

TRABAJO FIN DE GRADO

SIMULACIÓN DE OPERACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR MEDIANTE EL SIMULADOR GRÁFICO INTERACTIVO

TRABAJO FIN DE GRADO PARA
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

JUNIO 2024

Antonio Dies Beneytez

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

Gonzalo Jiménez Varas

“La cita del trabajo iría aquí”

- El autor de la cita

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a ...

Gracias a ...

A ... por ...

RESUMEN

Este resumen deberá tener una extensión máxima de cinco páginas y habrá de constituir una síntesis de los puntos más importantes del proyecto. El resumen debe permitir al lector:

- tener una visión general del trabajo realizado
- lograr una comprensión global del proyecto. No importa cuán complejo sea el tema tratado, el resumen debe explicar lo más claramente posible en qué consiste

Además, el resumen debe crear interés en el lector para que éste lea todo el contenido del trabajo. Incluir al final Palabras clave y Códigos UNESCO.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodología	2
2. <i>SMALL MODULAR REACTORS (SMRs)</i>	3
2.1. Características fundamentales	3
2.2. Tecnologías en fase avanzada de diseño	3
2.3. Tecnologías en operación	3
BIBLIOGRAFÍA	4
ANEXOS	5
D. Primer anexo	5
E. Segundo anexo	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
3. TÍTULOS	10
A. Profundidad 2	10
A.1. Profundidad 3	10
A.1.1. Profundidad 4	10
B. Formato y numeración	10
Título sin numerar	11

C.	Referencias con el comando <code>\label</code>	11
4.	FORMATO DE TEXTO	12
A.	Tamaño de fuente	12
B.	Color	12
C.	Espaciado	12
D.	Listas	13
D.1.	Listas no numeradas	13
D.2.	Listas numeradas	13
D.3.	Listas combinadas	14
D.4.	Formato de las listas	14
5.	TABLAS	15
A.	Posicionamiento	15
B.	Entorno <code>\longtable</code>	16
6.	IMÁGENES	18
7.	ECUACIONES	19
A.	Ecuaciones en el texto	19
B.	Entorno <code>\split</code>	19
C.	La herramienta Mathpix	20

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

texto

1.2. Justificación

Actualmente, el mundo atraviesa una crisis energética global desencadenada en el año 2021 principalmente por la súbita recuperación económica tras la pandemia y agravada gradualmente hasta consumarse tras la invasión rusa de Ucrania en febrero de 2022. El precio del gas natural alcanzó máximos históricos, aumentando consecuentemente en muchos casos el coste de la electricidad en general. Familias, empresas e industrias se han visto gravemente afectadas, llevando a diversos países en camino de una fuerte recesión económica. Consecuentemente, la reducción de los costes energéticos se convierte en una de las principales prioridades de empresas y ciudadanos, y la independencia energética, la garantía de suministro y la lucha contra el cambio climático adquieren una gran importancia en el debate público de gran cantidad de países (IEA, 2023).

Frente a esta situación, la energía nuclear está tomando cada vez más relevancia en muchos países, considerándose un factor clave para conseguir los grandes desafíos políticos, económicos y climáticos a los que se enfrenta la sociedad actual en un escenario tan complicado. Numerosos países han optado por ampliar su parque nuclear existente, muchos han decidido alargar la vida de sus reactores nucleares actualmente en operación y algunos han comenzado a construir sus primeras centrales nucleares.

En este contexto, se ha incrementado muy considerablemente el interés por los reactores modulares pequeños, ampliamente conocidos como ***Small Modular Reactors (SMR)***. Se trata de una tecnología avanzada de menor escala que la convencional que ofrece grandes ventajas en lo que a coste, tiempo de construcción, seguridad y versatilidad se refiere. Por consiguiente, múltiples instituciones públicas y privadas están participando activamente en los esfuerzos encaminados a hacer prosperar esta tecnología, existiendo más de 70 diseños de SMR comerciales que se están desarrollando en todo el mundo (Liou, 2021).

Este creciente empuje de la industria nuclear está contribuyendo a un aumento de profesionales especializados en este sector y, paralelamente, a una creciente necesidad de futuros profesionales nucleares. En este contexto y frente a los grandes avances tecnológicos desarrollados actualmente, cobran una especial importancia los **simuladores** empleados tanto en la profesión como en la formación de operadores, técnicos e ingenieros nucleares. Existen múltiples simuladores virtuales y físicos desarrollados por diversas instituciones y empresas que permiten enfrentarse a las condiciones de operación, maniobras y accidentes que pueden suceder en una central nuclear. La Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (ETSII - UPM) tiene a su disposición el SGIZ (Simulador Gráfico Interactivo de Zorita), con el cual se trabajará en el presente proyecto para profundizar en el estudio de la operación de las centrales nucleares y, en concreto, en la operación de un SMR, debido a las grandes similitudes que el simulador en cuestión presenta con respecto a esta innovadora tecnología.

1.3. Objetivos

texto

1.4. Metodología

El desarrollo de este trabajo comprende dos grandes bloques: un marco teórico y un marco práctico.

El **marco teórico** incluye, en primer lugar, un detallado estudio del estado del arte de los *Small Modular Reactors*. En segundo lugar, se incorpora un análisis del funcionamiento y abanico de posibilidades que ofrecen los simuladores —en concreto, el SGIZ—. Por último, se hace un estudio de las similitudes que presenta el simulador en cuestión con un SMR.

El **marco práctico** se fundamenta en la simulación de la operación normal y de distintos transitorios en el SGIZ, con el fin de comprender mejor el funcionamiento de las centrales nucleares y, en concreto, de las de menor escala, como lo son los SMRs. Como valor añadido, se plantea la posible implementación de las simulaciones realizadas en el programa de prácticas de la asignatura de Tecnologías Avanzadas en Reactores Nucleares del Máster en Ciencia y Tecnología Nuclear impartido en la ETSII.

2. *SMALL MODULAR REACTORS (SMRs)*

Los reactores modulares pequeños, ampliamente conocidos como *SMRs (Small Modular Reactors)*, son reactores nucleares avanzados que producen hasta 300 MWe de electricidad por módulo.

2.1. Características fundamentales

Desgranar lo más interesante de las características que ofrece este tipo de reactores, mostrando las ventajas y desventajas que presenta.

2.2. Tecnologías en fase avanzada de diseño

En todo el mundo existen más de 80 diseños y conceptos de SMR. La mayoría de ellos están en diversas etapas de desarrollo y de algunos se afirma que podrán desplegarse a corto plazo. Actualmente existen cuatro SMR en etapas avanzadas de construcción en la Argentina, China y Rusia, y varios países en el ámbito de la energía nuclear y en fase de incorporación están llevando a cabo actividades de investigación y desarrollo de SMR.

2.3. Tecnologías en operación

BIBLIOGRAFÍA

IEA (2023). *Crisis Energética Mundial - International Energy Agency*. Last accessed 9 February 2024. URL: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis>.

Liou, J. (2021). *¿Qué son los reactores modulares pequeños (SMR)? - OIEA*. Last accessed 15 February 2024. URL: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>.

ANEXOS

D. Primer anexo

Contenido del primer anexo (texto, tablas, figuras, códigos, etc.)

E. Segundo anexo

ÍNDICE DE TABLAS

.1. Cinco primeros términos de la sucesión de Fibonacci	15
B.2. Cincuenta primeros términos de la sucesión de Fibonacci	17

ÍNDICE DE FIGURAS

.1. Vista de perfil del 21" Mogale Super Scooper	18
--	----

ABREVIATURAS, UNIDADES Y ACRÓNIMOS

Simuladores Los simuladores son... Esto es un ejemplo para el glosario. 1

SMR Small Modular Reactors. 1

A partir de este punto en adelante, son todo ejemplos de funcionalidades de L^AT_EX.

3. TÍTULOS

En los documentos de clase `article` (los distintos tipos de documentos disponibles así como sus diferentes aplicaciones pueden consultarse en https://en.wikibooks.org/wiki/LaTeX/Document_Structure#Document_classes) existen por defecto tres profundidades de títulos numerados, en orden jerárquico: `\section`, `\subsection` y `\subsubsection`. El título del presente capítulo es un ejemplo de título de profundidad 1 (comando `\section`).

A. Profundidad 2

Este es un ejemplo de título de profundidad 2 (comando `\subsection`) que, como se puede ver, queda automáticamente numerado con respecto al título jerárquicamente superior (profundidad 1) inmediatamente anterior.

A.1. Profundidad 3

Este es un ejemplo de título de profundidad 3 (comando `\subsubsection`) que, de nuevo, se numera automáticamente con respecto al título jerárquicamente superior (profundidad 2) inmediatamente anterior.

A.1.1 Profundidad 4

En este documento se añade una profundidad de títulos numerados adicional (mediante los comandos `\setcounter{secnumdepth}{4}` y `\setcounter{tocdepth}{4}`, ver preámbulo para más información). Así, el comando `\paragraph` se utiliza para incorporar títulos de profundidad 4, como en el caso del título del presente apartado.

Si se quisiera aumentar en un grado más la profundidad de títulos, bastaría con asignar el valor 5 a ambos comandos `\setcounter` (`\setcounter{secnumdepth}{5}` y `\setcounter{tocdepth}{5}`), y realizar los cambios pertinentes en el comando `\subparagraph` de modo que su formato sea coherente con el del resto de títulos (de la misma forma que lo realizado con el comando `\paragraph`, ver preámbulo para más información).

B. Formato y numeración

La numeración así como el formato de los títulos (tamaño de fuente, tipografía, etc.) utilizados en este documento corresponden a los valores por defecto (excepto en el caso de `\paragraph`, como se explica más arriba), pero pueden ser modificados en el preámbulo del documento (una breve guía sobre la personalización del formato de los títulos puede consultarse en https://www.overleaf.com/learn/latex/sections_and_chapters#Customize_chapters_and_sections).

En caso de que no se quiera numerar alguno de los títulos, basta con añadir un asterisco (*) al comando correspondiente, como por ejemplo `\subsection*{Título sin numerar}`:

Título sin numerar

Los títulos sin numerar no aparecen en la tabla de contenidos (índice), pero pueden ser añadidos con ayuda del comando `\addcontentsline{toc}` (utilizado previamente para los apartados de Agradecimientos y Resumen ejecutivo), que en este caso quedaría como: `\addcontentsline{toc}{subsection}{Título sin numerar}`.

C. Referencias con el comando `\label`

Los comandos `\label` se utilizan en \LaTeX para colocar referencias que puedan ser utilizadas a lo largo del documento. Son especialmente útiles, como se verá más adelante, para referirse a elementos del documento como tablas, imágenes, diagramas, etc., pero también pueden ser utilizados para referirse a capítulos o secciones del informe.

Para citar una referencia basta con utilizar el comando `\ref` en el interior del cual se indica aquello a lo que se quiere hacer referencia, como por ejemplo al primer capítulo de este documento, el capítulo 3.

Nota: ya que el comando `\label` es compartido por títulos, figuras, tablas, etc., es bastante útil utilizar una nomenclatura clara para definir cada referencia, por ejemplo: “tab:” seguido del nombre de la tabla para las tablas, “fig:” seguido del nombre de la figura para las figuras, etc.

4. FORMATO DE TEXTO

Como en cualquier editor de texto, el formato del texto puede alterarse sobre la marcha de distintas maneras. Pueden incluirse palabras en **negrita** (si se utiliza Overleaf puede utilizarse el atajo `ctrl+B` en Windows o `Cmd+B` en Mac), palabras en *curva* (`ctrl+I` o `Cmd+I`), o una *combinación* de ambas.

A. Tamaño de fuente

También se puede modificar el tamaño de forma rápida y sencilla (una lista con los distintos tamaños y sus comandos respectivos puede encontrarse en <https://www.sascha-frank.com/latex-font-size.html>)

B. Color

El color del texto también puede ser modificado sobre la marcha, así como subrayar ciertas palabras o bloques de palabras. Algunos colores están implementados por defecto y pueden utilizarse indicando simplemente su denominación (red, orange, blue, etc., resumidos en esta imagen), pero también pueden definirse colores mediante sus códigos rgb, RGB, HTML, o cmyk, haciendo uso del paquete `xcolor`. Por ejemplo: `\definecolor{coral}{rgb}{1.0, 0.5, 0.31}` define un color con el correspondiente identificador rgb que se puede utilizar de ahora en adelante haciendo uso del nombre que se le ha asignado, coral (una extensa guía con gran variedad de colores puede consultarse en <http://latexcolor.com/>)

C. Espaciado

Puede ser de utilidad insertar espacios entre distintas palabras, o espacios verticales entre párrafos u otros elementos del documento,

como en este caso.

Aunque `\hspace` y `\vspace` presenten la ventaja de ser totalmente personalizables, para espaciados de tamaño estándar es recomendable utilizar `\` (espacio) y `\\` (salto de línea).

D. Listas

Existen dos tipos de listas, las numeradas y las no numeradas.

D.1. Listas no numeradas

Las listas no numeradas corresponden al entorno `itemize`:

- Primer elemento.
- Segundo elemento.

Se pueden hacer listas de distintos niveles de profundidad:

- Primer elemento.
- Segundo elemento.
 - Tercer elemento.
 - Cuarto elemento.
 - Quinto elemento.
 - Sexto elemento.
 - Séptimo elemento.
 - Octavo elemento.
- Noveno elemento.

D.2. Listas numeradas

Las listas numeradas corresponden al entorno `enumerate`:

1. Primer elemento
2. Segundo elemento
3. Tercer elemento

Del mismo modo, las listas numeradas pueden incorporar distintos niveles de profundidad:

1. Primer elemento
 - a) Segundo elemento
 - b) Tercer elemento
 - 1) Cuarto elemento
 - a' Quinto elemento
 - b' Sexto elemento

- 2) Séptimo elemento
 - c) Octavo elemento
 - d) Noveno elemento
2. Décimo elemento.

D.3. Listas combinadas

Las listas numeradas y no numeradas pueden combinarse, por ejemplo:

- Primer elemento.
 - 1. Segundo elemento
 - 2. Tercer elemento
 - Cuarto elemento
 - Quinto elemento
 - a) Sexto elemento
 - b) Séptimo elemento
 - Octavo elemento
 - 3. Noveno elemento
- Décimo elemento

D.4. Formato de las listas

Tanto el estilo de las distintas numeraciones dentro de una lista numerada como la apariencia de los *bullet points* de las listas no numeradas pueden personalizarse:

- Primer elemento.
 - I Segundo elemento
 - II Tercer elemento
 - * Cuarto elemento
 - * Quinto elemento
 - A Sexto elemento
 - B Séptimo elemento
 - * Octavo elemento
 - III Noveno elemento
- Décimo elemento

Los distintos formatos posibles pueden consultarse en la guía elaborada por Overleaf que puede encontrarse en <https://www.overleaf.com/learn/latex/lists>.

5. TABLAS

Las tablas se definen en el entorno `table`. Existen infinidad de posibilidades en cuanto a su formato: omitir o dibujar líneas horizontales y verticales, fusionar columnas y filas, alinear el contenido a la derecha, izquierda o centro, y demás opciones resumidas en <https://www.overleaf.com/learn/latex/tables>. Dado que la forma de construir una tabla directamente en código L^AT_EX está lejos de ser cómoda e intuitiva, quizás lo más recomendable sea acudir a editores de tablas que generan automáticamente el código correspondiente y cuya interfaz es similar a la que puede encontrarse en Excel, como por ejemplo <https://www.tablesgenerator.com/>. Un ejemplo sencillo de tabla se muestra a continuación:

n	a_n	a_{n+1}	φ ($=a_{n+1}/a_n$)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	3	1,5
4	3	5	1,66666667
5	5	8	1,6
6	8	13	1,625
7	13	21	1,61538462
8	21	34	1,61904762
9	34	55	1,61764706
10	55	-	-

Cuadro .1: Cinco primeros términos de la sucesión de Fibonacci

El título de la tabla se indica mediante el comando `\caption` (este comando no solamente sirve para añadir un título a la tabla, sino que es esencial para que ésta aparezca en el índice de tablas), y, al igual que en el caso de los títulos de capítulos (ver apartado C), es muy recomendable añadir el comando `\label` para poder referirse a la tabla en cuestión en partes posteriores (o anteriores) del documento.

A. Posicionamiento

Las tablas (al igual que otros elementos como imágenes o diagramas, como se verá más adelante) pueden posicionarse en distintos lugares de la página y en distintas posiciones con respecto al texto. La forma más común de situar una tabla es inmediatamente después de un párrafo y centrada en la página (como en el caso de la tabla .1), lo que se consigue indicando `[H]` al iniciar el entorno `table` y añadiendo el comando `\centering`, respectivamente. Una guía que recopila las distintas opciones en lo que se refiere al posicionamiento de tablas e imágenes puede consultarse en https://www.overleaf.com/learn/latex/positioning_images_and_tables.

B. Entorno `\longtable`

En el caso de que una tabla sea demasiado larga como para caber en una única página se puede utilizar el entorno `\longtable`, mediante el cual \LaTeX secciona la tabla de forma automática en tantas partes como sea necesario.

n	a_n	a_{n+1}	φ ($=a_{n+1}/a_n$)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	3	1,5
4	3	5	1,66666667
5	5	8	1,6
6	8	13	1,625
7	13	21	1,61538462
8	21	34	1,61904762
9	34	55	1,61764706
10	55	89	1,61818182
11	89	144	1,61797753
12	144	233	1,61805556
13	233	377	1,61802575
14	377	610	1,61803714
15	610	987	1,61803279
16	987	1597	1,61803445
17	1597	2584	1,61803381
18	2584	4181	1,61803406
19	4181	6765	1,61803396
20	6765	10946	1,618034
21	10946	17711	1,61803399
22	17711	28657	1,61803399
23	28657	46368	1,61803399
24	46368	75025	1,61803399
25	75025	121393	1,61803399
26	121393	196418	1,61803399
27	196418	317811	1,61803399
28	317811	514229	1,61803399
29	514229	832040	1,61803399
30	832040	1346269	1,61803399
31	1346269	2178309	1,61803399
32	2178309	3524578	1,61803399
33	3524578	5702887	1,61803399
34	5702887	9227465	1,61803399
35	9227465	14930352	1,61803399
36	14930352	24157817	1,61803399
37	24157817	39088169	1,61803399
38	39088169	63245986	1,61803399
39	63245986	102334155	1,61803399
40	102334155	165580141	1,61803399
41	165580141	267914296	1,61803399
42	267914296	433494437	1,61803399

n	a_n	a_{n+1}	φ ($=a_{n+1}/a_n$)
43	433494437	701408733	1,61803399
44	701408733	1134903170	1,61803399
45	1134903170	1836311903	1,61803399
46	1836311903	2971215073	1,61803399
47	2971215073	4807526976	1,61803399
48	4807526976	7778742049	1,61803399
49	7778742049	1,2586E+10	1,61803399
50	1,2586E+10	-	-

Cuadro B.2: Cincuenta primeros términos de la sucesión de Fibonacci

Existen distintas alternativas en cuanto a qué elementos incluir tanto en la primera como en la última línea de cada sección de tabla (en el caso de la tabla B.2 se ha elegido repetir la primera línea en cada una de sus secciones), que pueden consultarse en <https://texblog.org/2011/05/15/multi-page-tables-using-longtable/>.

6. IMÁGENES

Las imágenes se insertan mediante el comando `\includegraphics` que es conveniente situar en el entorno `figure` (mismo entorno utilizado, como se verá más adelante, para gráficas o diagramas). Un ejemplo de imagen se muestra a continuación (al utilizar Overleaf es esencial cargar la imagen en el directorio de trabajo antes de insertarla en el documento):

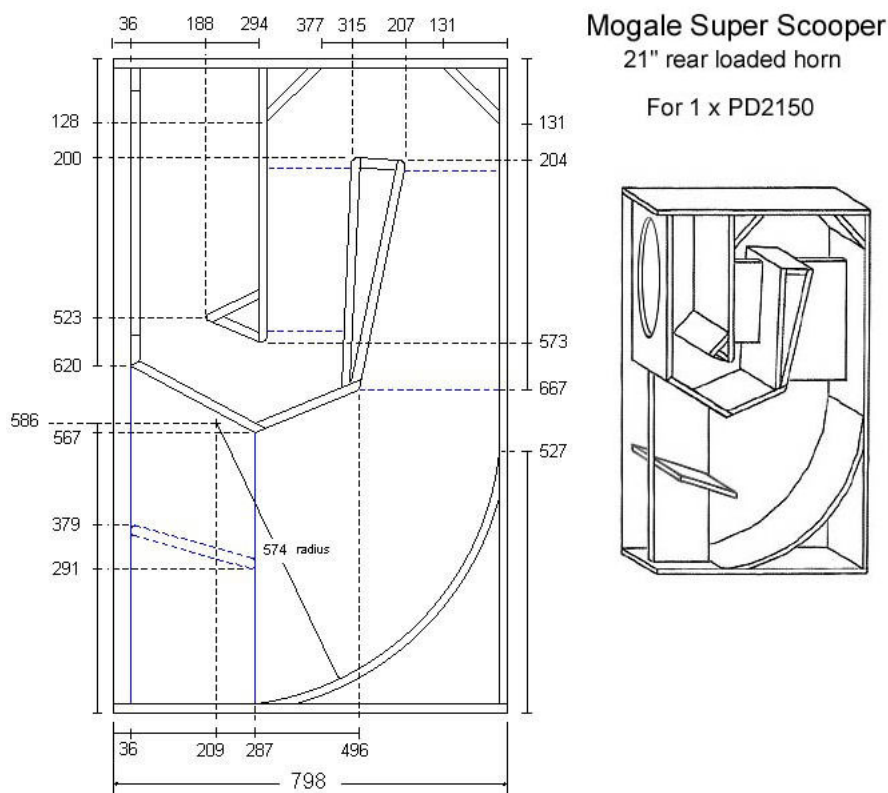


Figura .1: Vista de perfil del 21" Mogale Super Scooper

En la inmensa mayoría de casos el tamaño original de la imagen no se adapta correctamente a las dimensiones de la página, por lo que es necesario redimensionar la imagen mediante el argumento `scale` de `\includegraphics`.

Al igual que para las tablas, existen distintas alternativas en cuanto a su posicionamiento (que, se recuerda, pueden consultarse en https://www.overleaf.com/learn/latex/positioning_images_and_tables), el título se indica mediante el comando `\caption` y la referencia mediante el comando `\label`.

Existen, además, diversas opciones en lo relativo al manejo de imágenes que no se detallan en este documento, pero que pueden consultarse en https://es.overleaf.com/learn/latex/Inserting_Images

7. ECUACIONES

Una de las mayores ventajas de L^AT_EX es lo fácil y rápido que resulta incorporar ecuaciones en el documento. Las ecuaciones se definen en el entorno `equation`, mediante el cual la identidad de Euler, por ejemplo, quedaría como:

$$e^{i\pi} + 1 = 0 \quad (7.1)$$

o la serie de Leibniz:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = \frac{\pi}{4} \quad (7.2)$$

Como se puede ver, las ecuaciones se numeran de forma automática con respecto al capítulo en el que se encuentran (para no numerar una ecuación basta con definir el entorno como `\begin{equation*}`), número al que se puede hacer referencia definiendo el comando `\label`.

En este apartado se utilizan algunos de los símbolos matemáticos básicos, para más información sobre los distintos comandos que corresponden a diversos símbolos puede consultarse <https://www.caam.rice.edu/~heinken/latex/symbols.pdf>.

A. Ecuaciones en el texto

También existe la posibilidad de introducir expresiones matemáticas en una línea de texto encerrando la expresión entre dos símbolos `$`, mediante lo cual se puede hacer referencia al número complejo i , que puede definirse como $\sqrt{-1} = i$, sin necesidad de interrumpir la oración.

B. Entorno `\split`

En el caso de que una ecuación sea demasiado larga como para caber en una única línea puede usarse el entorno `split`, utilizado para el desarrollo de la serie de Taylor de $\sin x$ que aparece a continuación:

$$\begin{aligned} \sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - \frac{x^{11}}{11!} + \frac{x^{13}}{13!} + \dots \\ + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots, \forall x \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (7.3)$$

La disposición de la ecuación no se hace automáticamente, por lo que es necesario indicar en qué lugar quedan verticalmente alineadas las distintas líneas (esto se realiza mediante el símbolo `&` que en este caso va colocado después del `=` en la primera línea y antes del primer `+` de la segunda línea) y en qué momento se salta a la línea (que se indica mediante el comando `\)`).

C. La herramienta Mathpix

Mathpix es una aplicación que permite traducir a lenguaje \LaTeX cualquier ecuación, ya se encuentre en un archivo PDF o escrita a mano en un folio de papel. Aunque el proceso de plasmar ecuaciones en un documento \LaTeX ya es sencillo y rápido, esta herramienta lo vuelve casi instantáneo. La aplicación puede descargarse desde la página web de Mathpix: <https://mathpix.com/>.