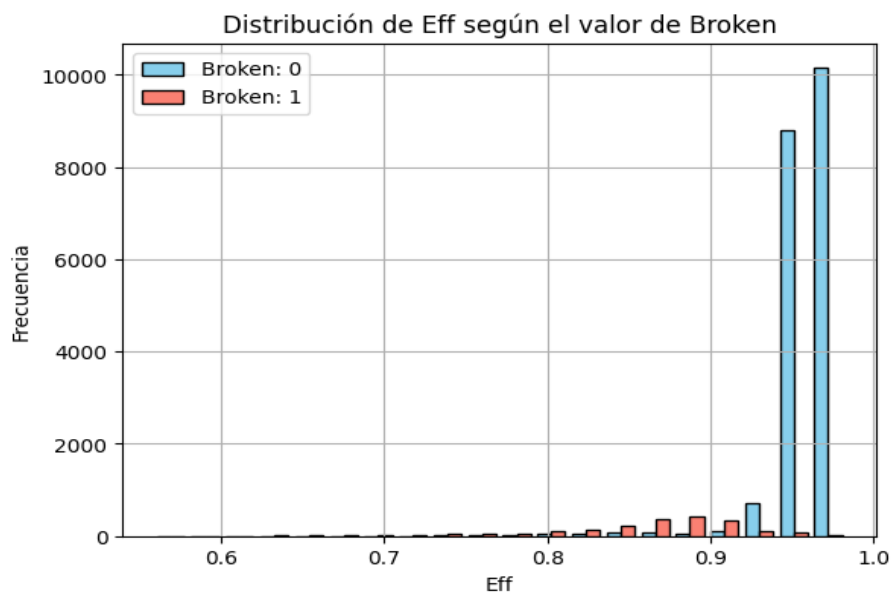




**Figura 6.4** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.

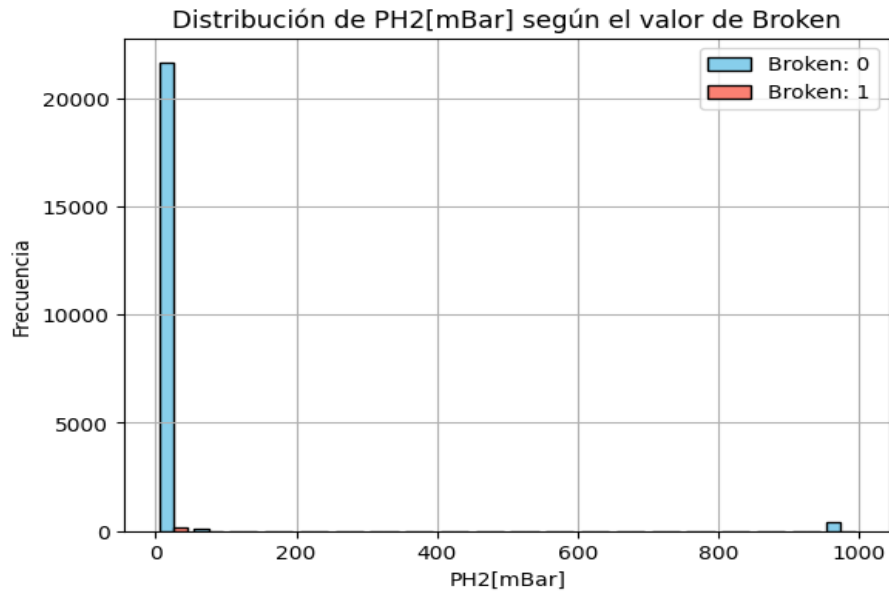


**Figura 6.5** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.

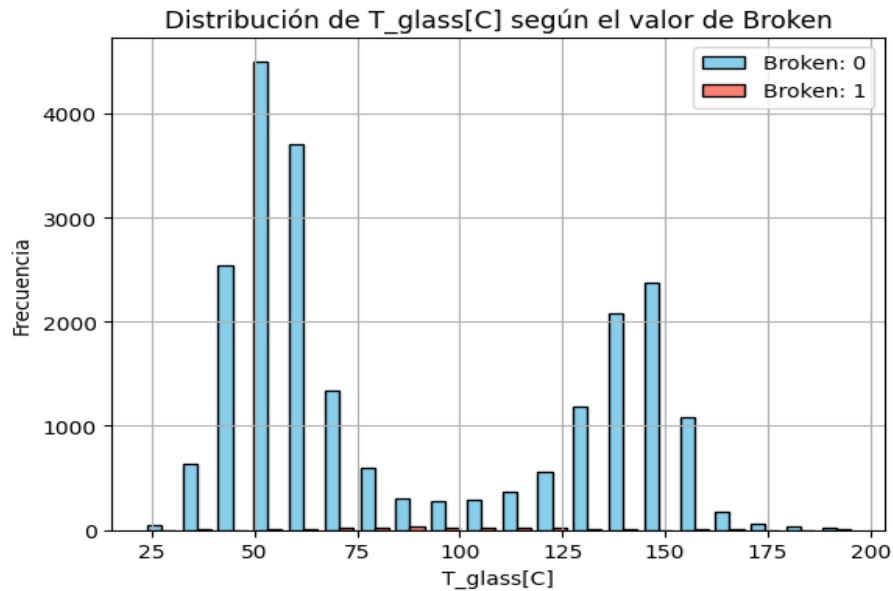


**Figura 6.6** Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

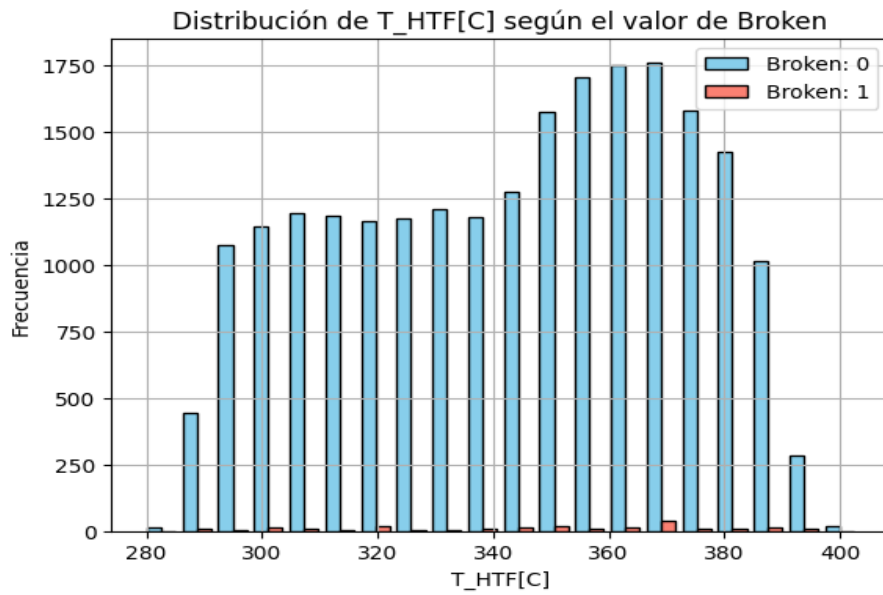
## 6.1.2 Datos central 2



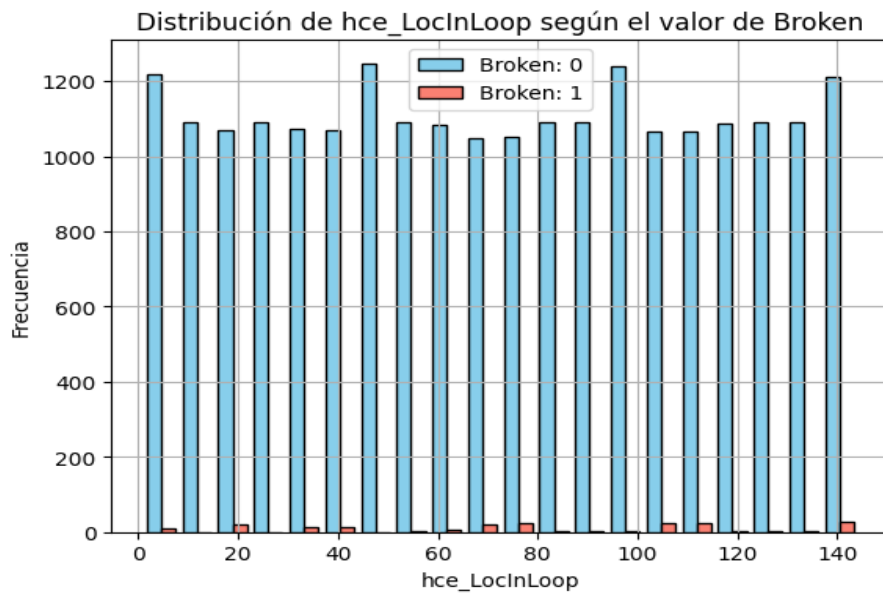
**Figura 6.7** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.



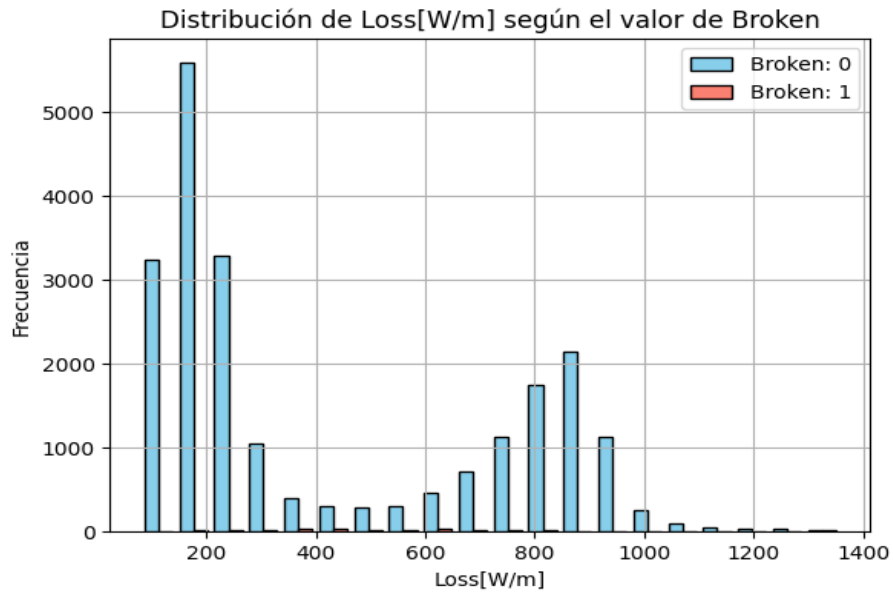
**Figura 6.8** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.



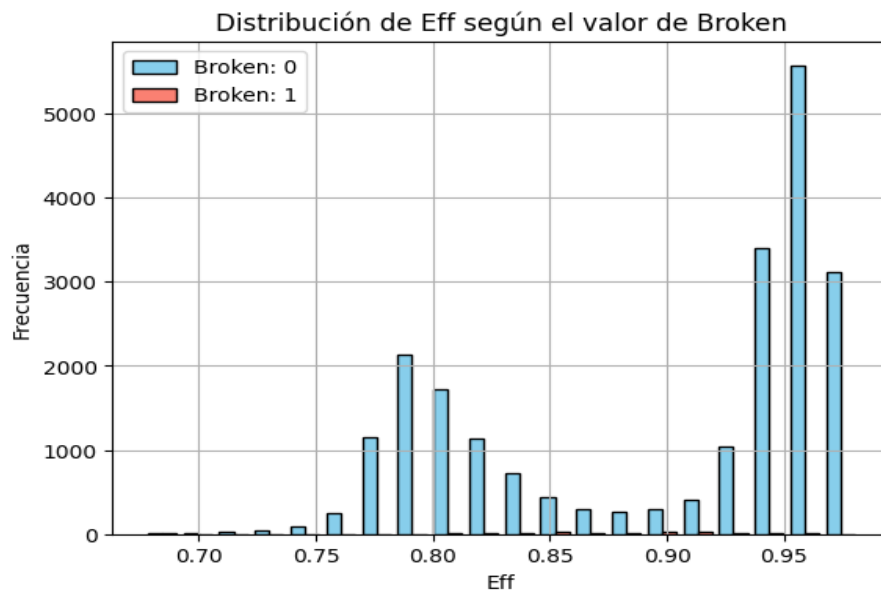
**Figura 6.9** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



**Figura 6.10** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.



**Figura 6.11** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.



**Figura 6.12** Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

6.1.3 Datos central 3

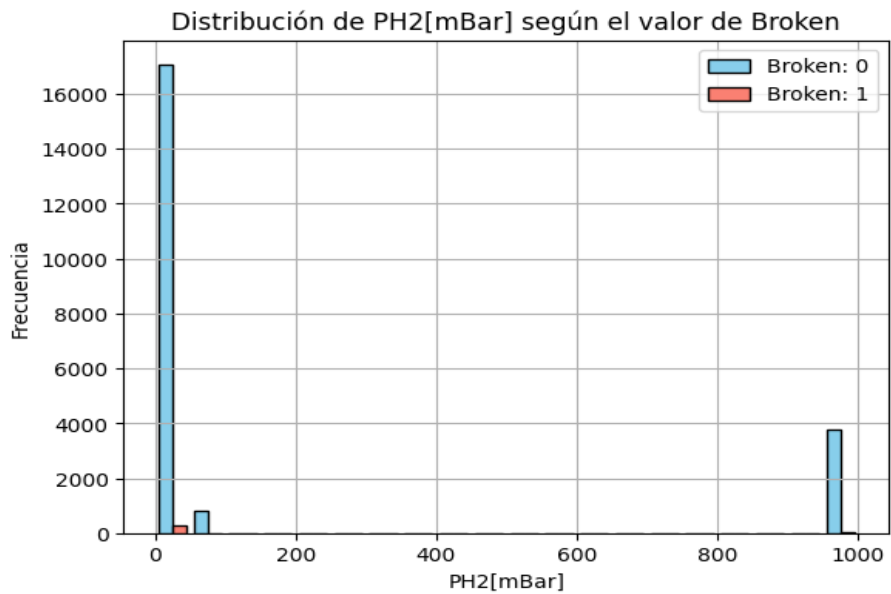


Figura 6.13 Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.

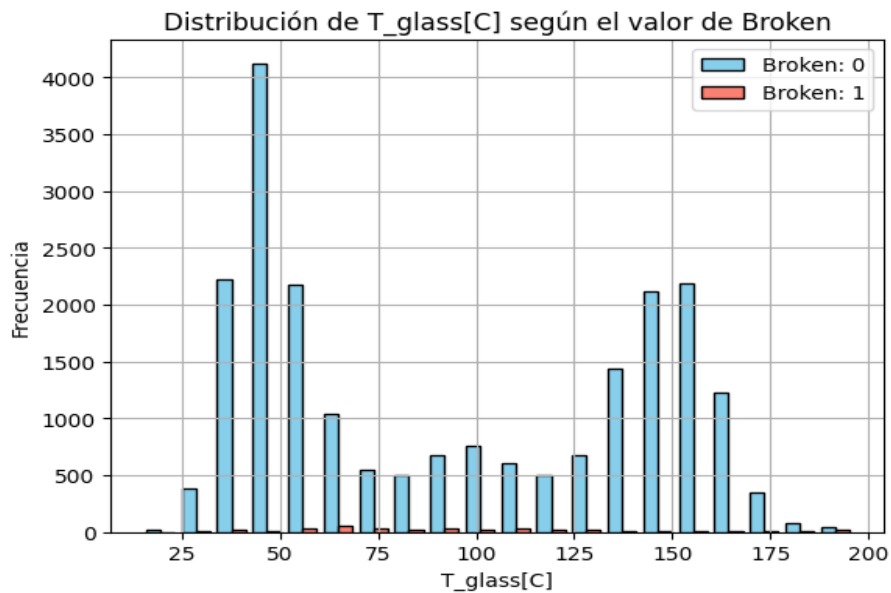
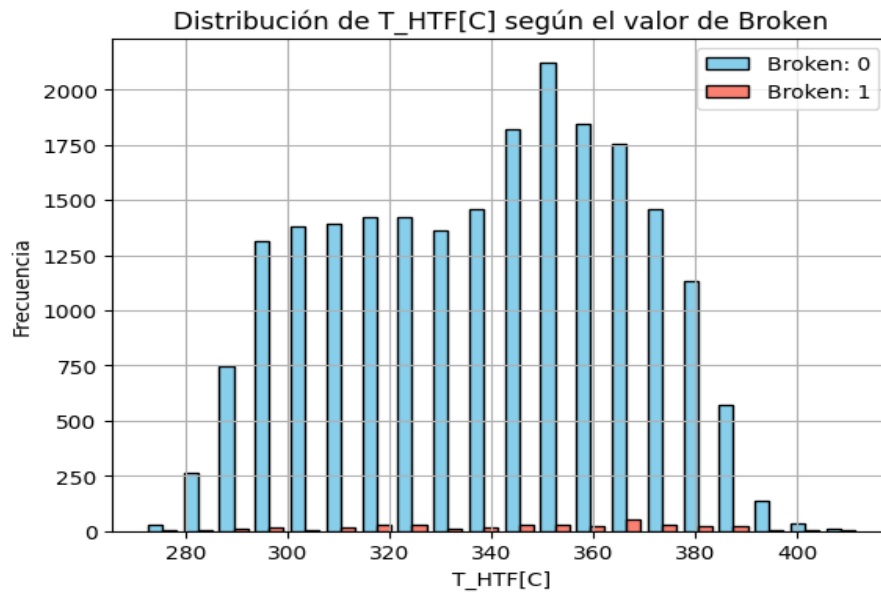
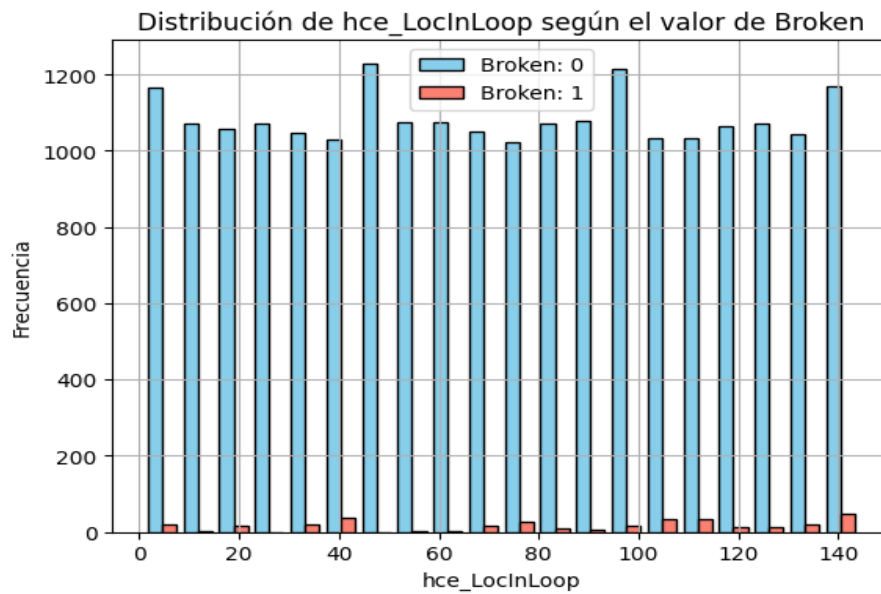


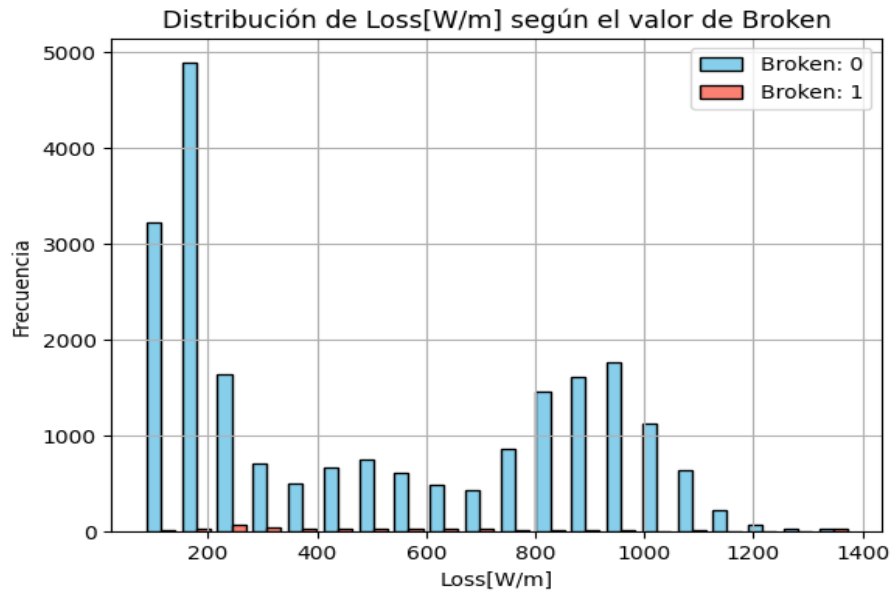
Figura 6.14 Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.



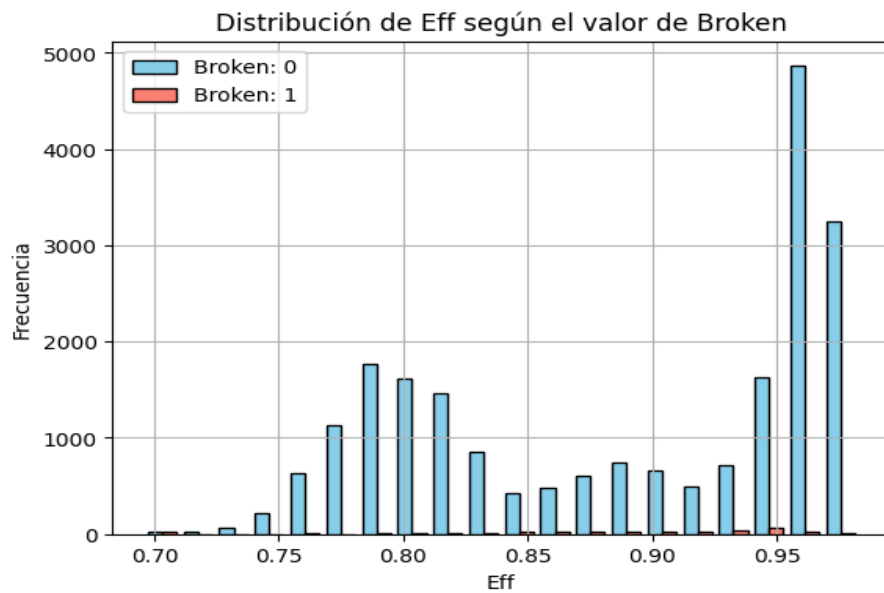
**Figura 6.15** Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



**Figura 6.16** Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.



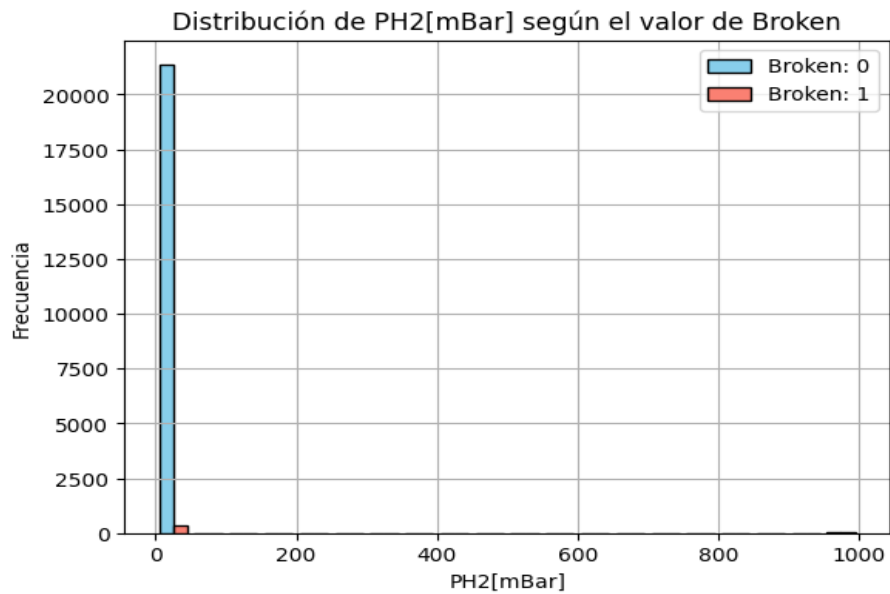
**Figura 6.17** Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.



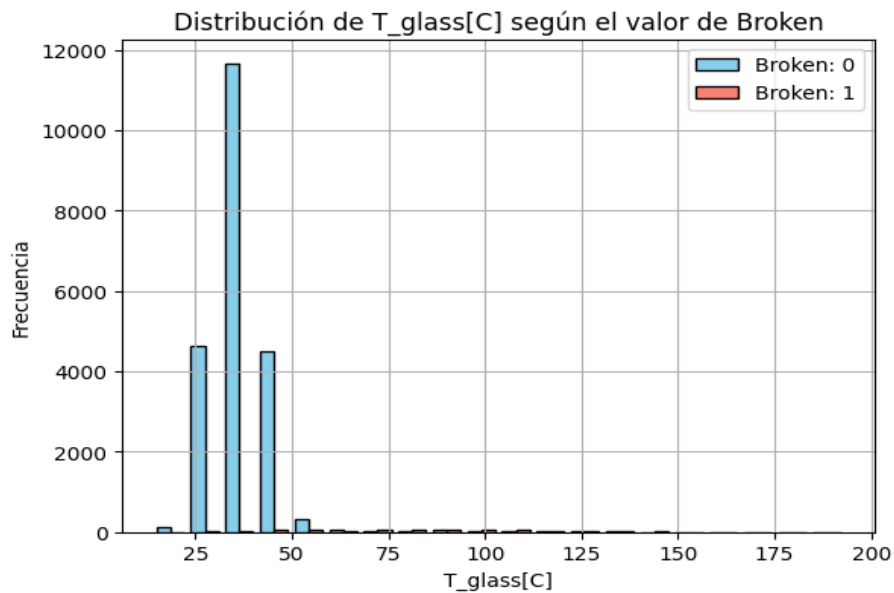
**Figura 6.18** Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.



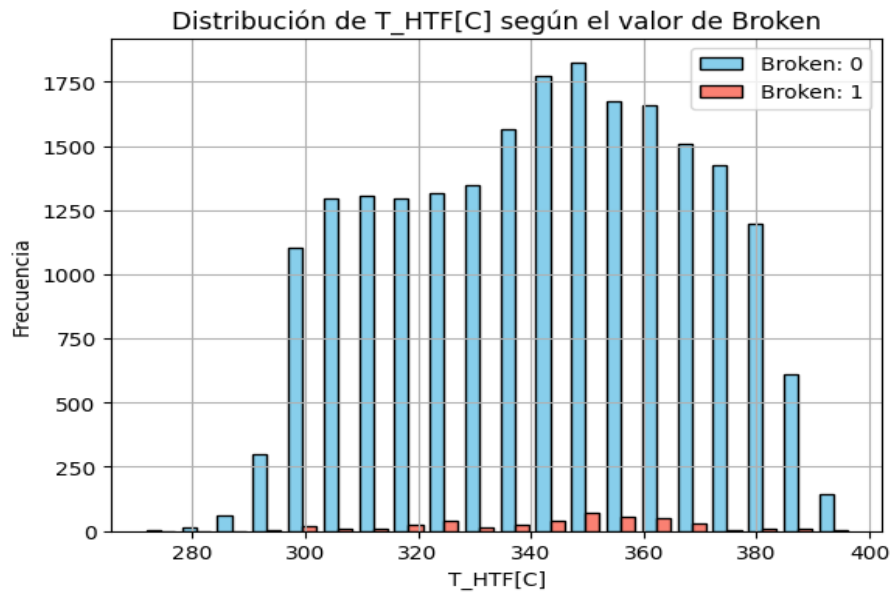
## 6.1.4 Datos central 4



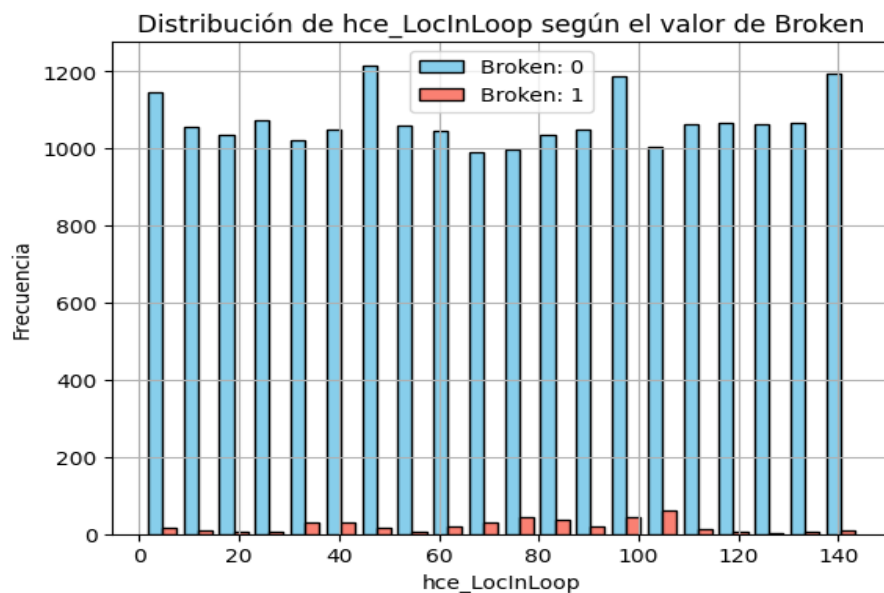
**Figura 6.19** Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.



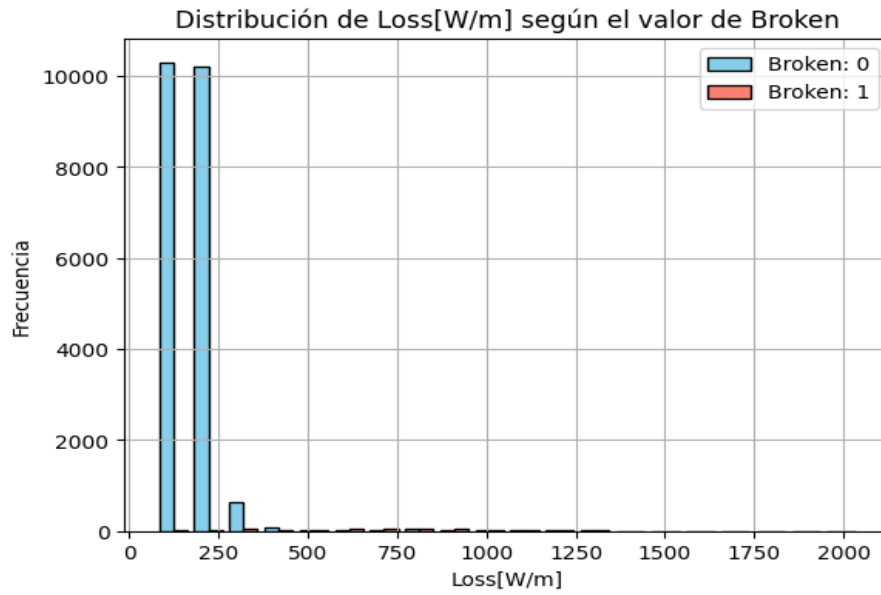
**Figura 6.20** Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.



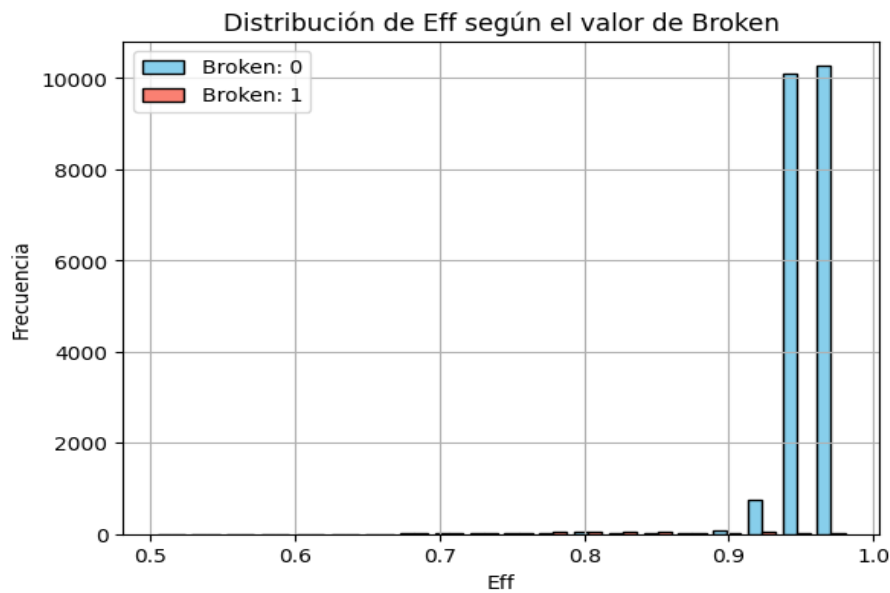
**Figura 6.21** Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



**Figura 6.22** Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.

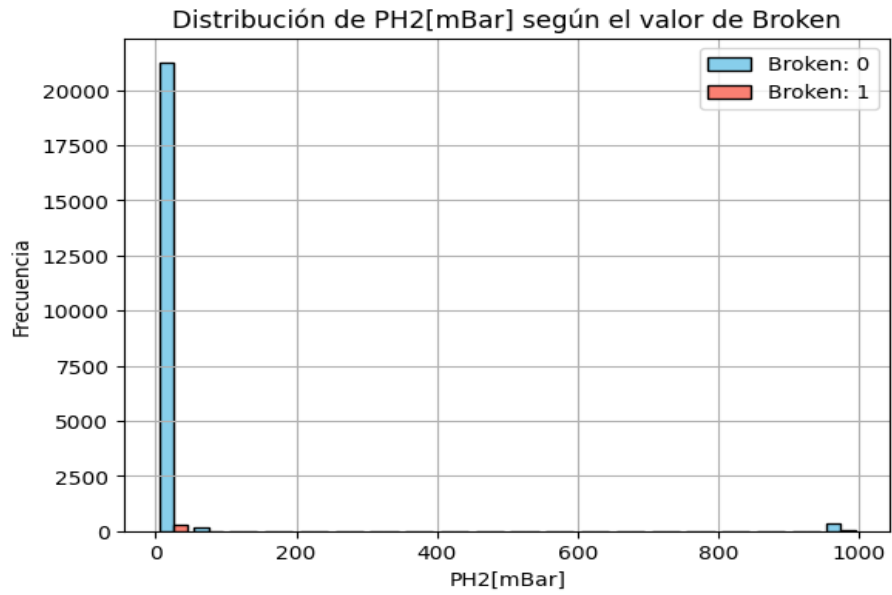


**Figura 6.23** Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.

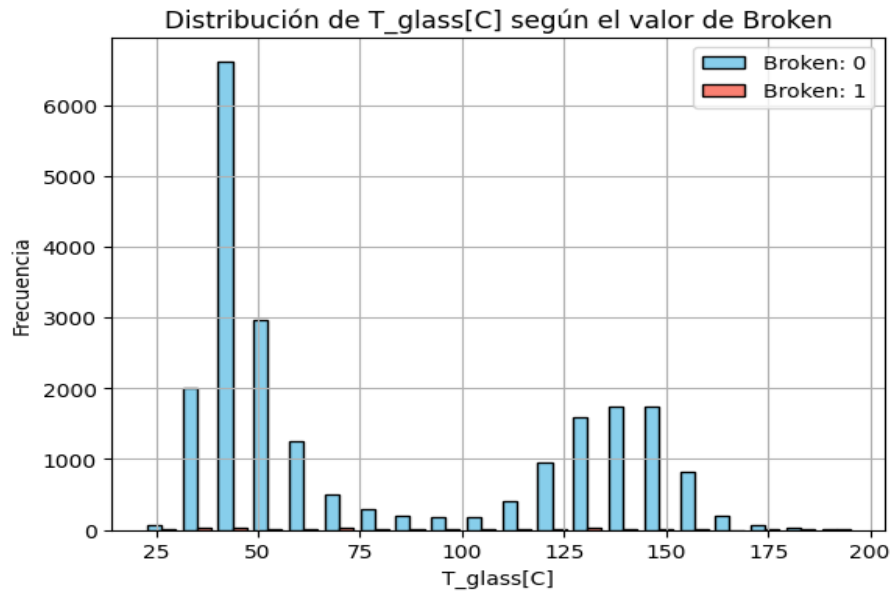


**Figura 6.24** Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

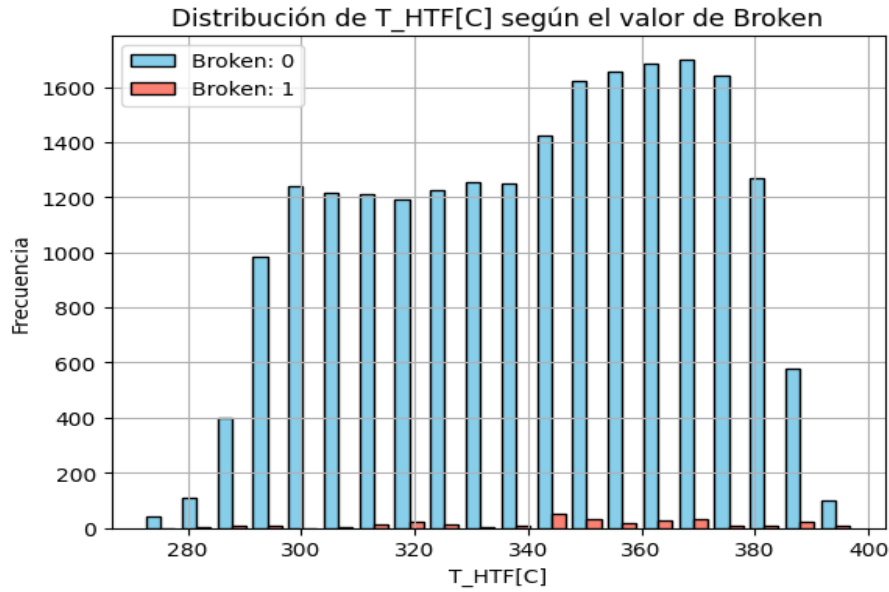
6.1.5 Datos central 5



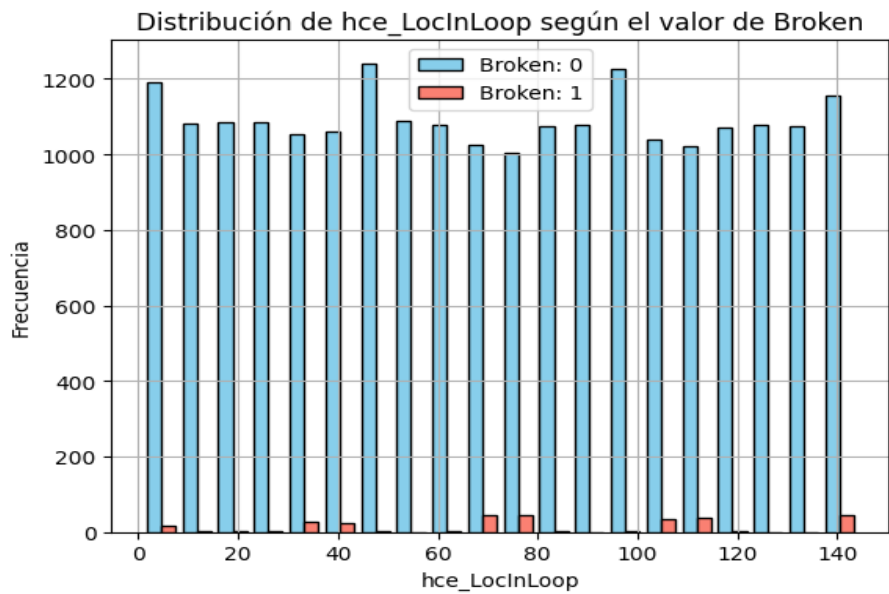
**Figura 6.25** Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.



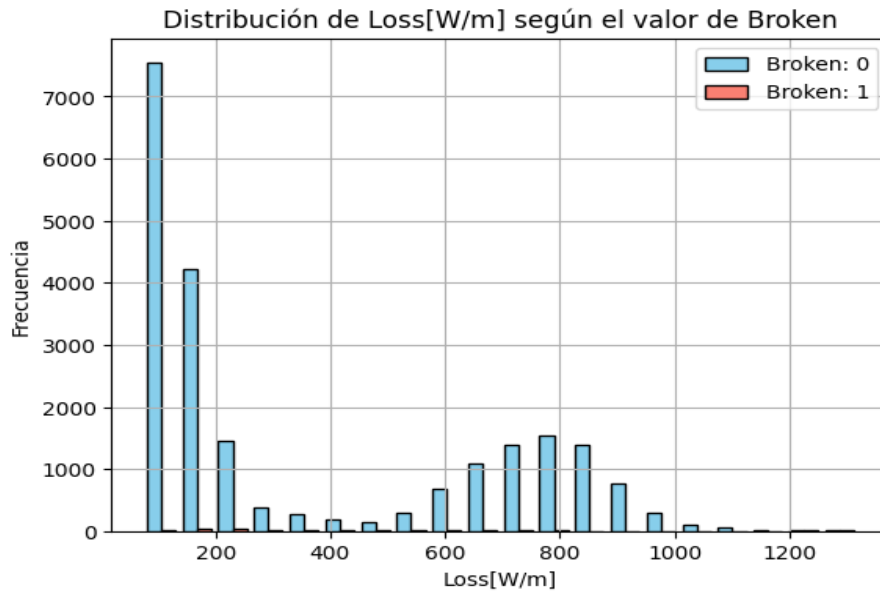
**Figura 6.26** Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.



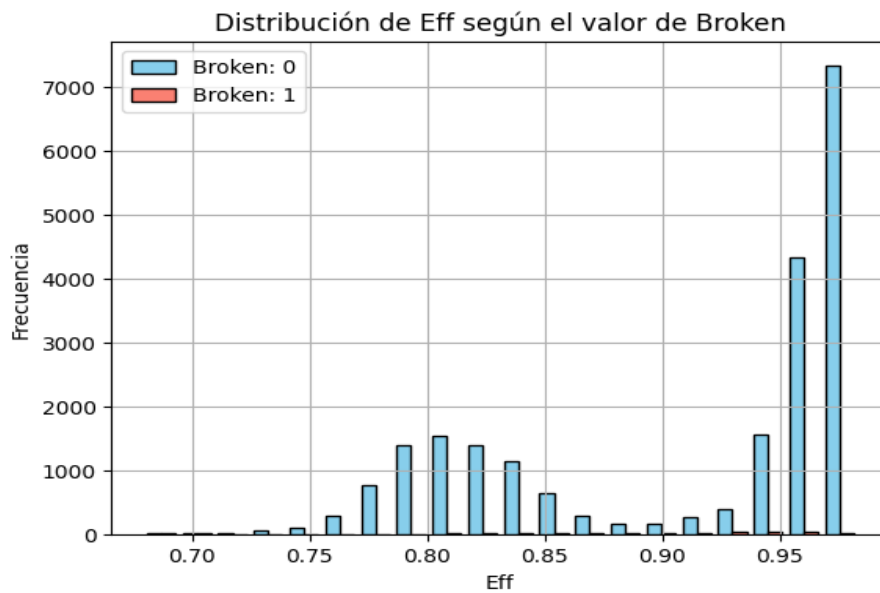
**Figura 6.27** Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



**Figura 6.28** Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.

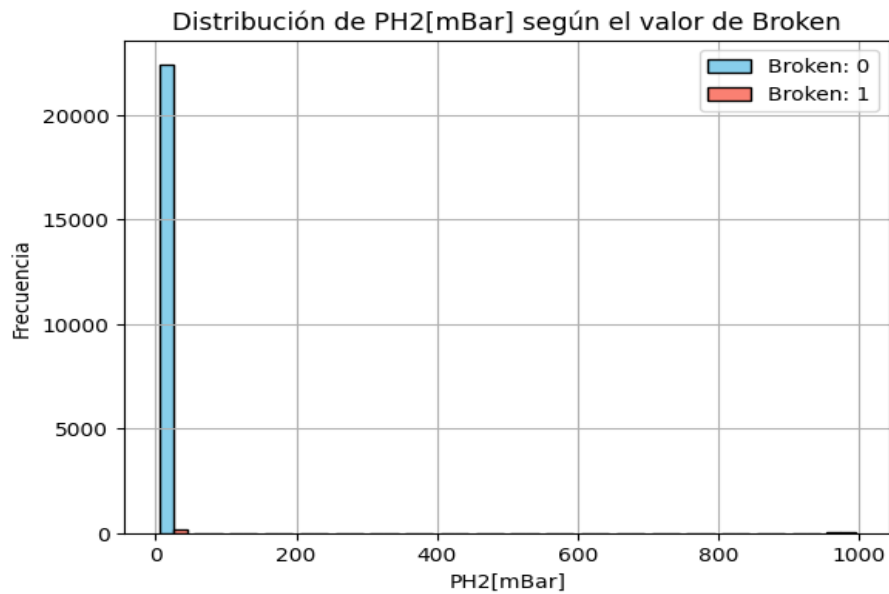


**Figura 6.29** Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.

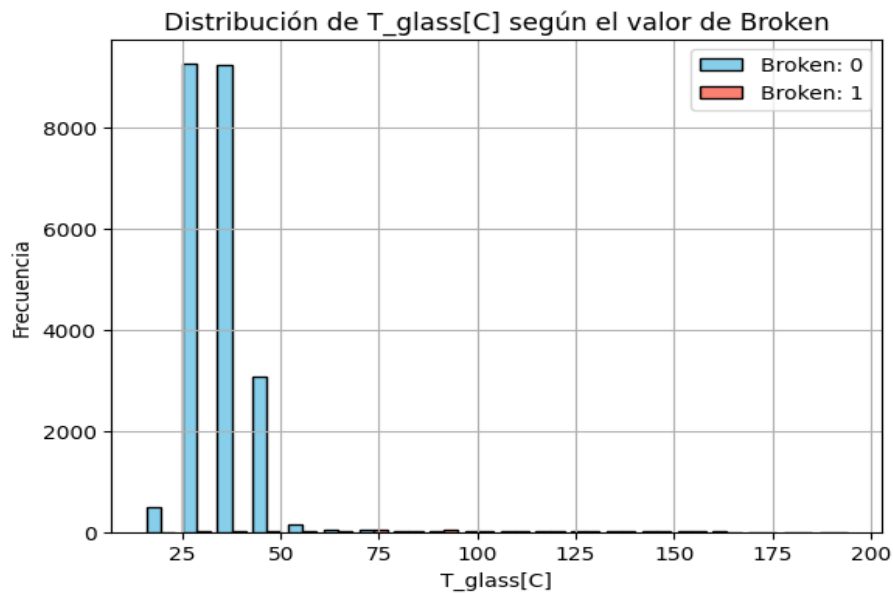


**Figura 6.30** Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

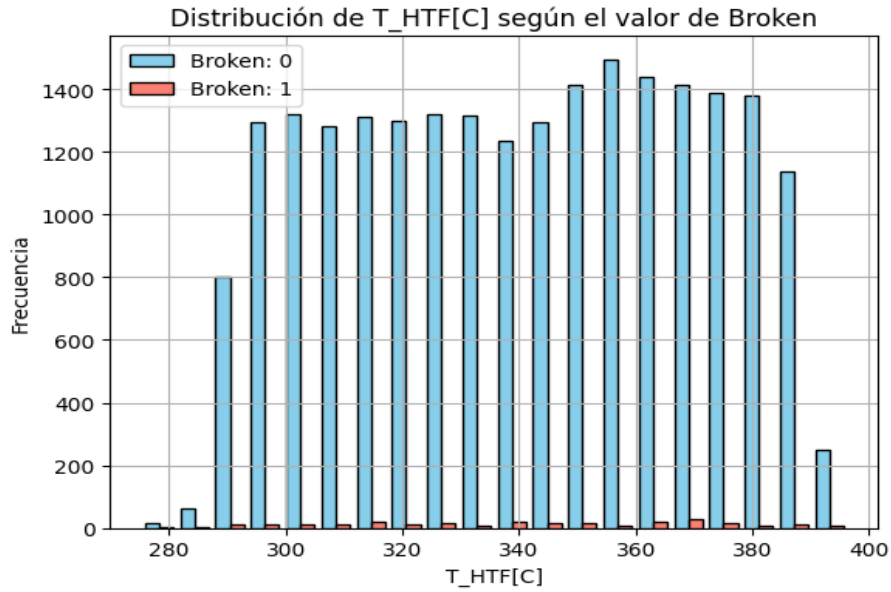
## 6.1.6 Datos central 6



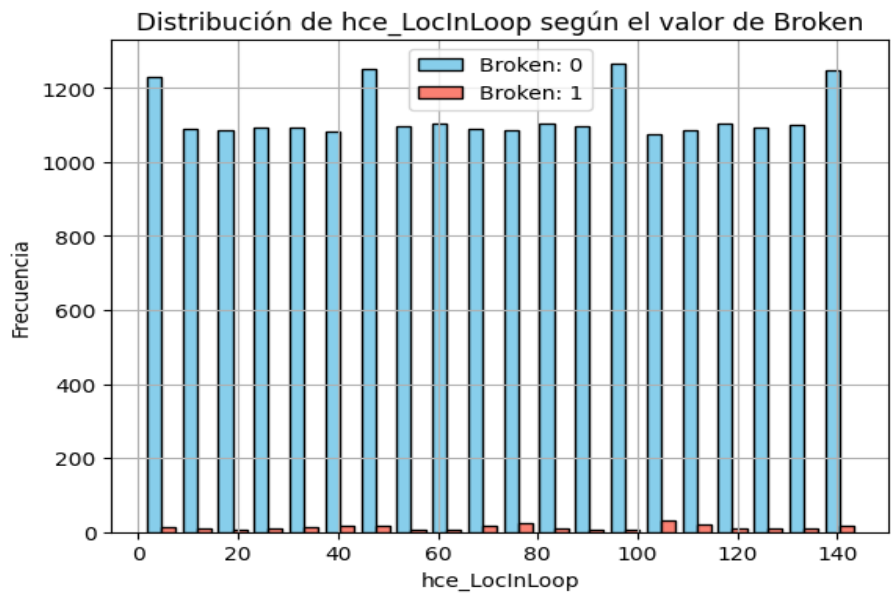
**Figura 6.31** Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.



**Figura 6.32** Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.

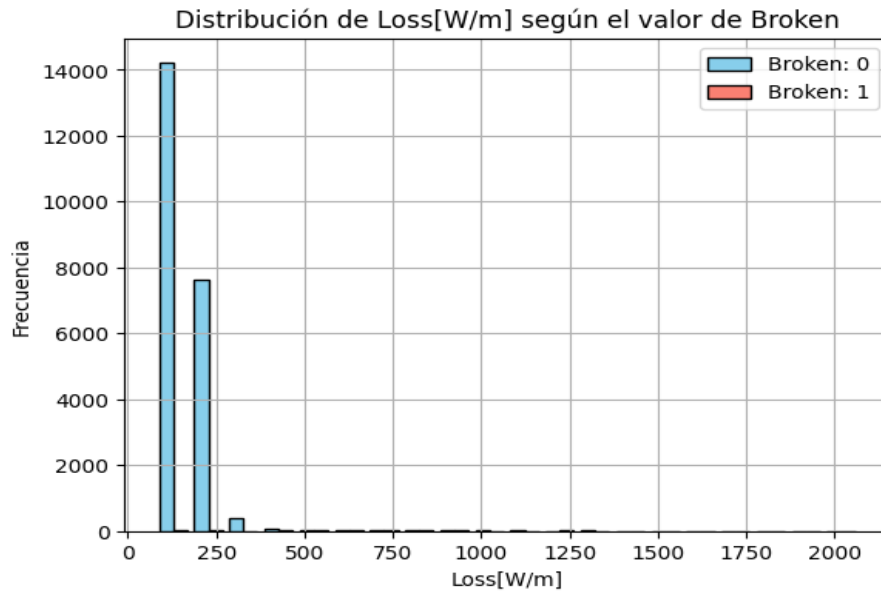


**Figura 6.33** Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.

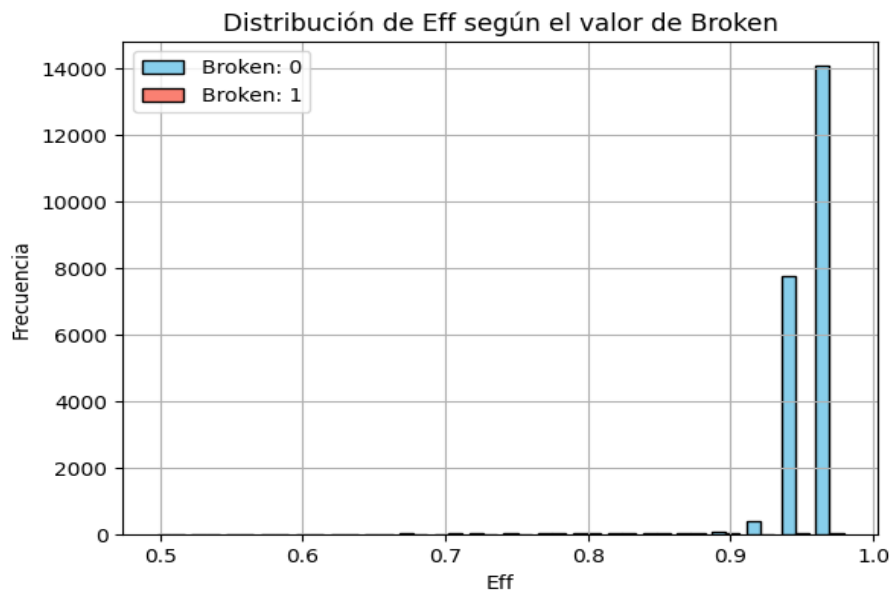


**Figura 6.34** Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.



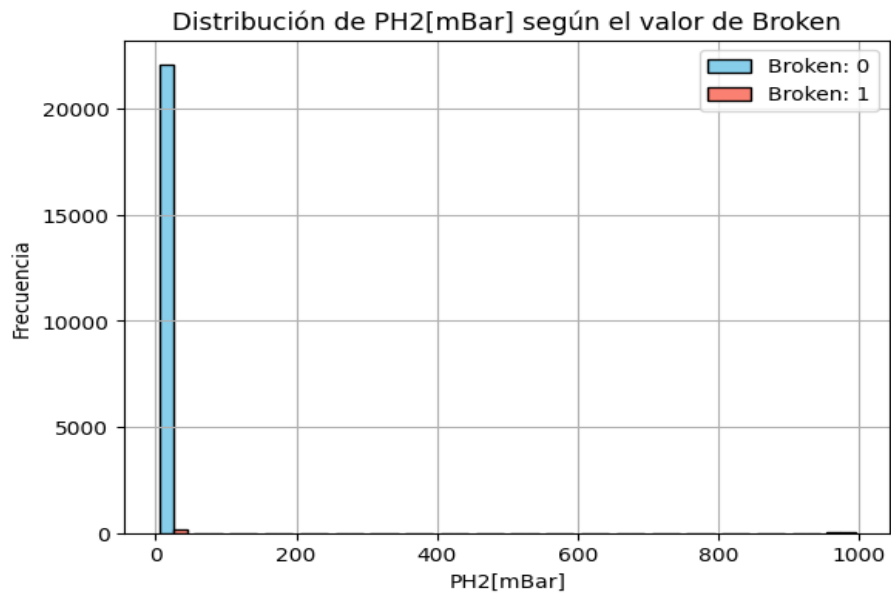


**Figura 6.35** Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.

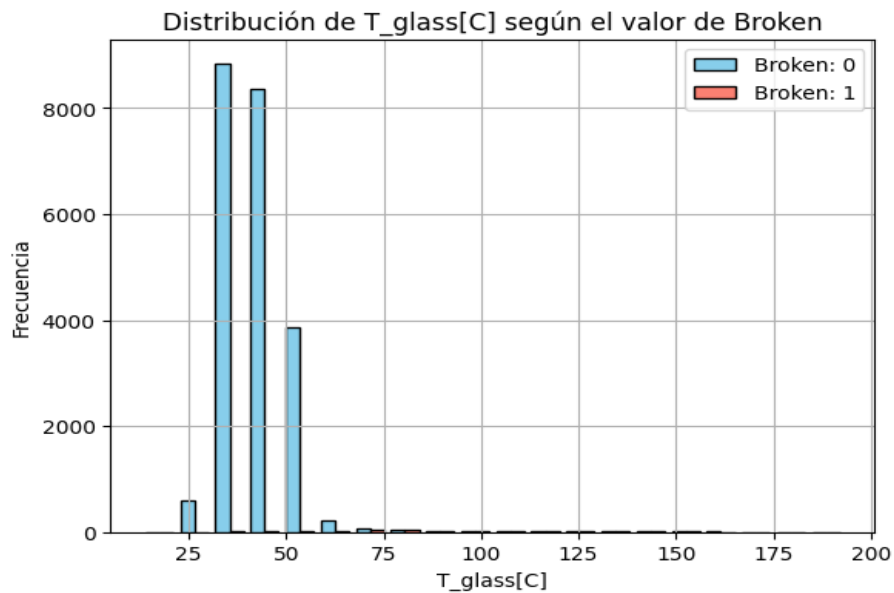


**Figura 6.36** Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

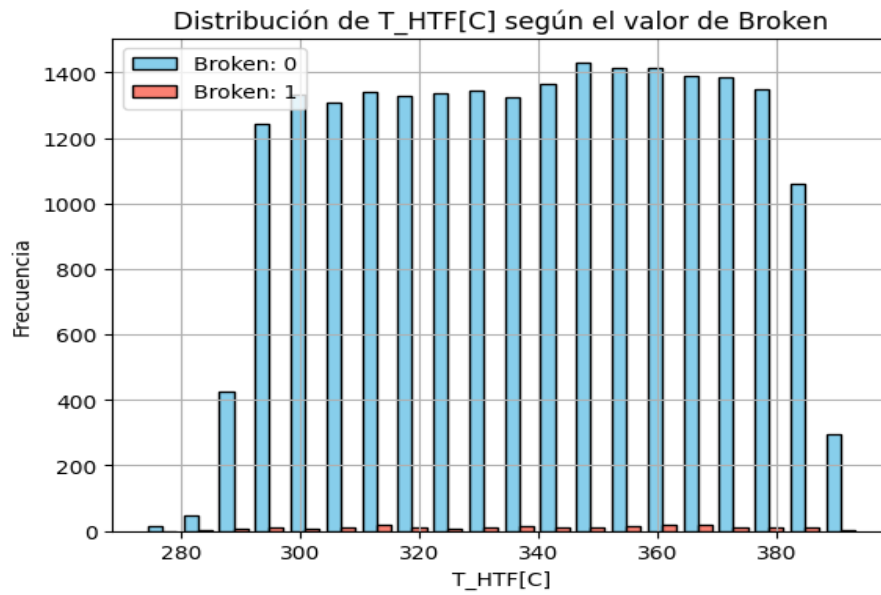
## 6.1.7 Datos central 7



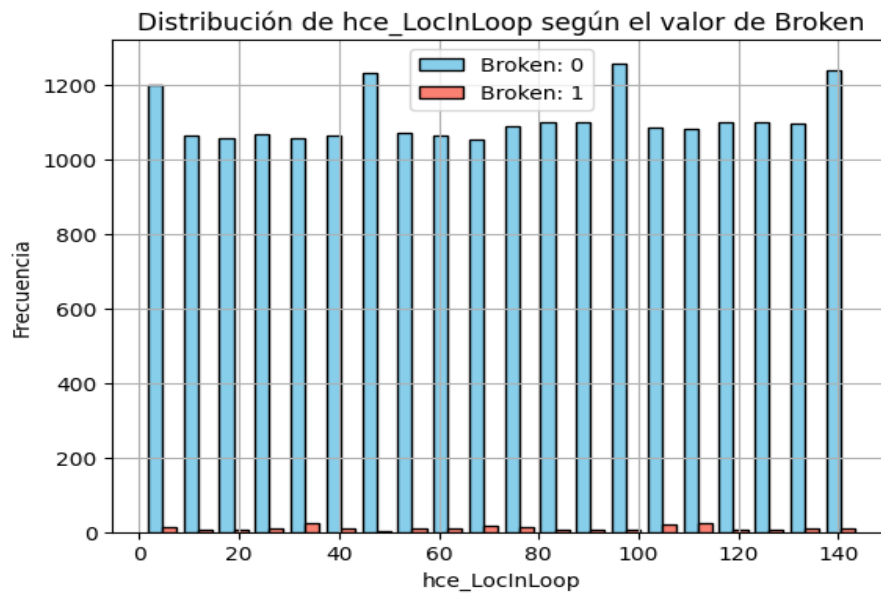
**Figura 6.37** Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor.



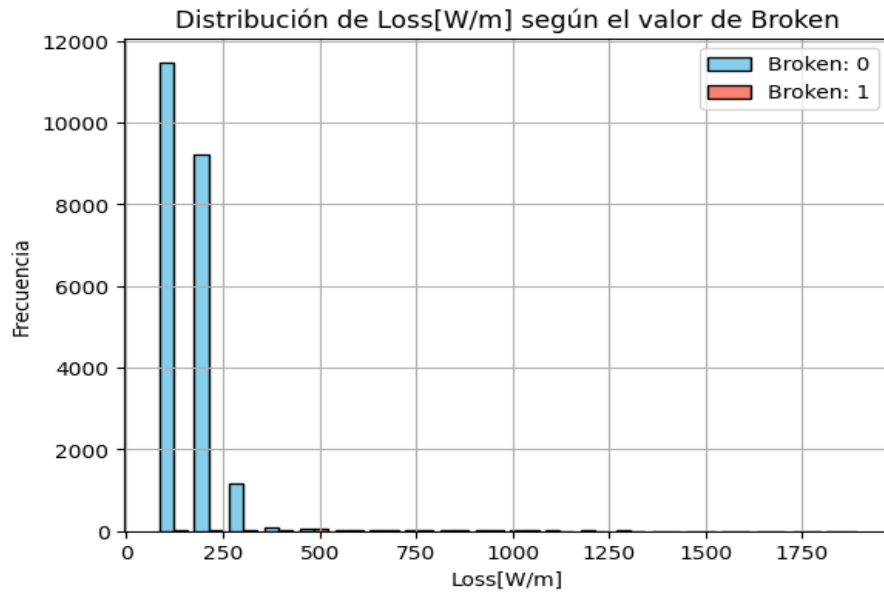
**Figura 6.38** Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor.



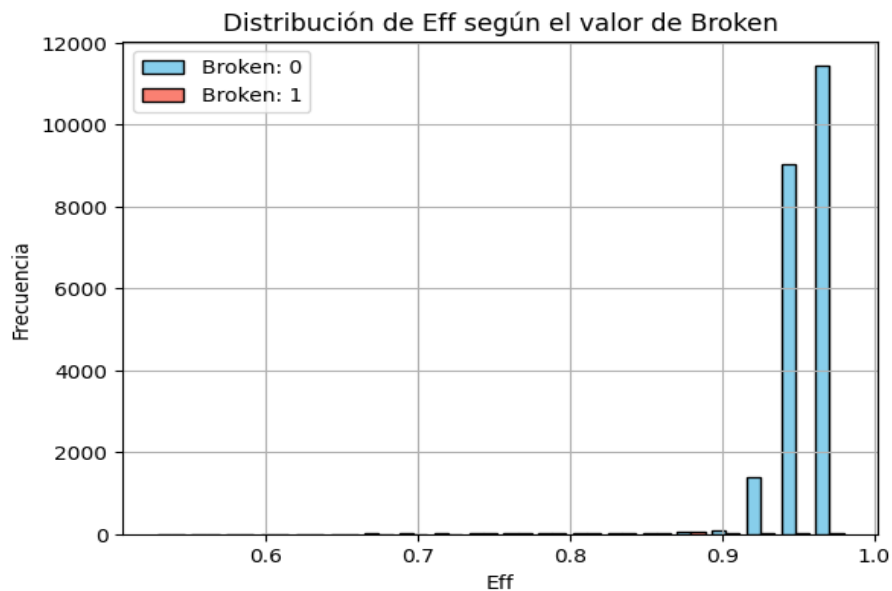
**Figura 6.39** Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente.



**Figura 6.40** Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar.

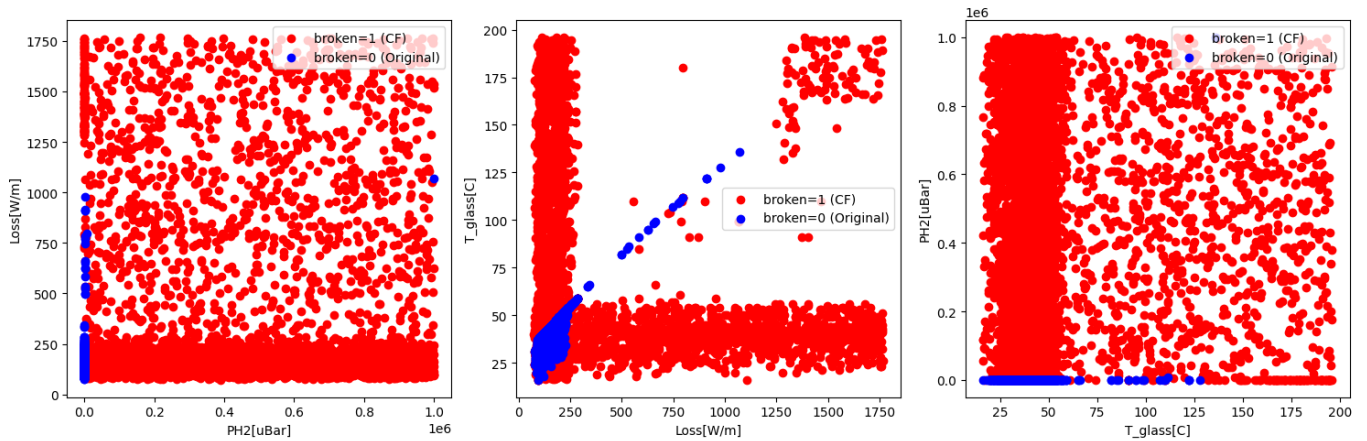


**Figura 6.41** Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades.

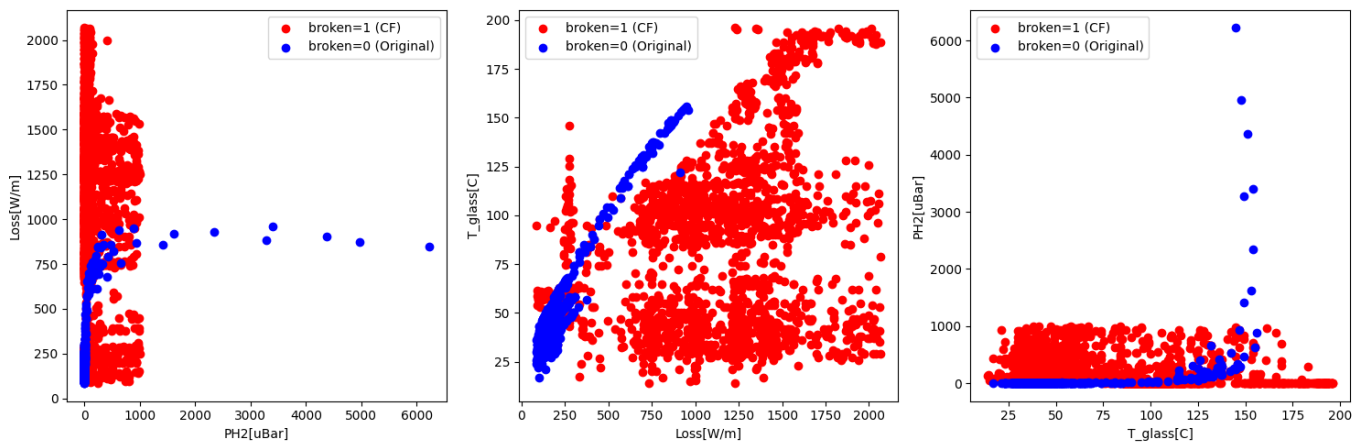


**Figura 6.42** Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor.

## 6.2 Anexo 2: gráficas de tendencias



**Figura 6.43** Gráficas de las tendencias de la central 1, que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios.



**Figura 6.44** Gráficas de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios.



# Índice de Figuras

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Vista aérea de una planta termosolar de tecnología cilindro-parabólica. Está compuesta por sectores de placas y en el centro se encuentra la central que contiene la turbina y el alternador  | 5  |
| 2.2  | Esquema del funcionamiento básico de una central termosolar. Los rayos solares se concentran en los tubos receptores que la transforman en energía térmica. El fluido caloportador que fluye en su interior absorbe esta energía térmica y la transfiere para generar vapor que accionará una turbina conectada a un alternador que libera energía eléctrica a la red | 6  |
| 2.3  | Los cuatro tipos básicos de centrales termosolares: con placas cilindro-parabólicas, lineal de Fresnel, con receptor central y de disco parabólico  | 6  |
| 2.4  | Placas de tecnología cilindro-parabólica. En la imagen se aprecian las placas dispuestas en orden y los tubos receptores en su centro   | 7  |
| 2.5  | Imagen de una planta termosolar CSP con tecnología cilindro-parabólica  | 8  |
| 2.6  | Esta imagen esquemática muestra las partes de un tubo receptor. Las partes principales consisten en la cubierta exterior de vidrio, la cámara de vacío, y el tubo absorbente por el que fluye el fluido caloportador  | 8  |
| 2.7  | Ejemplos en forma de gráfica de clasificadores geométricos con salidas de clasificación binaria y multiclase. La gráfica de la izquierda muestra una división de los datos en dos tipos, rojos y grises separados por una frontera. La gráfica de la derecha muestra una clasificación multiclase de tres tipos, rojo, gris y negro, separados por una frontera       | 10 |
| 2.8  | Diagrama básico de una red neuronal simple. Las redes neuronales están compuestas por una capa de entrada, un conjunto de capas ocultas y una capa de salida. Las funciones matemáticas que presenta cada neurona y las uniones entre las capas determinan el tipo de red neuronal  | 10 |
| 2.9  | Esquema de las fases de desarrollo del aprendizaje supervisado. Se introduce un conjunto de datos con sus etiquetas correspondientes en el algoritmo de aprendizaje. Tras el aprendizaje, se valida el modelo introduciendo datos de prueba en las funciones resultantes y se validan los resultados  | 11 |
| 2.10 | "Counterfactuals" explicando fronteras entre las clases. Se determina que para cambiar la salida resultante se debe aumentar el ingreso en \$ 5000 y aumentar en un año el historial de créditos  | 12 |
| 2.11 | "Counterfactuals" explicando fronteras entre las clases. En este segundo ejemplo, se determina que para cambiar la salida resultante se deb aumentar el ingreso a \$ 10000  | 12 |
| 3.1  | Gráfico circular que representa la cantidad de tuberías que no están rotas ("broken" = 0) y las que sí lo están ("broken" = 1). Existe una diferencia en la proporción de las clases importante, lo que puede descompensar la precisión del modelo según la clase de la salida  | 15 |
| 3.2  | Esquema del funcionamiento del clasificador Random Forest. Se basa en la creación de multitud de árboles de decisión, seleccionando subconjuntos de entradas en cada uno. La salida resultante será la salida mayoritaria entre todos los árboles   | 17 |
| 4.1  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor   | 22 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.2  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor  | 22 |
| 4.3  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor  | 23 |
| 4.4  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor  | 23 |
| 4.5  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente  | 24 |
| 4.6  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente  | 24 |
| 4.7  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar  | 25 |
| 4.8  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar  | 25 |
| 4.9  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades   | 26 |
| 4.10 | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades   | 26 |
| 4.11 | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor   | 27 |
| 4.12 | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor   | 27 |
| 4.13 | Una instancia perteneciente al conjunto de datos seguida de 10 "counterfactuals" generados aleatoriamente. En cada uno cambia una o más variables con el objetivo de cambiar la salida. El cambio más frecuente es el de la presión de hidrógeno, aunque también cambia la temperatura del vidrio y la eficiencia en algunos ejemplos. Los ejemplos son generados de manera aleatoria por lo que en cada simulación los cambios serán diferentes | 29 |
| 4.14 | 10 "counterfactuals" generados aleatoriamente. La diferencia con la figura anterior reside en que se limita el rango de variación de la presión, para visualizar otras explicaciones más variadas. Se pueden apreciar variaciones en todas las variables menos en la posición del tubo y en la eficiencia de referencia que se han bloqueado su cambio por su sentido físico en la realidad  | 30 |
| 4.15 | Puntuación de la importancia global de las características con los datos de la central 1. Las características con mayor puntuación varían en mayor número de casos en los counterfactuals generados. Esto implica que la salida del modelo depende en mayor medida del valor de esa variable   | 31 |
| 4.16 | Gráficas de las tendencias de la central 1 que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios   | 32 |
| 4.17 | Gráfica de las tendencias de la central 1 que representan las características en 3D. Representa los mismos datos que la figura previa pero representando las tres variables conjuntamente  | 33 |
| 4.18 | Gráfica de las tendencias de la central 1 que representan las características en 3D, mostrando diferentes perspectivas. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares  | 33 |
| 4.19 | Gráfica de las tendencias de la central 1 que representan las características en 3D, mostrando diferentes perspectivas. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares  | 34 |
| 4.20 | Gráficas de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios   | 34 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.21 | Gráfica de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representa las tres características, PH <sub>2</sub> , Loss y T glas, en los ejes. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios | 35 |
| 4.22 | Gráfica de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representa Loss y T glas, en los ejes. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios   | 35 |
| 6.1  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor   | 41 |
| 6.2  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor   | 42 |
| 6.3  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente   | 42 |
| 6.4  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar   | 43 |
| 6.5  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades  | 43 |
| 6.6  | Histograma de la central 1 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor  | 44 |
| 6.7  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor   | 45 |
| 6.8  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor   | 45 |
| 6.9  | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente   | 46 |
| 6.10 | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar   | 46 |
| 6.11 | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades  | 47 |
| 6.12 | Histograma de la central 2 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor  | 47 |
| 6.13 | Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor   | 48 |
| 6.14 | Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor   | 48 |
| 6.15 | Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente   | 49 |
| 6.16 | Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar   | 49 |
| 6.17 | Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades  | 50 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 6.18 | Histograma de la central 3 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor      | 50 |
| 6.19 | Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor                   | 51 |
| 6.20 | Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor                                 | 51 |
| 6.21 | Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente                         | 52 |
| 6.22 | Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar | 52 |
| 6.23 | Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades                    | 53 |
| 6.24 | Histograma de la central 4 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor      | 53 |
| 6.25 | Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor                   | 54 |
| 6.26 | Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor                                 | 54 |
| 6.27 | Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente                         | 55 |
| 6.28 | Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar | 55 |
| 6.29 | Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades                    | 56 |
| 6.30 | Histograma de la central 5 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor      | 56 |
| 6.31 | Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor                   | 57 |
| 6.32 | Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor                                 | 57 |
| 6.33 | Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente                         | 58 |
| 6.34 | Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar | 58 |
| 6.35 | Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades                    | 59 |
| 6.36 | Histograma de la central 6 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor      | 59 |
| 6.37 | Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de la presión del hidrógeno presente en la cámara de vacío del interior del tubo receptor                   | 60 |
| 6.38 | Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del vidrio que constituye la capa exterior del tubo receptor                                 | 60 |

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 6.39 | Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de temperatura del fluido caloportador que fluye en el interior del tubo absorbente  | 61 |
| 6.40 | Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según la posición del tubo en el orden que constituyen los lazos o bucles de canalización del fluido en la planta termosolar  | 61 |
| 6.41 | Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de pérdida de energía por metro de tubo que pierde el fluido debido a irreversibilidades   | 62 |
| 6.42 | Histograma de la central 7 que representa el número de tubos receptores, rotos en rojo y no rotos en azul, según los rangos de eficiencia en la obtención de energía gracias a la concentración de luz solar en cada tubo receptor   | 62 |
| 6.43 | Gráficas de las tendencias de la central 1, que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios  | 63 |
| 6.44 | Gráficas de las tendencias de la central 1, limitando la presión del hidrógeno a 1 mbar, que representan las características dos a dos. Los puntos azules representan tubos receptores no rotos, pertenecientes al conjunto de datos reales de las plantas termosolares. Los puntos rojos representan tubos receptores rotos, generados mediante explicaciones contrafactuales, por lo que son ficticios | 63 |



# Bibliografía

---

- [1] <https://github.com/interpretml/DiCE>, Diverse Counterfactual Explanations (DiCE) for ML.
- [2] Emilio Carrizosa, Jasone Ram3res-Ayerbe Morales, and Dolores Romero Morales, *Generating collective counterfactual explanations in score-based classification via mathematical optimization*, 2021.
- [3] Susane Dandl, Cristoph Molnar, Martin Binder, and Bernd Bischl, *Multi-objective counterfactual explanations*, Ph.D. thesis, Department of Statistics, LMU Munich, Munich, Germany.
- [4] Guillermo Espinosa rueda, *Evaluaci3n experimental de los tubos receptores de una planta termosolar de tecnolog3a cilindroparab3lica. impacto en la producci3n el3ctrica de una planta comercial.*, Ph.D. thesis, Departamento de ingenier3a energ3tica, Universidad de Sevilla, 2020.
- [5] Lilian Judith Sandoval, *Algoritmos de aprendizaje autom3tico para an3lisis y predicci3n de datos*, Revista tecnol3gica, Itca Fepade (2018).
- [6] Ramaravind Kommiya Mothilal, Amit Sharma, and Chenhao Tan, *Explaining machine learning classifiers through diverse counterfactual explanations*, Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (2020).
- [7] Rogelio Pe3n, *An3lisis estructural de los tubos receptores de nueva generaci3n en plantas termosolares*, Ph.D. thesis, Departamento de Construcci3n e ingenier3a de fabricaci3n, Universidad de Oviedo, 2017.