



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Antonio Dies Beneytez

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

ANALYSIS OF SBLOCA SEQUENCES WITH TRACE IN APR1400 REACTORS

SEPTIEMBRE 2025

Antonio Dies Beneytez

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:
Kevin Fernández Cosials

TRABAJO FIN DE MASTER
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MASTER EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL



“As for the future, your task is not to foresee it, but to enable it.”

- Antoine de Saint-Exupéry

ACKNOWLEDGMENTS

Quiero agradecer, en primer lugar, el apoyo continuo e incondicional de mi familia durante la elaboración de este proyecto, durante estos 4 años de carrera y, al fin y al cabo, durante toda mi vida. Lo que he recibido —y sigo recibiendo— de ellos no tiene precio.

En segundo lugar, doy gracias a mi tutor, Gonzalo Jiménez, por la confianza depositada en mí para la realización de este TFG. Gracias por todos los consejos, explicaciones, ánimos y correcciones que me ha ido dando y que han ido consolidando la base del proyecto. Gracias también a David Piedra, el técnico del SGIZ y cotutor de este trabajo. Agradezco su paciencia y dedicación para introducirme en la operación del simulador y todo el tiempo que ha dedicado para la resolución de problemas o dudas que han ido surgiendo durante la realización de las simulaciones.

Asimismo, quisiera agradecer a todos los profesores que he tenido durante el grado en la ETSII. De cada uno de ellos he aprendido múltiples y variados conocimientos y habilidades que me han ayudado a crecer como persona y a formarme como ingeniero industrial. De un modo especial, agradezco a los profesores del Departamento de Ingeniería Nuclear, que han acrecentado muy eficazmente mi motivación por el apasionante mundo de la energía nuclear.

Por último, quiero dar las gracias a mis amigos de la uni, por su gran apoyo incluso en los momentos más difíciles. Gracias a Carlos, Pablo, Chema, Víctor, Álvaro, Nico, Ana, Mario, Guille, Juan, Edu. . . Y cómo no, a todos mis amigos del piso de Madrid, de modo especial a los de Turma: Miguel, David, Sergio, Berni, Pepito, Nacho, Marco, Pau, Walter y Pablo. Por su ejemplo, alegría y por los grandes momentos que hemos vivido juntos.

Gracias a todos.

ABSTRACT

Bla, bla, bla

UNESCO codes

- 332004 - Reactores de Fisión Nuclear
- 332006 - Pruebas Nucleares
- 120326 - Simulación

Key words: Energía nuclear, *Small Modular Reactors*, Simulación, Seguimiento de carga, Simuladores nucleares, Simulador Gráfico Interactivo de Zorita (SGIZ), Central Nuclear José Cabrera.

INDEX

ACKNOWLEDGMENTS	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUCTION	1
1.1 Justification	1
1.2 Objectives	1
1.3 Methodology	1
2 CONCLUSIONS AND FUTURE LINES	2
2.1 Conclusions	2
2.2 Future lines	3
3 SOCIAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL IMPACT	4
4 PLANNING AND BUDGET	5
4.1 Work Breakdown Structure (WBS)	5
4.2 Gantt chart	6
4.3 Budget	8
BIBLIOGRAPHY	9
APPENDICES	10
A Code	10
LIST OF TABLES	11
LIST OF FIGURES	12
ABBREVIATIONS, UNITS AND ACRONYMS	13

1 INTRODUCTION

1.1 Justification

Bla, bla, bla.

1.2 Objectives

Bla, bla, bla.

1.3 Methodology

Bla, bla, bla.

2 CONCLUSIONS AND FUTURE LINES

2.1 Conclusions

Bla, bla, bla.

2.2 Future lines

Los trabajos futuros que se proponen al finalizar este proyecto son los siguientes:

- Bla, bla, bla.

3 SOCIAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL IMPACT

A continuación, se detallan las contribuciones al desarrollo social, económico y medioambiental de la temática trabajada en el proyecto: los *Small Modular Reactors* y la simulación para la educación y formación nuclear. Para ello, se toman como referencia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y se explica el modo en el que se potencian algunos de ellos:

- **Objetivo 1 - Fin de la pobreza:** La meta 4 de este ODS consiste en “*garantizar que todos los hombres y mujeres, en particular los pobres y los más vulnerables, tengan los mismos derechos a los recursos económicos, así como acceso a los servicios básicos, la propiedad y el control de las tierras y otros bienes, la herencia, los recursos naturales, las nuevas tecnologías y los servicios económicos*” (ONU, 2023).

Tal y como se explica en el punto ...

- **Objetivo 4 - Educación de calidad:** La meta 4 de este ODS se propone “*aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, al trabajo decente y al emprendimiento*” (ONU, 2023).

Como se ha explicado en el apartado ...



Figure 3.1: Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con este proyecto (ONU, 2023).

4 PLANNING AND BUDGET

4.1 Work Breakdown Structure (WBS)

La descomposición de este Trabajo Fin de Grado puede realizarse dividiendo el mismo en 5 bloques fundamentales (en color naranja). Estos, a su vez, se subdividen en varios paquetes de trabajo (en color verde y azul). Cada paquete de trabajo tiene un alcance y contenido único, y se ejecuta en un período de tiempo y con un presupuesto determinados.

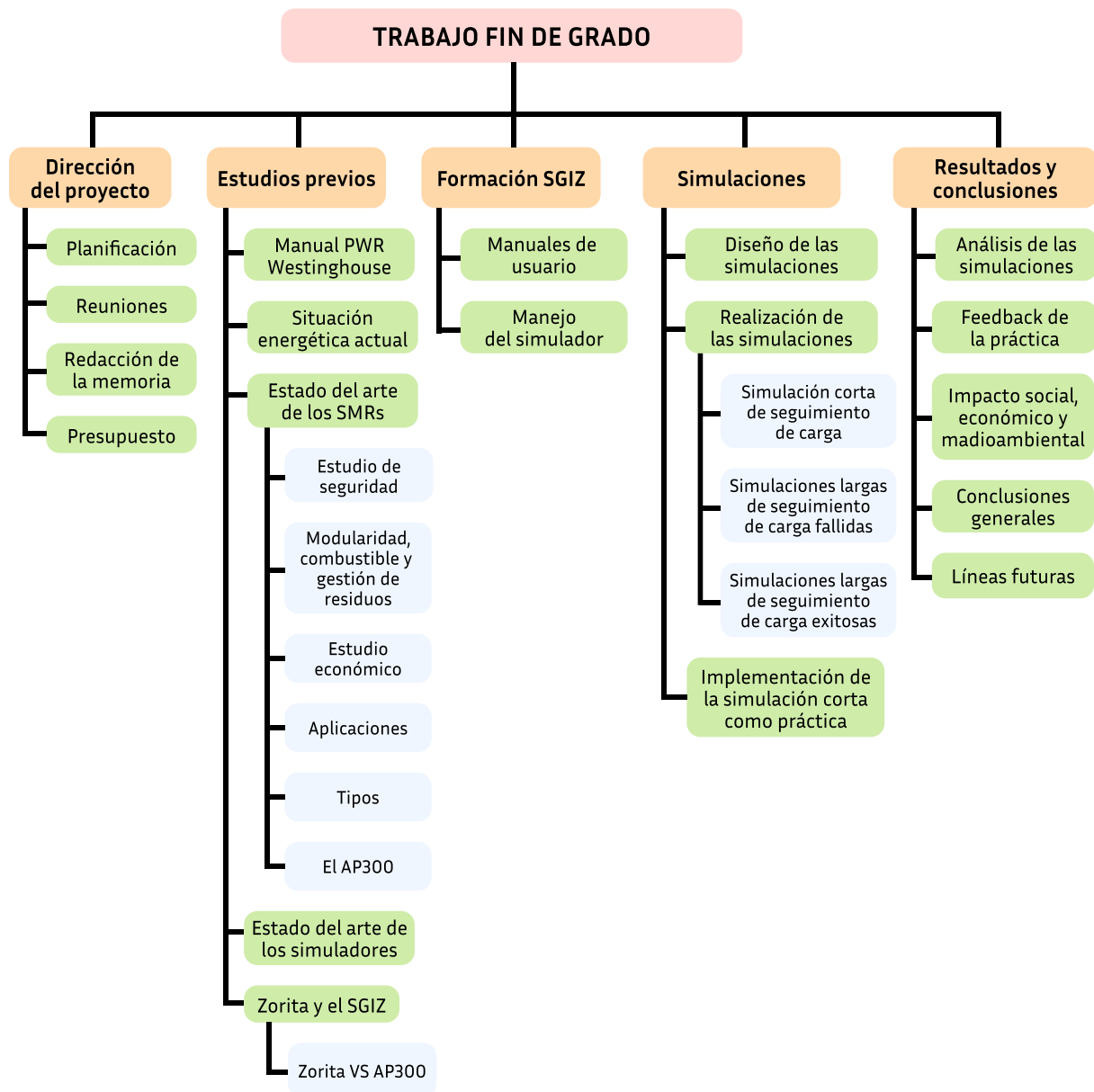


Figure 4.1: Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP).

Esta EDP proporciona la referencia básica para la elaboración del diagrama de Gantt, en el cual se incluye de forma detallada la evolución temporal del proyecto y de sus correspondientes paquetes de trabajo.

4.2 Gantt chart

A continuación, se detalla la tabla de la programación temporal del proyecto, a partir de la cual se realiza el diagrama de Gantt:

Actividad	Días	Inicio	Final
TRABAJO FIN DE GRADO	218	1-2-2024	6-9-2024
Dirección del proyecto	218	1-2-2024	6-9-2024
Reunión inicial	1	1-2-2024	1-2-2024
Planificación	5	1-2-2024	5-2-2024
Segunda reunión	1	7-2-2024	7-2-2024
Redacción de la memoria	131	12-2-2024	22-6-2024
Tercera reunión	1	20-5-2024	20-5-2024
Última reunión	1	19-6-2024	19-6-2024
Presupuesto	1	20-6-2024	20-6-2024
Revisión	34	21-6-2024	25-7-2024
Entrega	1	6-9-2024	6-9-2024
Estudios previos	48	1-2-2024	20-3-2024
Manual PWR Westinghouse	9	1-2-2024	9-2-2024
Situación energética actual	2	10-2-2024	11-2-2024
Estado del arte de los SMRs	5	12-2-2024	16-3-2024
Estudio de seguridad	4	12-2-2024	15-2-2024
Modularidad, combustible y gestión de residuos	4	16-2-2024	19-2-2024
Estudio económico	4	26-2-2024	29-2-2024
Aplicaciones	4	3-3-2024	6-3-2024
Tipos	4	6-3-2024	9-3-2024
El AP300	2	10-3-2024	11-3-2024
Estado del arte de los simuladores	5	14-3-2024	18-3-2024
Zorita y el SGIZ	2	18-3-2024	19-3-2024
Zorita VS AP300	1	20-3-2024	20-3-2024
Formación SGIZ	34	8-3-2024	11-4-2024
Manuales de usuario	14	8-3-2024	22-3-2024
Manejo del simulador	34	8-3-2024	11-4-2024
Simulaciones	77	1-4-2024	17-6-2024
Diseño de las simulaciones	11	1-4-2024	11-4-2024
Realización de las simulaciones	66	12-4-2024	17-6-2024
Simulación corta de seguimiento de carga	1	12-4-2024	12-4-2024
Simulaciones largas de seguimiento de carga fallidas	2	29-4-2024	30-4-2024
Simulaciones largas de seguimiento de carga exitosas	1	17-6-2024	17-6-2024
Implementación de la simulación corta como práctica	1	23-5-2024	23-5-2024
Resultados y conclusiones	69	13-4-2024	21-6-2024
Análisis de las simulaciones	67	13-4-2024	19-6-2024
Feedback de la práctica	1	26-5-2024	26-5-2024
Impacto social, económico y medioambiental	1	16-6-2024	16-6-2024
Conclusiones generales	2	19-6-2024	20-6-2024
Líneas futuras	1	21-6-2024	21-6-2024

Table 4.1: Programación temporal del Trabajo Fin de Grado.

Seguidamente, se muestra el diagrama de Gantt, donde las flechas indican que la actividad predecesora debe realizarse necesariamente antes que la siguiente actividad:

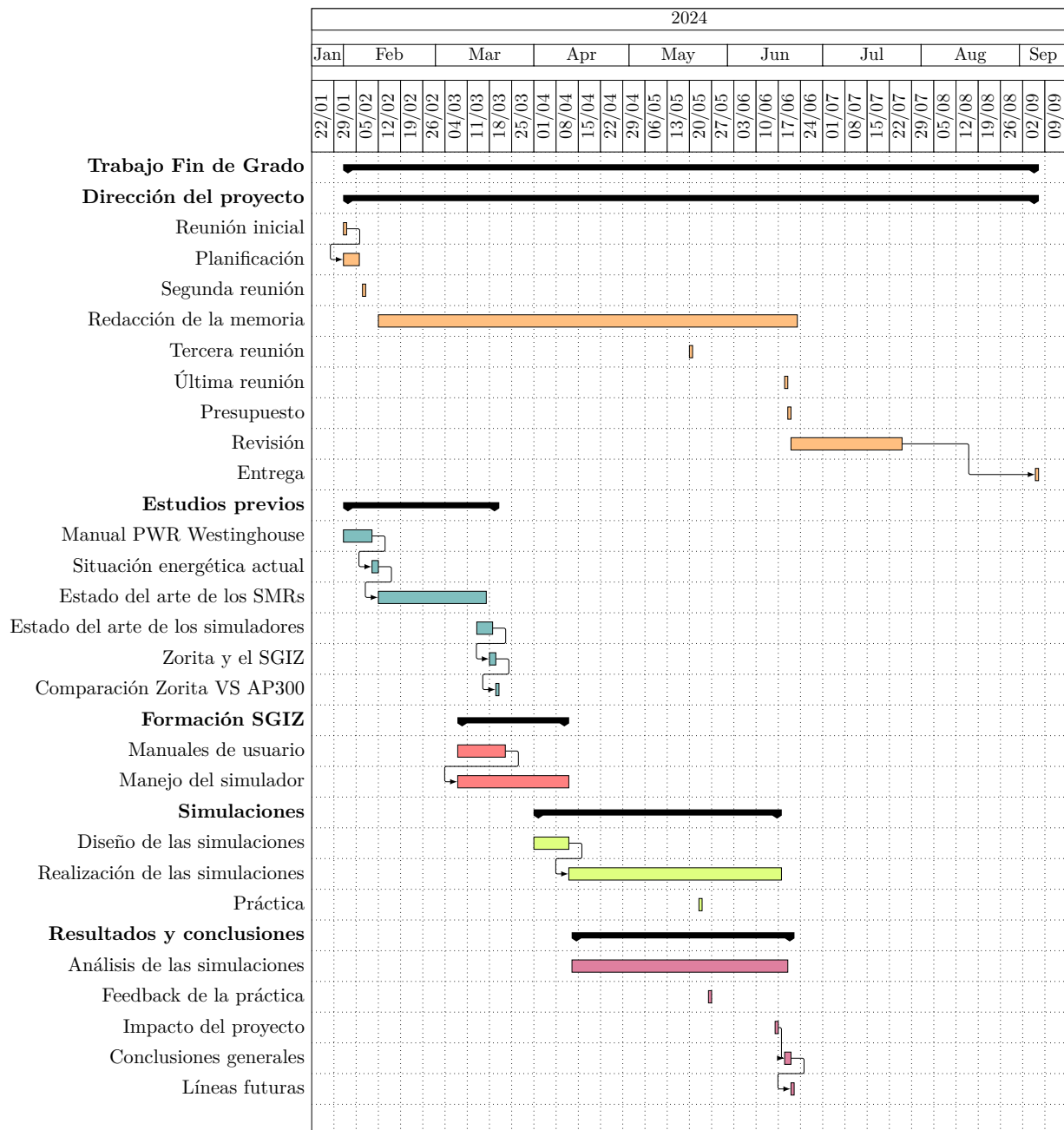


Figure 4.2: Diagrama de Gantt de este Trabajo Fin de Grado.

4.3 Budget

El presupuesto del proyecto puede dividirse en las siguientes dos principales categorías:

- **Personal:** Tal y como se muestra en el diagrama de Gantt, la duración total del proyecto ha sido de 218 días (unos 7 meses). Considerando que, de media, cada día equivale a 2 horas de trabajo, resulta un total de 436 horas. Dentro del coste de los recursos humanos involucrados en el trabajo, se distingue entre los siguientes dos casos:
 - Coste laboral del tutor y del cotutor: El coste de una hora de trabajo del tutor y del cotutor es de 40€/h.
 - Coste laboral del alumno: El coste promedio de un ingeniero junior es de unos 10€/h.
- **Equipos:** Los recursos materiales empleados para el proyecto son los siguientes:
 - Ordenador personal: El ordenador personal empleado tiene un coste de 1000€. Considerando una vida útil de 7 años, el coste mensual del empleo del mismo es de 11,9€/mes.
 - Simulador Gráfico Interactivo de Zorita (SGIZ): Tal y como se detalla en el apartado sgiz, el SGIZ es una donación que realizó Unión Fenosa tras el cierre de Zorita, por lo que su coste se considera nulo. Sin embargo, el coste del aula “José Cabrera” con los ordenadores que allí se encuentran se considera de 40€/mes.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, el presupuesto total del proyecto es el que se detalla a continuación:

1. Descripción del Trabajo Fin de Grado				
Título	SIMULACIÓN DE LAS MANIOBRAS DE SEGUIMIENTO DE CARGA CON REACTORES MODULARES PEQUEÑOS MEDIANTE EL SIMULADOR GRÁFICO INTERACTIVO DE LA CENTRAL NUCLEAR DE JOSÉ CABRERA			
Duración	218 días (7 meses) = 436 horas			
2. Presupuesto total del Trabajo Fin de Grado				
8.135,19 €				
3. Desglose de costes				
Personal				
Apellidos, Nombre	Papel en el Trabajo	Honorarios (€/hora)	Cantidad (h)	Coste (€)
Jiménez Varas, Gonzalo	Tutor	40,00	25	1.000,00
Piedra Ajates, David	Cotutor	40,00	25	1.000,00
Dies Beneytez, Antonio	Autor	10,00	436	4.360,00
Equipos				
Descripción		Coste de amortización (€/mes)	Cantidad (meses)	Coste (€)
Ordenador personal		11,9	7	83,3
Ordenadores y sala del SGIZ		40,00	7	280,00
4. Resumen de costes				
Personal				6.360,00
Equipos				363,3
IVA				21%
Total	OCHO MIL CIENTO TREINTA Y CINCO EUROS CON DIECINUEVE CÉNTIMOS DE EURO			

Table 4.2: Presupuesto del Trabajo Fin de Grado.

BIBLIOGRAPHY

ONU (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible - Naciones Unidas*. Last accessed 16 June 2024.
URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>.

APPENDICES

A Code

Todas las gráficas de las simulaciones realizadas en el SGIZ han sido elaboradas con *Python* a partir de los datos generados en *Excel* por el propio simulador. A continuación, se muestra, a modo de ejemplo, el código para la obtención de una de las gráficas:

```
1  # Importación de las librerías necesarias
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  import numpy as np
4  import pandas as pd
5
6  # Obtención de datos:
7  gen_vapor_camara_imp=pd.read_excel("simulacion3.xlsx","gen_vapor_camara_imp")
8  df_gen_vapor_camara_imp=pd.DataFrame(gen_vapor_camara_imp)
9
10 tiempo=[]
11 for i in range(0,len(df_gen_vapor_camara_imp.tiempo)):
12     tiempo.append(df_gen_vapor_camara_imp.tiempo[i].strftime('%H:%M:%S'))
13
14 pres_cam_imp=[]
15 for i in range(0,len(df_gen_vapor_camara_imp.pres_cam_imp)):
16     pres_cam_imp.append(df_gen_vapor_camara_imp.pres_cam_imp[i])
17
18 presion_gen_vapor=[]
19 for i in range(0,len(df_gen_vapor_camara_imp.
20     ↪ presion_gen_vapor)):
21     presion_gen_vapor.append(df_gen_vapor_camara_imp.presion_gen_vapor[i])
22
23 nivel_gen_vapor=[]
24 for i in range(0,len(df_gen_vapor_camara_imp.nivel_gen_vapor)):
25     nivel_gen_vapor.append(df_gen_vapor_camara_imp.nivel_gen_vapor[i])
26
27 # Creación del gráfico
28 plt.plot(tiempo, presion_camara_impulsos, label='Presión de la cámara de
29     ↪ impulsos $(kg/cm^2)$', color='lightcoral')
30 plt.plot(tiempo, presion_gen_vapor, label='Presión del generador de vapor
31     ↪ $(kg/cm^2)$', color='sandybrown')
32 plt.plot(tiempo, nivel_gen_vapor, label='Nivel del generador de vapor R.E.
33     ↪ $(cm)$', color='mediumseagreen')
34
35 # Creación de la leyenda y el título
36 plt.legend(loc='best')
37 plt.xlabel('Tiempo (hh:mm:ss)', family='Times New Roman', size=12)
38 plt.title('COMPORTAMIENTO GENERADOR DE VAPOR Y CÁMARA DE IMPULSOS',
39     ↪ fontname='Times New Roman', size=18, weight='bold')
40
41 plt.grid(True, color='lightgrey')
42 plt.yticks(np.arange(-10,50,5))
43 plt.xlim([0, len(tiempo)])
44 plt.xticks(np.arange(0,len(tiempo),360))
45 plt.xticks(rotation = 10)
46
47 # Mostrar el gráfico
48 plt.show()
```

Code A.1: Ejemplo del código utilizado para generar las gráficas de las simulaciones. Este en concreto corresponde al código de la figura xx.

LIST OF TABLES

4.1	Programación temporal del Trabajo Fin de Grado.	6
4.2	Presupuesto del Trabajo Fin de Grado.	8

LIST OF FIGURES

3.1	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con este proyecto (ONU, 2023). .	4
4.1	Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP).	5
4.2	Diagrama de Gantt de este Trabajo Fin de Grado.	7

ABBREVIATIONS, UNITS AND ACRONYMS

PWR *Pressure Water Reactor*. 7

SGIZ Simulador Gráfico Interactivo de Zorita. 7, 8, 10

SMR *Small Modular Reactor*. 4, 7