

# Proyecto Fin de Carrera

## Ingeniería de Tecnologías Industriales

### Desarrollo de un material luminiscente mediante procesos mecanoquímicos

Autor: Marta Villena Adamuz

Tutor: Ernesto Chicardi Augusto

Micaela Videla Trevin

**Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y  
del Transporte**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2022





Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Desarrollo de un material luminiscente mediante procesos mecanoquímicos**

Autor:

Marta Villena Adamuz

Tutor:

Ernesto Chicardi Augusto

Micaela Videla Trevin

Profesor titular

Dpto. de Ciencia de Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera: Desarrollo de un material luminiscente mediante procesos mecanoquímicos

Autor: Marta Villena Adamuz

Tutor: Ernesto Chicardi Augusto  
Micaela Videla Trevin

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

A mis padres, por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera. Por cada lección que me habéis enseñado con vuestro propio ejemplo, con vuestro amor y con vuestras reprimendas. También a mi familia, sois el faro que siempre me espera de vuelta, sin importar lo lejos que navegue.

A Javier, por ser mi compañero de viaje incondicionalmente. Por ser el vivo ejemplo de la constancia y la valentía, apostando todo a conseguir lo que te propones sin concebir siquiera el fracaso.

También gracias a mis tutores, por haberme enseñado tanto en este proyecto y confiar en mis posibilidades para llevarlo a cabo.

Y en especial, gracias a ti abuelo, por ser mi mayor referente en la vida. Por todas las historias que me contabas y me hacían soñar en ser tan grande como tú. Porque no hay nadie a quien admire más que a ti, te dedico este y todos los logros que consiga alcanzar en mi vida. Ojalá me sonrías desde el cielo, te quiero.

*Marta Villena Adamuz*

*Sevilla, 2022*



# Resumen

---

La búsqueda de energías limpias en la actualidad resulta un campo de estudio de alta necesidad. La energía nuclear resulta una fuente óptima por sus bajas emisiones en carbono y su gran capacidad de generación eléctrica.

Actualmente esta fuente energética produce energía con tecnologías basadas en la fisión nuclear. Sin embargo, la fusión nuclear presenta fuertes ventajas frente a la anterior, tales como mayor generación energética, combustible casi ilimitado, etc.

En el desarrollo de sistemas que usen la fusión como principal mecanismo en los reactores nucleares tienen un papel fundamental los detectores de pérdidas de iones rápidos, pues estudian el rendimiento de estos dispositivos. Es aquí donde destaca el uso de materiales centelladores, que resultan idóneos gracias a sus propiedades de luminiscencia.

En concreto, el TG-Green es el que se ajusta mejor a las propiedades requeridas en un material centellador para uso de detectores de pérdidas. Por ello, en el documento presente, se persigue la síntesis del TG-Green a través de un método sencillo y de bajo costo: la mecano-síntesis.



# Índice

---

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>ix</b>                     |
| <b>Resumen</b>  | <b>xi</b>                     |
| <b>Abstract</b>   | ¡Error! Marcador no definido. |
| <b>Índice</b>   | <b>xiii</b>                   |
| <b>Índice de Figuras</b>                                      | <b>xv</b>                     |
| <b>1 Interés tecnológico y objetivos</b>                      | <b>1</b>                      |
| 1.1 <i>Introducción</i>                                       | 1                             |
| 1.1.1 Contexto global de la contaminación                     | 1                             |
| 1.1.2 Soluciones ante el estado actual                        | 4                             |
| 1.2 <i>Energía nuclear</i>                                    | 5                             |
| 1.2.1 Historia  | 5                             |
| 1.2.2 Pros y contras. Aplicaciones                            | 7                             |
| 1.2.3 Conceptos básicos y funcionamiento de la fusión nuclear | 10                            |
| <b>2 Centelladores</b>  | <b>15</b>                     |
| 2.1 <i>Mecanismos de emisión</i>                              | 15                            |
| 2.2 <i>Características de los centelladores</i>               | 16                            |
| 2.3 <i>Centelladores comerciales</i>                          | 17                            |
| 2.4 <i>Síntesis</i>   | 17                            |
| 2.4.1 Opciones de síntesis                                    | 18                            |
| 2.4.2 Mecanosíntesis  | 19                            |
| <b>3 Procedimiento experimental</b>                           | <b>19</b>                     |
| 3.1 <i>Material utilizado</i>                                 | 19                            |
| 3.2 <i>Síntesis de Tiogalato</i>                              | 20                            |
| 3.2.1 Proceso   | 20                            |
| 3.3 <i>Dopaje del tiogalato para formar TG-Green</i>          | 22                            |
| 3.3.1 Óxido de titanio  | 22                            |
| 3.3.2 Fluoruro de Europio                                     | 22                            |
| 3.3.3 Reducción de Europio                                    | 24                            |
| <b>4 Resultados</b>   | <b>25</b>                     |
| 4.1 <i>Síntesis de tiogalato</i>                              | 25                            |
| 4.1.1 Difracción de rayos X                                   | 25                            |
| 4.1.2 Difractogramas obtenidos                                | 26                            |
| 4.2 <i>Dopaje</i>   | 28                            |
| <b>5 Conclusión</b>   | <b>29</b>                     |
| <b>6 Bibliografía</b>   | <b>30</b>                     |



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-1. Temperaturas locales en 2019 en relación con la temperatura media en 1951-1980   | 2  |
| Figura 1-2. Aumento promedio global de la temperatura entre 1850 y 2019  | 2  |
| Figura 1-3. Número global de muertes por factor de riesgo (2019)   | 3  |
| Figura 1-4. Distribución global de muertes causadas por la contaminación del aire (2019)   | 3  |
| Figura 1-5. Esquema de las emisiones de gases efecto invernadero por sector  | 4  |
| Figura 1-6. Cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten por unidad de producción de electricidad (GWh) respecto a diferentes fuentes de energía                          | 5  |
| Figura 1-7: Experimental Breeder Reactor I (EBR-I) en 1951 a) y b), y en la actualidad c)  | 6  |
| Figura 1-8: Simulación del dispositivo ITER  | 7  |
| Figura 1-9: Tasas de mortalidad por unidad de producción de electricidad   | 8  |
| Figura 1-10: Esquema del proceso de fusión (izquierda) y fisión nuclear (derecha)  | 11 |
| Figura 1-11: Diagrama de heterogeneidad de partículas usando solo un campo toroidal (izquierda) y solución para conseguir la homogeneidad usando superposición de campos (derecha) | 12 |
| Figura 1-12: Reactores tokamak (izquierda) y stellarator (derecha)   | 13 |
| Figura 1-13: Representación esquemática de un NBI  | 13 |
| Figura 1-14: Detectores FILD   | 15 |
| Figura 2-1: Esquema del proceso de luminiscencia con la teoría de bandas   | 16 |
| Figura 3-1: Representación del funcionamiento (giro) de un molino planetario.  | 19 |
| Figura 3-2: Esquema del sistema de agitación magnética en un agitador  | 20 |
| Figura 3-3: Proceso desarrollado en la opción elegida para el procedimiento experimental   | 21 |
| Figura 3-4: máquina de ultrasonidos dispersando los reactivos de ambas mezclas   | 23 |
| Figura 3-5: Mezclado de los componentes en el agitador magnético   | 23 |
| Figura 3-6: Secado de la mezcla en el dispositivo de baño de arena   | 24 |
| Figura 3-7: Horneado del material seco en el horno   | 24 |
| Figura 3-8: Diagrama de flujo para el proceso de reducción del europio desde el estado de oxidación III al estado II   | 25 |
| Figura 4-1: DRX de una muestra de TG-Green commercial  | 26 |
| Figura 4-2: DRX de las muestras recogidas en la síntesis con 1h (azul), 2h (rojo), 3h (gris oscuro) y 4h (gris claro) de molienda  | 26 |
| Figura 4-3: DRX comparativo entre muestras de 1h (azul) y 2h (rojo)  | 27 |
| Figura 4-4: DRX comparativo entre muestras de 2h (rojo), 3h (gris oscuro) y 4h (gris claro)  | 27 |
| Figura 4-5: DRX comparativo entre el $\text{TiO}_2\text{:Eu}$ (rojo), el tiogalato con molienda de 2h (azul) y la mezcla de ambos (verde)  | 28 |



# 1 INTERÉS TECNOLÓGICO Y OBJETIVOS

---

En la actualidad, el problema de la contaminación en el planeta va tomando cada vez una relevancia y un peso mayor. Son numerosos los efectos perjudiciales que este crecimiento conlleva sobre el medio ambiente y sobre la salud humana. Por ello, se trata de un campo de estudio en constante desarrollo.

## 1.1 Introducción

### 1.1.1 Contexto global de la contaminación

Se entiende por contaminación a la adición de cualquier material dañino en forma sólida líquida o gaseosa. El término dañino hace referencia a la imposibilidad del medio para dispersar, diluir, descomponer, reciclar o almacenar este tipo de sustancias de manera inofensiva. Se puede desglosar una primera clasificación en: contaminación del aire, del suelo y del agua. [1]

Concretamente, en el documento presente, se estudia con mayor detenimiento los datos sobre los contaminantes principales, el efecto y el impacto de la contaminación del aire.

Por un lado, respecto a los contaminantes del aire, se estudian, según su tamaño y su composición química [3], dos clases de contaminantes emitidas al ambiente. Las primeras corresponden a las partículas gruesas (PM), en las que se incluyen partículas sólidas o gotas líquidas con un diámetro medio inferior a 10  $\mu\text{m}$ . La segunda clase son los llamados aerosoles (PM<sub>2.5</sub>), y comprenden de igual modo partículas sólidas y gotas líquidas, pero esta vez con un diámetro medio inferior a 2.5  $\mu\text{m}$ . La tercera y última clasificación hace referencia a cualquier contaminante en estado gaseoso o vapor. Entre ellos, destacan por ejemplo algunos muy sonados como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>) o el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [2]. Son ejemplos de los conocidos gases del efecto invernadero.

En cuanto a los efectos que tienen dichos contaminantes sobre el medio ambiente, encontramos [4]:

- **Lluvia ácida:** puede darse en forma húmeda como lluvia, “fog” y nieve, o seca en partículas y gases. Estas precipitaciones contienen cantidades tóxicas de ácidos nítricos y sulfúricos que provocan daños en la naturaleza (acidez en suelos y aguas) e incluso en edificaciones realizadas por el hombre.
- **Neblina (Haze):** producida por partículas finas y dispersas que reducen la transparencia del aire. Principalmente es causada por emisiones de gases.
- **Ozono:** a pesar de que el ozono situado en la estratosfera nos protege frente a los rayos UV, el generado a nivel de la troposfera resulta ser un contaminante muy dañino. Por otro lado, el ozono que forma la capa protectora, también está sufriendo los efectos de la contaminación, volviéndose más fina y perdiendo su función de filtro ante radiaciones UV.
- **Cambio climático:** como consecuencia de la emisión de los gases de efecto invernadero. El principal efecto de este fenómeno es el conocido como “calentamiento global”, en el cual se registra un aumento de temperaturas generalizado en el planeta (Figuras 1-1 y 1-2).

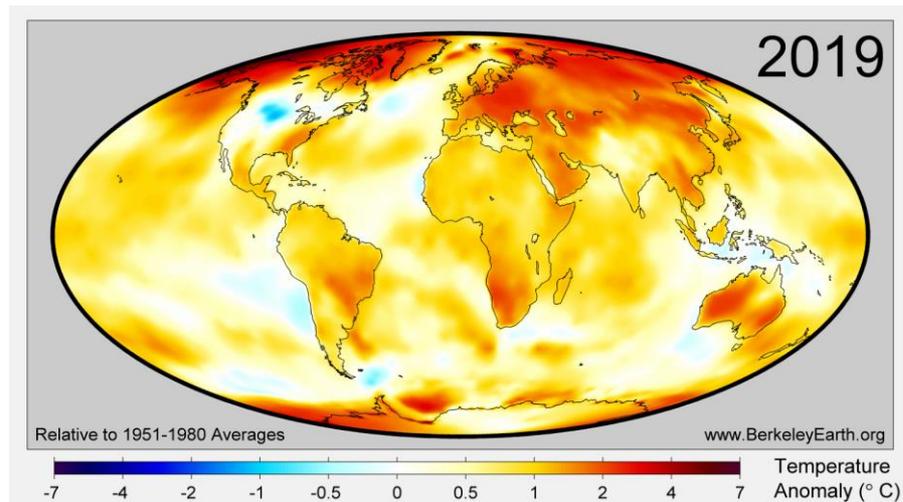


Figura 1-1. Temperaturas locales en 2019 en relación con la temperatura media en 1951-1980. Fuente: [5]

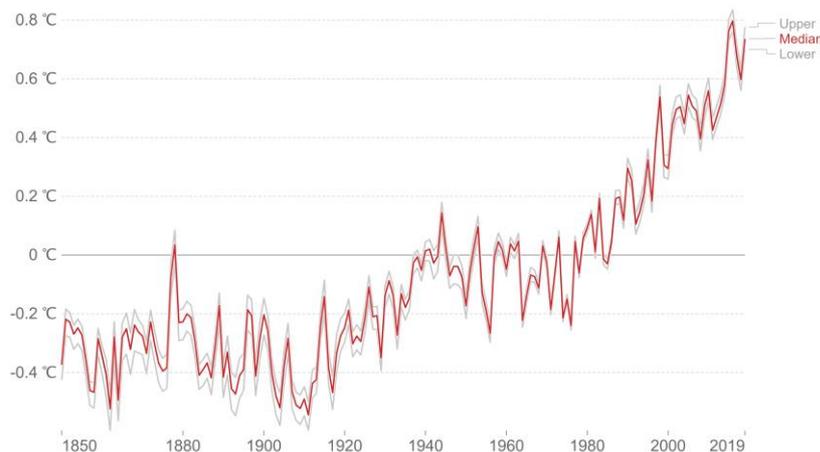


Figura 1-2. Aumento promedio global de la temperatura entre 1850 y 2019. Fuente: [5]

En el gráfico de la Figura 1-2 se observa la temperatura media mundial relativa a la media del período comprendido entre 1850 y 2019. La línea roja representa la tendencia de la temperatura media anual a lo largo del tiempo, con los intervalos de confianza superior e inferior mostrados en gris claro.

Se puede visualizar que en las últimas décadas, las temperaturas globales han aumentado considerablemente: a aproximadamente  $0,7\text{ °C}$  más que la media de 1960-1990. En torno a 1850, se observa que las temperaturas entonces eran  $0,4\text{ °C}$  más frías que en la línea de base. De modo que esto equivaldría a un aumento de temperatura promedio de  $1,1\text{ °C}$  [5].

- **Destrucción de ecosistemas:** la polución afecta al empobrecimiento y toxicidad de tierra y agua de multitud de áreas de la naturaleza.
- **Eutrofización:** se da cuando existe elevada concentración de nutrientes y pueden causar un desequilibrio en medios acuáticos.

Por otro lado, los efectos que tienen sobre la salud humana [4]:

- **Ante exposición a corto plazo:** puede producir desde simple discomfort como irritación de ojos, de nariz, piel y garganta, tos y opresión en el pecho y dificultades respiratorias, hasta niveles más serios

como asma, neumonía, bronquitis, y problemas cardíacos y pulmonares. También pueden causar dolores de cabeza, náuseas y mareos.

- **Ante exposición a largo plazo:** afecta mayormente al sistema nervioso, reproductivo y respiratorio. Causan cáncer e incluso la muerte. Son efectos crónicos, que perduran durante años o pueden conducir a la muerte.

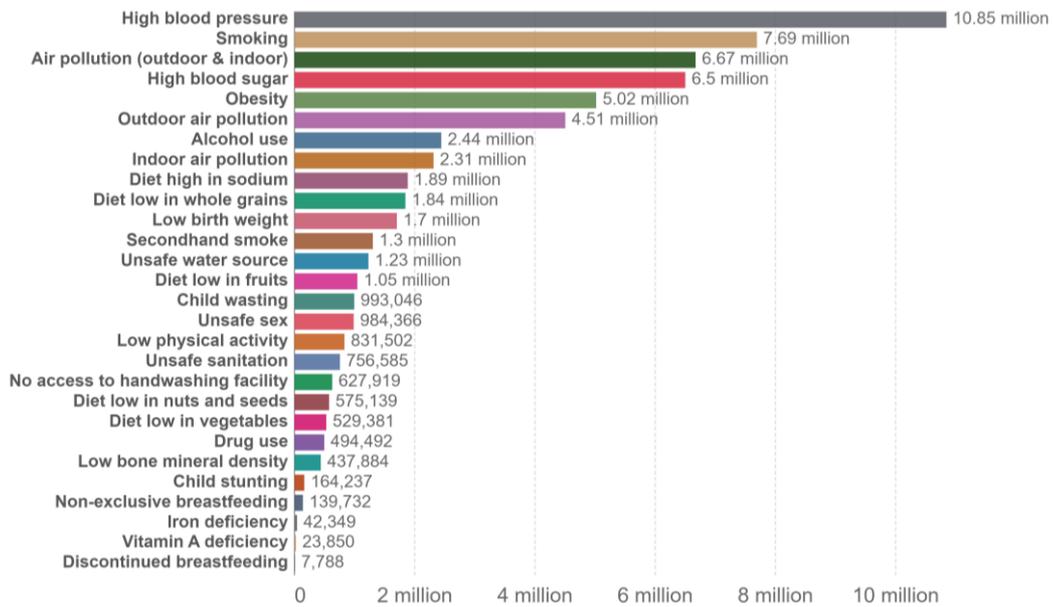


Figura 1-3. Número global de muertes por factor de riesgo (2019). Fuente: [16]

Tal y como se observa en la Figura 1-3, la contaminación del aire es uno de los principales factores de riesgo, pues supone la tercera causa de muerte en el mundo, por detrás del tabaco y de la alta presión arterial. Concretamente, se observa que en 2019 hubo casi 7 millones de fallecimientos (6.67 millones) debidos a este gran problema [16].

Otro dato destacable es que la contaminación del aire en los países de bajos ingresos, suele estar muy cerca de la parte superior de la lista (o es el principal factor de riesgo) [16].

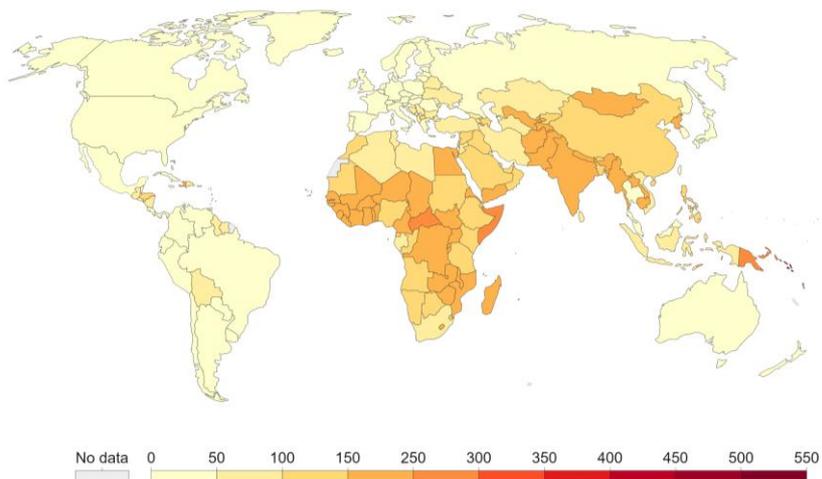


Figura 1-4. Distribución global de muertes causadas por la contaminación del aire (2019). Fuente: [16]

En el mapa (Figura 1-4), se muestran las tasas de mortalidad por contaminación del aire en todo el mundo en el año 2019, medidas como el número de muertes por cada 100.000 habitantes de un país o región determinado [16].

Tal y como se puntualizó anteriormente, la carga de la contaminación del aire tiende a ser mayor en los países de ingresos bajos y medianos por dos razones: las tasas de contaminación interior tienden a ser altas en los países de bajos ingresos debido a la dependencia de combustibles sólidos para cocinar; y la contaminación del aire exterior tiende a aumentar a medida que los países se industrializan y cambian de ingresos bajos a medios [16].

### 1.1.2 Soluciones ante el estado actual

Tras haber analizado detenidamente la gran preocupación que supone la polución en la actualidad en el apartado 1.1.1, el gran reto que surge es la reducción de la misma en el presente y estar lo más cerca posible de la erradicación total en un futuro.

Para ello, en primer lugar, hay que estudiar el núcleo del problema. Así, desglosando las emisiones de gases de efecto invernadero por sectores, se representa el gráfico de la Figura 1-5. Donde casi  $\frac{3}{4}$  partes de la producción de contaminantes se deben a la industria energética [15].

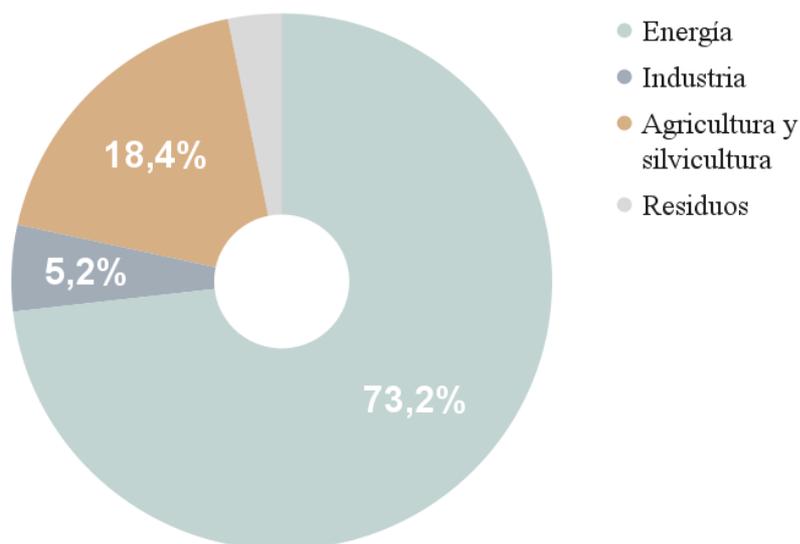


Figura 1-5. Esquema de las emisiones de gases efecto invernadero por sector. Fuente: [15]

De modo que, implantando nuevos sistemas de producción de energía más limpios, se puede lograr un gran impacto sobre el medio ambiente. Es en este punto donde cabe destacar el papel de la energía nuclear, que será el foco de estudio de este documento en lo que sigue.

En la Figura 1-6, se representan los valores de la cantidad de gases de efecto invernadero por cada GWh de producción eléctrica. Teniendo en cuenta que 1 GWh corresponde a la cantidad consumida por 150 personas durante un año en EEUU, se observa que, para esa misma generación eléctrica, el carbón emite 820 toneladas de gases contaminantes, mientras que la energía nuclear solo emite 3 toneladas; 273 veces menores emisiones. Por ello, se puede decir que esta fuente de energía encaja con el perfil de bajas emisiones de carbono, junto con energías renovables como la solar o la eólica, y sin embargo, únicamente se usa para la producción del 10% de la producción de electricidad [17].

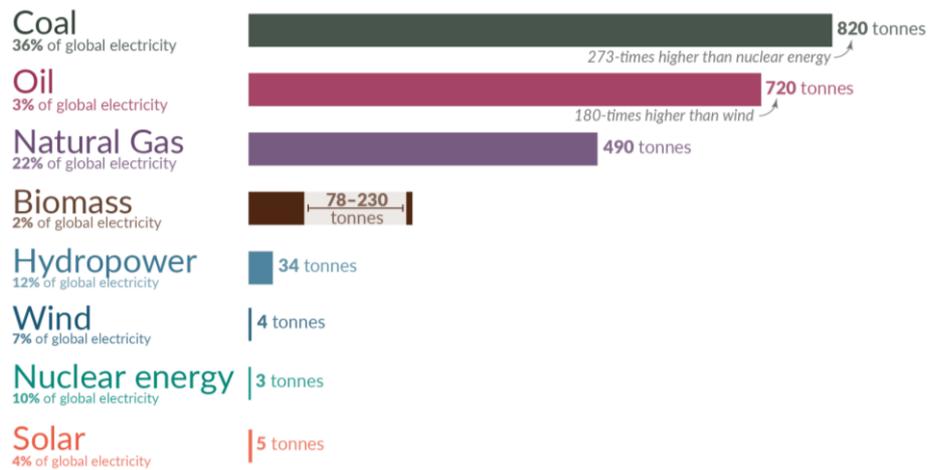


Figura 1-6. Cantidad de gases de efecto invernadero que se emiten por unidad de producción de electricidad (GWh) respecto a diferentes fuentes de energía. Fuente: [17]

Por último, llegado a este punto, cabe especificar que existen dos métodos diferentes de obtención de energía dentro de la denominada “energía nuclear” (que serán desarrolladas con mayor profundidad en el apartado 1.2.3): la fisión y la fusión nuclear. En la actualidad, y por tanto en todos los datos expuestos anteriormente, es la fisión el método empleado para la obtención de energía; pues la tecnología en referencia a la fusión sigue aún en desarrollo.

## 1.2 Energía nuclear

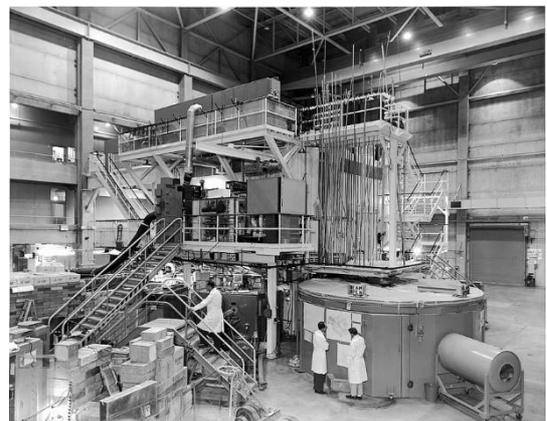
### 1.2.1 Historia

Si bien es cierto que el primer hallazgo importante relacionado con la energía nuclear, el descubrimiento del Uranio, ocurrió en 1789 por Martin Klaproth, un químico alemán, no fue hasta 1932-1939 cuando se produjeron los avances más significativos en relación a la fisión nuclear. Estos primeros grandes pasos se enfocaron en la fisión nuclear (la fusión no fue estudiada hasta principios de 1960) y se vieron afectados por la Segunda Guerra Mundial, en 1939, pues las siguientes experimentaciones se vieron enfocados hacia aplicaciones de carácter bélico. Finalmente, la culminación de dicho trabajo, se produjo con el lanzamiento de dos bombas atómicas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki el 6 y 9 de agosto de 1945 respectivamente. [6]

Fue en la década de 1950 cuando se empezaron a hacer desarrollos en aplicaciones pacíficas como la producción de energía de vapor y electricidad. El primer suceso remarcable fue la puesta en funcionamiento del reactor nuclear “Experimental Breeder Reactor I” (Figura ,a), b), c)), en el Laboratorio Nacional Argonne en Idaho, Estados Unidos, en 1951. [6,7]



a)



b)



c)

Figura 1-7: Experimental Breeder Reactor I (EBR-I) en 1951 a) y b), y en la actualidad c). Fuente: [18, 19, 20]

Seguidamente, a pesar de la campaña “Atoms for Peace” liderada por el presidente de los Estados Unidos en 1943, Dwight D. Eisenhower, para promover el uso de la energía nuclear, hasta casi 20 años después, entre 1970-1985. Durante este periodo, ocurrió una gran expansión en el número de reactores nucleares, que fueron de unos 80 a principios de los 70, hasta 360 en 1985 [7]. Este crecimiento se materializó gracias al desarrollo del llamado “tokamak” (reactor de fusión), un tipo de configuración en forma de cámara toroidal con bobinas magnéticas, por parte de Tamm y A. Sakharov a principios de la década de 1960 y fue adoptado rápidamente por los investigadores alrededor del mundo [8, 9].

Tras este auge, hubo dos principales sucesos que marcaron el estancamiento del desarrollo de esta ciencia. El primero fue el aumento del interés por el petróleo a partir de 1980 (en consecuencia de la caída de los precios) y sobre todo, en segundo lugar, el accidente nuclear de Chernóbil (causado por la explosión de un reactor de fisión), en 1986, que cambió la visión del mundo respecto a esta fuente de energía. Aunque por otro lado, otros países como en Europa del Este y en Asia, se siguieron avanzando en los proyectos de energía. [6,7]. Fue más adelante, en 1991, cuando un experimento tokamak (por tanto de fusión) propiedad de la Comisión Europea y ubicado en Culham, el Joint European Torus (JET), logró producir una potencia máxima de 2 MW, récord hasta la fecha [8,9].

De modo paralelo a la investigación del tokamak, se llevaron a cabo experimentos y estudios del “stellarator” (otro tipo de configuración en fusión que se diferencia del tokamak en que este posee un sistema helicoidal, basado también en campos magnéticos) y fue en 2015 cuando se puso en funcionamiento el reactor más grande del mundo, Wendelstein 7-X (W7-X), y recientemente logró resultados récord mundiales en rendimiento [8,9].

Por último, en cuanto a la actualidad y miras de futuro, se encuentra el proyecto ITER (del latín “iter”, el camino). Se trata de un experimento en el que colaboran siete países que representan a más de la mitad de la población mundial: China, India, Japón, Corea, Rusia, Estados Unidos y Europa, y está representado por la Comisión Europea. La idea fue lanzada en 1985 en una cumbre en Ginebra, y 21 años después se firmó el acuerdo ITER, cuyo plazo de construcción se estimó en 9 años. Pero pronto se hizo evidente que entre el informe entregado en 2001 y el necesario diseño constructivo había mucha más distancia que la inicialmente prevista. Por ello, la construcción de ITER comenzó en 2010, la primera prueba se espera para 2025 y, después de un período de puesta en marcha, se prevé que la operación de energía de fusión comience en 2035 [8,9].

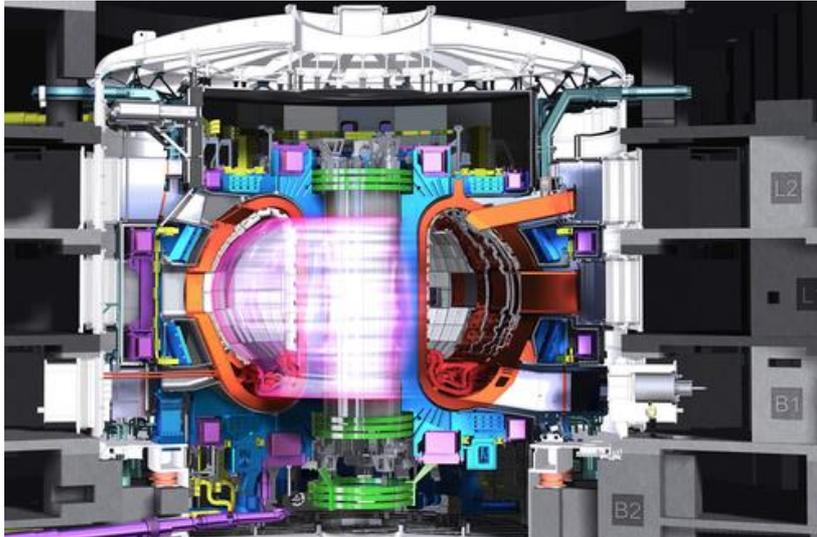


Figura 1-8: Simulación del dispositivo ITER. Fuente: [9]

## 1.2.2 Pros y contras. Aplicaciones

Hasta ahora solamente se han expuesto las ventajas que ofrece la energía nuclear con respecto al problema de la contaminación del aire, pero se hace necesaria la evaluación general de aspectos positivos y negativos de este recurso.

### 1.2.2.1 Ventajas

Las principales ventajas que ofrece esta tecnología son [14, 10, 11]:

- **Viabilidad económica:** a pesar de requerir una gran inversión inicial en la construcción de una planta nuclear, se trata de un coste fácilmente recuperable con su puesta en funcionamiento, debido a que los costes operacionales son muy bajos.
- **Respetuosa con el medio ambiente:** al ser una de las fuentes de energía con emisión muy cercana a cero de gases de efecto invernadero (Figura 1-6).
- **Segura:** aunque la visión social de la actividad nuclear sea de rechazo debido a los accidentes nucleares como los de Chernóbil y Fukushima, en comparación con los millones estimados que mueren cada año a causa de las emisiones de gases efecto invernadero provenientes del uso de combustibles fósiles, el número final de muertes es muy bajo.

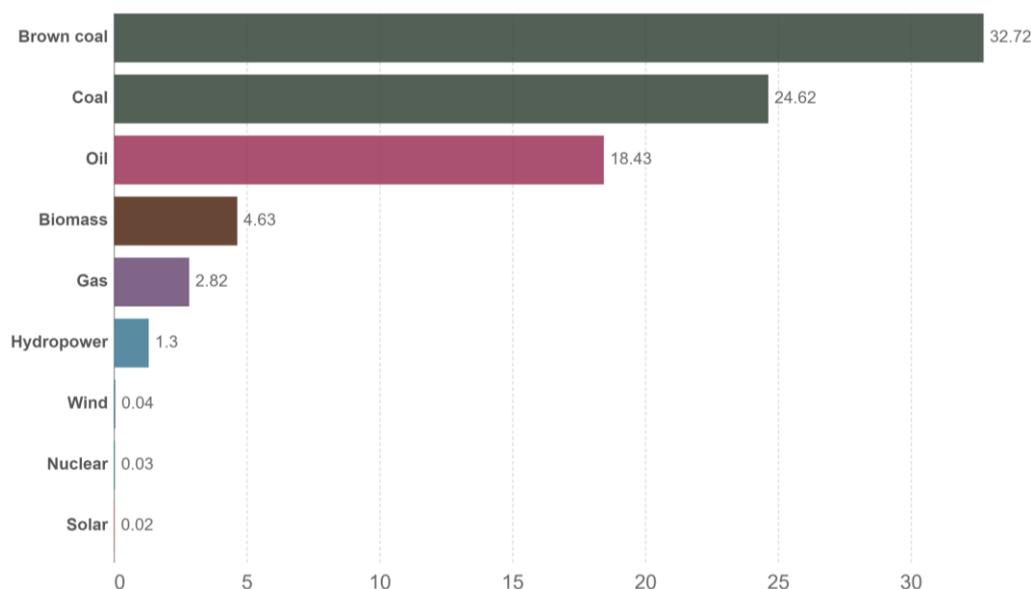


Figura 1-9: Tasas de mortalidad por unidad de producción de electricidad. Fuente: [17]

En la Figura 1-9, se representan las muertes estimadas que son causadas por unidad de electricidad, en teravatio-hora. Un teravatio-hora equivale aproximadamente al consumo anual de electricidad de 150.000 ciudadanos de la Unión Europea [17]. Hay que puntualizar que estas cifras son cantidades estimadas, pues resulta muy complejo cotejar esta información.

De este modo, se asegura que las comparaciones sean justas, pues no se puede limitar a cotejar el número total de muertes de cada fuente, ya que los combustibles fósiles predominan en la combinación global de electricidad. Esto incluye muertes por contaminación del aire y accidentes en la cadena de suministro [17].

En términos numéricos, la energía nuclear, provoca un 99.9-99.8 % menos de muertes que el carbón; 99.7% menos que el petróleo; y 97.6% menos que el gas [17].

### 1.2.2.2 Desventajas

Por otro lado, los inconvenientes son [10, 11]:

- **Costes de instalación:** como se ha puntualizado en el primer aspecto del apartado 1.2.2.1 (ventajas: viabilidad económica), la inversión que hay que desembolsar en primer lugar para la instalación de una planta nuclear es muy elevada.
- **Armas nucleares:** pese a que la mayoría de países han firmado un tratado de no proliferación de materiales para la producción de armas nucleares, no se pueden obviar los errores ya cometidos en el pasado (véase apartado 1.2.1) ni negar la posibilidad de que un desastre así pueda volver a ocurrir.
- **Desechos nucleares:** la obtención de energía por fisión (método de las plantas nucleares desarrollado en la actualidad) genera residuos radiactivos.

### 1.2.2.3 Aplicaciones

Si bien es cierto que la energía nuclear resulta una herramienta interesante a la par que conveniente para la generación de electricidad, su uso no es exclusivo de esa aplicación. Para ello se emplea la utilización de los llamados isótopos, que son variantes de un elemento químico dado que tienen núcleos con el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones. Algunos isótopos se denominan "estables" porque no cambian con el tiempo. Otros son 'inestables' o radiactivos ya que sus núcleos cambian con el tiempo a través de la pérdida de partículas alfa y beta [22].

En la Tabla 1-1 se recogen aplicaciones relacionadas con otros sectores:

|                      |   |
|----------------------|---|
| Agricultura          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Mejora por mutación de plantas:</b> se trata de la exposición de las semillas o esquejes de una planta a la radiación, para causar mutaciones. Estas mutaciones aceleran y mejoran el proceso natural de mutación genética espontánea, pudiendo conseguir las características deseadas.</li> <li>- <b>Fertilizantes:</b> el uso de isótopos en fertilizantes sirve para ver qué cantidad de producto ha sido absorbido por la planta. De este modo, es posible optimizar la gestión del uso de estos fertilizantes, lo cual también ayuda al medio ambiente, pues estas sustancias son perjudiciales.</li> <li>- <b>Control de insectos:</b> usa una técnica llamada SIT, del inglés <i>Sterile Insect Technique</i> (Técnica de Insectos Estériles). Se basa en criar a poblaciones de insectos esterilizados con irradiación e introducirlas en poblaciones naturales. Estos insectos no pueden producir descendencia, pero siguen siendo sexualmente activos.</li> </ul>   |
| Productos de consumo | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Detectores de humo:</b> utiliza la radiación de una pequeña cantidad de material radiactivo para detectar la presencia de humo o fuentes de calor.</li> <li>- <b>Relojes:</b> gracias a propiedades de luminiscencia (véase apartado 2.1) se usan en pantallas</li> <li>- <b>Otros:</b> como sartenes antiadherentes para asegurar la adherencia del recubrimiento a la superficie de la sartén y la resistencia a la abrasión de la misma, fotocopiadoras para evitar la acumulación estática o esterilización de cosméticos.</li> </ul>   |
| Alimento             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Irradiación de alimentos:</b> es un proceso en el que se exponen los alimentos a radiación, consiguiendo matar bacterias transmisoras de enfermedades. Posee los mismos beneficios que la refrigeración, la congelación, el calentamiento o la exposición a agentes químicos, con la diferencia de que los alimentos no sufren ningún cambio en su temperatura y no deja residuos. Además de inhibir el deterioro, la irradiación puede retrasar la maduración de frutas y verduras para prolongar su vida útil.</li> </ul>   |
| Industria            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Trazadores industriales:</b> se utilizan para investigar procesos y resaltar las causas de la ineficiencia. Permiten controlar el flujo y la filtración de fluidos, detectar fugas y medir el desgaste del motor y la corrosión de los equipos de proceso. También se utilizan en la industria del petróleo y el gas para ayudar a determinar la extensión de los yacimientos petrolíferos.</li> <li>- <b>Inspección:</b> permiten examinar piezas metálicas y la integridad de las soldaduras en una variedad de industrias.</li> <li>- <b>Calibre:</b> miden la cantidad de radiación de una fuente que ha sido absorbida por los materiales. Se hacen especialmente convenientes cuando condiciones como el calor, la presión o las sustancias corrosivas, hacen imposible o difícil el uso de manómetros de contacto directo.</li> <li>- <b>Datación por carbono:</b> sirve para determinar la edad de las rocas y otros materiales de distintos tipos de interés (geológico, arqueológico, etc). Funcionan analizando la abundancia relativa de determinados radioisótopos naturales.</li> <li>- <b>Desalinización:</b> es la potabilización, mediante irradiación, del agua del mar, aguas subterráneas mineralizadas y aguas urbanas, donde no se puede obtener agua para el consumo de algún río o arroyo.</li> </ul> |
| Medicamento          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Diagnóstico:</b> se usan los llamados radiofármacos, que son radiotrazadores que son administrados al paciente por vía oral, respiratoria o parenteral. Estos radiofármacos emiten radiación desde el interior del cuerpo, la cual es detectada por una cámara, y luego se puede estudiar la actividad en el órgano como una imagen bidimensional o, mediante tomografía, como una imagen tridimensional.</li> </ul>  |

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
|                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Terapia:</b> las células cancerosas son sensibles al daño por radiación, es por ello que muchos de ellos pueden eliminarse gracias a esta tecnología, llamada radiocirugía.</li> <li>- <b>Esterilización:</b> Los hospitales utilizan la radiación para esterilizar productos y suministros médicos, como jeringas, guantes, ropa e instrumentos que, de lo contrario, se dañarían con la esterilización por calor.</li> <li>- <b>Control de insectos:</b> además de los fines en la agricultura, también se han encontrado aplicaciones contra la lucha de insectos transmisores de enfermedades usando la técnica de esterilización explicada anteriormente.</li> </ul> |
| Transporte                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Barcos de propulsión nuclear:</b> La energía nuclear es especialmente adecuada para los buques que necesitan estar en el mar durante largos períodos sin repostar, o para la propulsión de submarinos de gran alcance.</li> <li>- <b>Reactores nucleares para el espacio:</b> Los generadores térmicos de radioisótopos (RTG) se utilizan en misiones espaciales.</li> <li>- <b>Hidrógeno:</b> producción de hidrógeno en plantas nucleares. El hidrógeno se puede usar en celdas de combustible para impulsar automóviles, o se puede quemar para proporcionar calor en lugar de gas sin producir emisiones que causarían el cambio climático.</li> </ul>                |
| Recursos hídricos y medio ambiente | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Recursos hídricos:</b> permite rastrear y medir con precisión la extensión de los las aguas subterráneas</li> <li>- <b>Conservación:</b> se está estudiando la posibilidad de integrar algún elemento radiactivo en lugares no dañinos de ciertas especies animales (ejemplo concreto es en el cuerno de los rinocerontes), para impedir su caza furtiva.</li> </ul>  |

Tabla 1-1: Aplicaciones de la energía nuclear no-eléctricas. Fuente: [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]

### 1.2.3 Conceptos básicos y funcionamiento de la fusión nuclear

La energía nuclear consiste en la obtención de energía a partir del núcleo de un átomo. Esta energía puede obtenerse por la ruptura de átomos o su unión, llamadas respectivamente fisión y fusión nuclear.

La fisión nuclear, la más usada hasta ahora (por ser la energía nuclear viable comercialmente a día de hoy), consiste en la separación de un isótopo con gran masa atómica (generalmente de uranio o plutonio) en partículas más pequeñas. Esta división tiene lugar gracias al bombardeo de partículas a alta velocidad, usualmente neutrones. Al separarse, la reacción desprende energía (Figura 1-10). [37]

Por otro lado, la fusión se trata del proceso contrario: la unión de varios isótopos con masa atómica ligera (normalmente hidrógeno por su alta eficiencia), bajo condiciones de altas presiones y temperaturas. En dicha reacción deuterio-tritio (isótopos del hidrógeno), al unirse, crean un nuevo átomo (helio), un neutrón y una cantidad de energía varias veces superior a la de la fisión. [37]

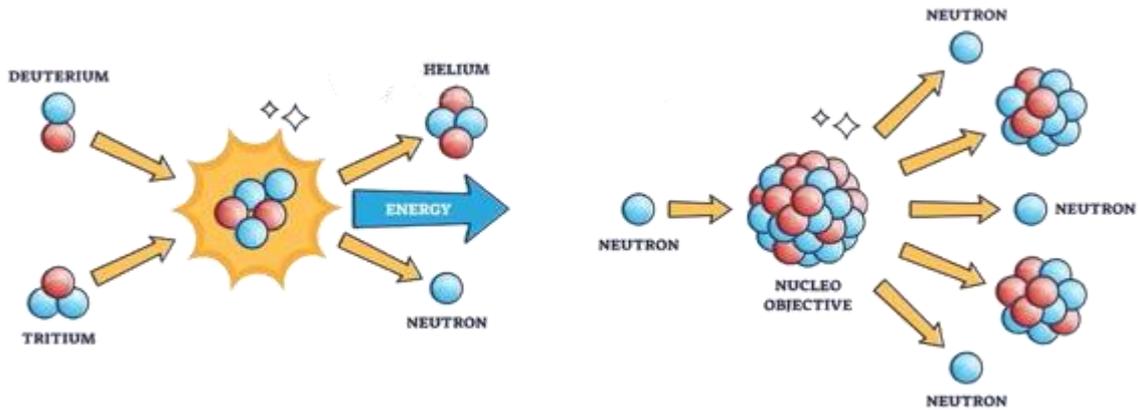


Figura 1-10: Ejemplo de una reacción de fusión (izquierda) y fisión nuclear (derecha). Fuente: [37]

En la Tabla 1-2 se recoge una comparativa entre las principales características de la fusión y la fisión nuclear:

|                    | Fisión   | Fusión  |
|--------------------|--|---|
| Átomo              | Uranio, Plutonio   | Hidrógeno: isótopos deuterio-tritio   |
| Uso                | Producción de energía en centrales nucleares                       | Técnica en desarrollo   |
| Energía            | Un millón de veces superior (promedio) a las fuentes tradicionales | 3-4 veces mayor que la fisión nuclear   |
| Desechos nucleares | Núcleos inestables: radiactivos durante millones de años           | Helio: gas inerte<br>Tritio (dentro de la planta en circuito cerrado): radiactivo con vida media corta y en cantidades muy pequeñas |
| Armas nucleares    | Sí: la producción de energía se basa en una reacción en cadena     | No: requieren una activación por fisión (no es una reacción en cadena)  |
| Seguridad          | Muy poco probable gracias a la seguridad de las plantas actuales   | Máxima. Cada cambio de la configuración de trabajo provoca el enfriamiento del plasma o la pérdida de su contención                 |

Tabla 1-2: Características de la fusión y la fisión. Fuente: [37, 38, 39]

Haciendo un balance de todos los aspectos expuestos en los apartados anteriores, se hace inequívoco el actual interés en el desarrollo de la fusión nuclear como fuente de energía.

### 1.2.3.1 Fusión

Como se ha descrito en el punto anterior, la fusión nuclear obtiene energía gracias a la unión de átomos ligeros formando uno nuevo más pesado. Al fusionarse dos núcleos atómicos, el núcleo resultante es levemente más ligero que la suma de los originales. A la temperatura a la que esta reacción tiene lugar, la materia se encuentra en estado de plasma. Al someter a un gas a altas temperaturas se logra que los electrones dejen de orbitar alrededor del núcleo de un átomo y pasen a moverse libremente. Cuando un átomo no tiene electrones moviéndose alrededor de su núcleo, y por tanto se convierte en un ión, es decir, está ionizado.

Por tanto, se puede concluir que el plasma es un gas muy caliente formado por iones y electrones libres. Al estar formado por partículas cargadas, sus propiedades son únicas y distintas a las de los estados sólido, líquido y gaseoso [42].

Para que la fusión ocurra, hay que romper con la repulsión eléctrica que existe entre los núcleos. Esto, como ocurre en el sol, se consigue gracias a temperaturas muy elevadas, alrededor de 10 millones de grados centígrados [40]. Además, también es necesario que los átomos estén confinados en un espacio reducido para aumentar las probabilidades de colisión. En las estrellas, se consigue gracias a las fuerzas gravitatorias creadas por su inmensa masa [42].

Para lograr dicho confinamiento del plasma, además de las fuerzas gravitatorias (que resulta inaplicable en la Tierra por las enormes masas que harían falta), existen otros métodos como [33, 35]:

- **Confinamiento inercial:** se trata de una pequeña bola de isótopos de deuterio-tritio que se inyecta en una cámara donde, a través de un láser intenso, se comprime a densidades muy altas y elevan su temperatura. De este modo, se consigue el inicio de la fusión, donde el plasma queda confinado por su propia inercia. El problema de esta tecnología, es que el confinamiento se mantiene durante un corto periodo de tiempo.
- **Confinamiento magnético:** consiste en el uso de campos magnéticos que aprovechan la carga que tienen las partículas que forman el plasma. Este método obtiene mayores tiempos de confinamiento del plasma que el confinamiento inercial. De modo que, los reactores que existen hoy en día se basan en esta tecnología: tokamak y stellarator.

### 1.2.3.2 Reactores

En el tokamak (Figura 1-12), se produce un campo magnético en posición toroidal, pero debido a que no existe una total homogeneidad en el mismo (existe una separación de partículas debido a la diferencia de carga), un plasma confinado únicamente por un campo toroidal resultaría inestable. Por este motivo, se requiere un campo magnético poloidal (flechas verdes verticales) adicional (unas diez veces más débil) (Figura 1-11). Para implementarlo, habitualmente, se induce un campo eléctrico (flechas rojas) con un transformador. De este modo, la combinación resultante de ambos, crea una curva tridimensional en forma de hélice (flechas negras), en la que el plasma se halla altamente confinado [42, 33].

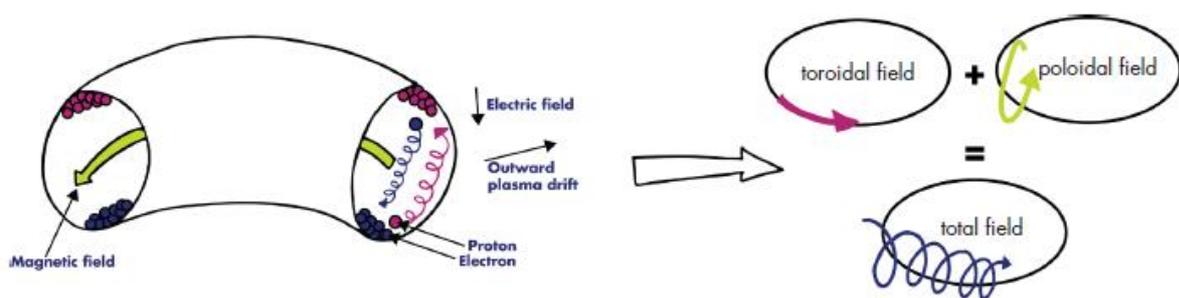


Figura 1-11: Diagrama de heterogeneidad de partículas usando solo un campo toroidal (izquierda) y solución para conseguir la homogeneidad usando superposición de campos (derecha). Fuente: [41]

En el caso del stellarator, la forma helicoidal se consigue sin el uso de un transformador, retorciendo los imanes (Figura 1-12).

Ambos reactores presentan sus ventajas. En el caso de los tokamak, el plasma contenido se mantiene caliente de manera más eficiente, sin embargo, los stellarator consiguen una mayor estabilidad [42].

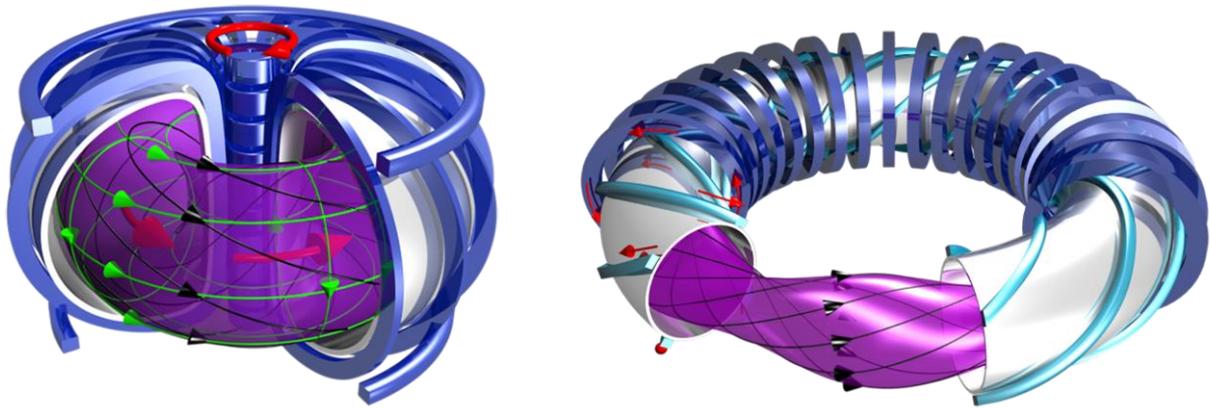


Figura 1-12: Reactores tokamak (izquierda) y stellarator (derecha). Fuente: [42]

Por otro lado, al no poseer una fuerza de atracción tal como la gravitatoria (de un cuerpo de inmensa masa como es el sol) en el plano terrestre, para lograr un óptimo confinamiento del plasma, se necesitan alcanzar unos 100 millones de grados centígrados. Actualmente, los sistemas de energía externos resultan obligatorios para mantener la temperatura del plasma, pues, en los reactores, el único calor que se genera es el debido a la Ley de Ohm, pero resulta muy ineficiente. Entre los procedimientos de calentamiento del plasma, se encuentran [33, 35, 42]:

- **Inyector de haz neutro (NBI):** consiste en inyectar una corriente de partículas ionizadas en forma de gas, a una velocidad paralela a la corriente del plasma. Estos iones son acelerados gracias a un campo electrostático y, al alcanzar la energía cinética deseada, se neutralizan y son introducidos en la corriente del plasma. La neutralización resulta de suma importancia para respetar la neutralidad del plasma y para no verse obstaculizado por el confinamiento magnético. (Figura 1-13)

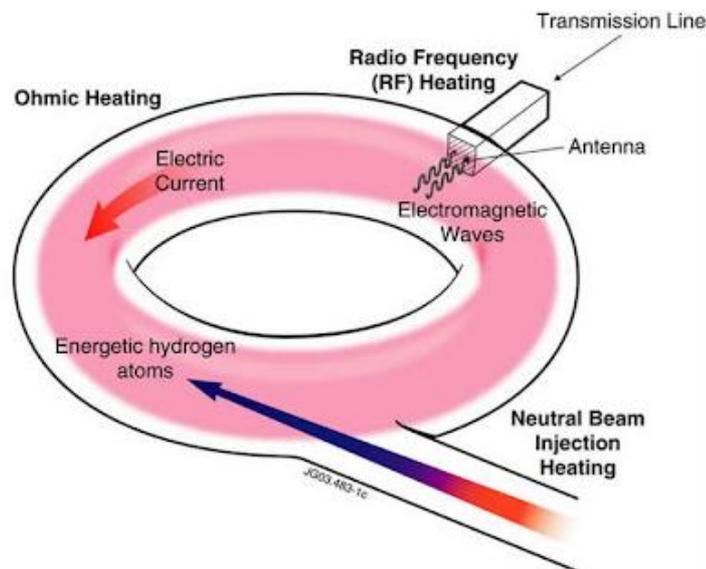


Figura 1-13: Representación esquemática de un NBI. Fuente: [45]

- **Calentamiento por radiofrecuencia:** se trata de calentamiento mediante microondas, de modo que, una onda de radiofrecuencia interactúa con las partículas del plasma. Dichas ondas, según su frecuencia pueden afectar a los iones, electrones, o a los dos. Según las partículas afectadas, se encuentra la *Ion Cyclotron Radiofrequency Heating (ICRH)*, *Electron Cyclotron Radiofrequency Heating (ECRH)* y *Lower Hybrid Current Drive (LHCD)*

### 1.2.3.3 Pérdidas de iones rápidos

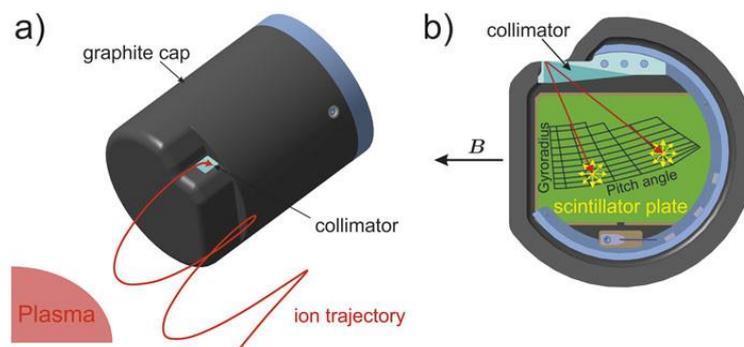
Según los sistemas de calentamiento del plasma comentados previamente, se observa que el calentamiento a menudo se lleva a cabo a través de la transferencia de energía por parte de iones excitados. Estos iones son los llamados “iones rápidos”, pues su velocidad es mayor a la del resto de partículas del plasma. Desafortunadamente, el confinamiento puede llegar a romperse a través de varios mecanismos [33, 35]:

- **Pérdidas por colisiones con iones del plasma:** se da cuando los iones rápidos han ido perdiendo velocidad debido a los choques con electrones (partículas que circulan con mayor velocidad en el plasma), y estos pasan a chocar con los iones, que, al poseer una masa superior, pueden cambiar la trayectoria de dichos iones rápidos, produciendo su salida del confinamiento.
- **Pérdidas por asimetría del campo magnético:** debido al número finito de bobinas encargadas de crear un campo magnético toroidal, las partículas se verán afectadas por distintas fuerzas de atracción en distintos puntos del reactor. Esta heterogeneidad puede producir cambios en las órbitas de los iones.
- **Pérdidas debidas a efectos magnetohidrodinámicos (MHD):** ocurren cuando las inestabilidades magnetohidrodinámicas que se dan en el plasma interactúan con las partículas. Estas inestabilidades son provocadas por gradientes de presión y de corriente y su efecto principalmente es la modificación de las líneas de campo presentes en el plasma.

### 1.2.3.4 Detectores de pérdidas

Como se ha explicado en el apartado anterior, existen varios mecanismos de pérdidas, las cuales resultan indeseables para el correcto funcionamiento de los reactores y su eficiencia. Es por este motivo por el que surge la necesidad de estudiar estas pérdidas. Este análisis se realiza por medio del Detector de Pérdidas de Iones Rápidos o Fast Ion Loss Detector (FILD). Estos dispositivos se basan en el uso de materiales centelladores (véase capítulo 2), y tienen como principal objetivo detectar el tipo de partícula que está saliendo del confinamiento, su localización espacial en el reactor y la órbita que se encontraba describiendo (a partir de información obtenida sobre la distribución angular de dichas partículas) [33, 35].

El funcionamiento del FILD es el siguiente: en primer lugar, el ion pasa a través de un pequeño agujero y atraviesa un colimador, hasta finalmente incidir sobre una placa que contiene el material centellador. Al producirse dicha interacción, el material centellador emite radiación electromagnética en el espectro visible (explicado detalladamente en ), la cual proporciona información acerca del espacio de velocidades de la partícula. Por último, este patrón de luz es llevado hasta una cámara (CCD) y finalmente a un conjunto de fotomultiplicadores (PMT). La cámara CCD se encarga de estudiar el flujo de fotones, mientras que el PMT proporciona información sobre la resolución temporal [33, 35].



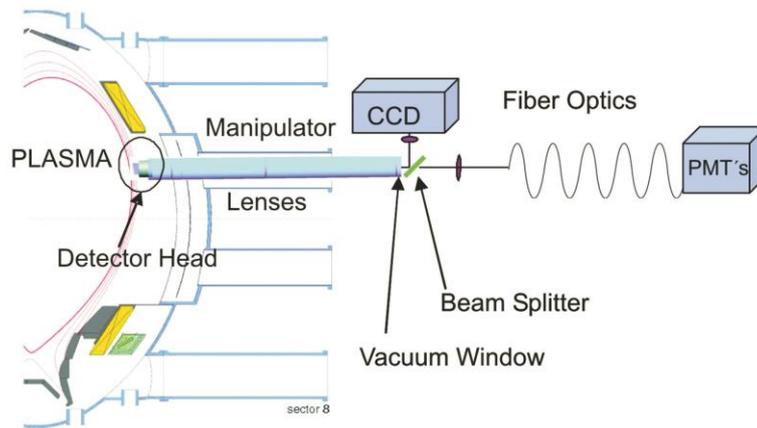


Figura 1-14: Detectores FILD. Fuente: [44, 43]

## 2 CENTELLADORES

Como bien se ha descrito en el apartado anterior sobre los detectores de pérdida de iones rápidos, uno de los elementos imprescindibles es el material centellador. Estos materiales tienen como característica principal la emisión de luz al recibir energía por una fuente externa, en este caso, los iones. A esta habilidad se la conoce como luminiscencia [31].

Varios procesos pueden causar este fenómeno, como una reacción química, calentamiento, descargas eléctricas, etc. Dependiendo de la fuente de excitación que lo provoque, recibe una nomenclatura diferente. En el caso de los centelladores usados en el detector, la luminiscencia es producida por el impacto de los iones, por ello, recibe el nombre de ionoluminiscencia [31].

### 2.1 Mecanismos de emisión

El proceso de luminiscencia viene definido gracias a la teoría de bandas de los materiales semiconductores (Figura 2-1). Esta establece que existen niveles de energía discretos: la banda de conducción (nivel más alto de energía), y la banda de valencia (más bajo). El espacio que existe entre estos niveles, es conocido como “banda prohibida” o “band gap” [30, 33, 35].

Cuando un centellador es impactado por iones, los electrones de este material consiguen la energía suficiente para pasar a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia de donde se ha desprendido. Seguidamente, una vez que los electrones intenten volver a la banda de valencia de su estado inicial, pueden quedar atrapados por “trampas” que actúan como niveles intermedios de energía (Figura 2-1). Pueden ser trampas intrínsecas (defectos estructurales) y/o trampas extrínsecas (provocadas por impurezas). Es en este punto, donde la energía desprendida con una longitud de onda determinada (al volver a un estado menos energético), cuando se produce luminiscencia. Por este motivo, a menudo los materiales centelladores se dopan para incrementar el número de impurezas, de modo que se creen más trampas y así, exista una mayor luminiscencia [30, 33, 35]. Ejemplo de dopante es el europio, que será el elemento elegido en el proceso experimental (véase Capítulo 3).

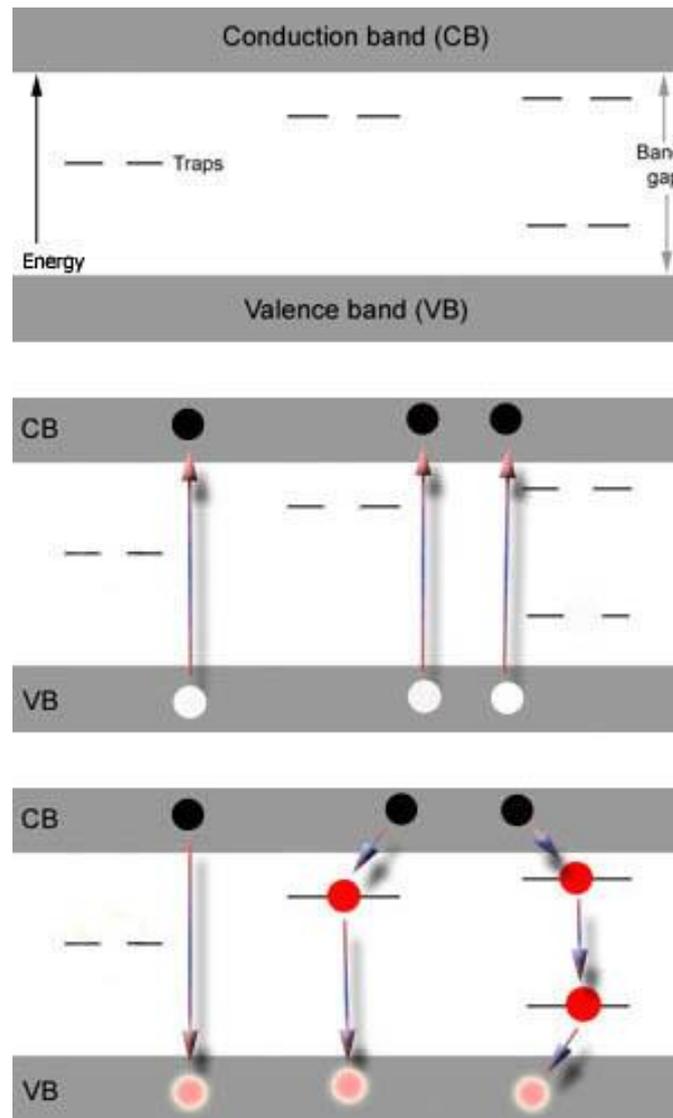


Figura 2-1: Esquema del proceso de luminiscencia con la teoría de bandas. Fuente: [30]

## 2.2 Requisitos de los centelladores

Además de la propiedad de luminiscencia, los centelladores deben reunir ciertos requisitos para la optimización y eficacia de los detectores de pérdidas en el plasma. Estos son [33, 34]:

- **Alta eficiencia de centelleo:** se busca que el material logre convertir gran cantidad de la energía que recibe en luz. Esto va a depender del origen de la fuente que lo irradia y el tipo de ion que impacta, así como la composición del material centellador y su espesor.
- **Alta linealidad:** la cantidad de fotones o luz generada debe ser proporcional a la energía depositada.
- **Tiempo de decaimiento breve:** entendiéndose como tal al tiempo que tardan los electrones en dejar de estar excitados. Este parámetro varía con la temperatura.
- **Alta resistencia a la temperatura:** ya que varios aspectos varían con la temperatura, como la cantidad de luz emitida y el tiempo de decaimiento (ambos empeoran con el aumento de la temperatura), estos materiales deben permanecer lo más inalterados posible debido a las altas temperaturas que se esperan en los reactores de fusión.

- **Versatilidad de fabricación:** Debe poder fabricarse en distintos tamaños sin que sus propiedades ópticas varíen.
- **Transparente a su propia radiación.**

## 2.3 Centelladores comerciales

Como se ha estudiado en el punto anterior, se pretende usar un material centellador que cumpla con todas las especificaciones expuestas. Sin embargo, como es de entender, no existe ningún material que cumpla cada punto a la perfección. Por ello, cada material centellador usado hoy en día en aplicaciones de FILD, presentan ventajas e inconvenientes diferentes [34].

En concreto, los centelladores se dividen en dos principales grupos: orgánicos e inorgánicos. Los primeros ofrecen un tiempo de decaimiento muy cortos, mientras que los segundos garantizan una gran emisión de fotones visibles.

En la tabla 2-1 se muestran las propiedades de longitud de onda ( $\lambda$ ), tiempo de decaimiento ( $\tau$ ) y densidad ( $\rho$ ) de distintos centelladores inorgánicos comerciales:

| Nombre                 | Fórmula   | $\lambda$ (nm) | $\tau$ (ns) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------------------|---|----------------|-------------|-----------------------------|
| Más usados actualmente |   |                |             |                             |
| TG-Green               | SrGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub> :Eu                              | 530            | 540         | 3.65                        |
| YAG                    | Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce                | 535            | 300         | 4.55                        |
| ZnS                    | ZnS:Ag  | 450            | 200         | 4.09                        |
| Formados por Ytrio     |   |                |             |                             |
| YAP                    | YAlO <sub>3</sub> :Ce   | 370            | 27          | 5.37                        |
| YAGG                   | (Y,Ga) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce           | 550            | 550         | 5.28                        |
| YAGGd                  | (Y,Gd) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce           | 570            | 106         | 4.69                        |
| Formados por Lu        |   |                |             |                             |
| LuAG                   | Lu <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce               | 540            | 71          | 6.7                         |
| LuAP                   | LuAlO <sub>3</sub> :Ce  | 365            | 2500        | 8.54                        |
| LuSiO                  | Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce                              | 420            | 40          | 7.4                         |
| Silicatos              |   |                |             |                             |
| $\beta$ -sialon        | Al <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>4</sub> :Eu | 530            | 912         | 4.01                        |
| Otros                  |   |                |             |                             |
| ZnO                    | ZnO:Ga  | 500            | 15          | 5.63                        |
| CaWO                   | CaWO <sub>4</sub>   | 430            | 8000        | 6.1                         |
| GOS                    | Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb                               | 545            | 600         | 7.34                        |

Tabla 2-1: Propiedades de centelladores comerciales. Fuente: [33]

De entre todos ellos, destaca el conocido como TG-Green como el más utilizado, pues sus características superan a las de otros materiales. Principalmente, el TG-Green, con fórmula SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu, ha sido hasta la fecha el material más empleado en los detectores FILD. En cambio, al contrario de lo que cabría esperar, ha sido descatalogado de muchas empresas dedicadas a su venta [33]. El motivo es que el TG-Green principalmente ha sido empleado en aplicaciones como LEDs [32]. Es por esta razón, por la que resulta interesante estudiar la síntesis de este material.

## 2.4 Síntesis

En el apartado anterior se argumentó el interés de estudio de la síntesis del material centellador TG-Green. Para este proceso, cabe señalar que existen numerosos caminos usando diferentes reactivos y diferentes técnicas para hacerlos reaccionar, llegando todos a un mismo resultado. En esta sección van a verse varias de las opciones usadas frecuentemente, así como la elegida en la parte experimental de este trabajo, cuyo

desarrollo se verá en el apartado siguiente.

### 2.4.1 Opciones de síntesis

- **Síntesis en estado sólido con horno**

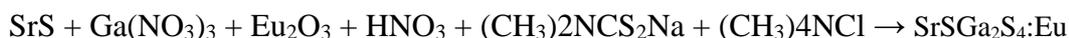
Generalmente, el tiogalato SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, ha sido sintetizado por medio sólido con los reactivos SrCO<sub>3</sub> y Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en una atmósfera de H<sub>2</sub>S. El principal inconveniente de este procedimiento, es la alta toxicidad del gas de sulfuro de hidrógeno. Por este motivo, se han ido buscando alternativas usando otros gases (o ninguno) en la atmósfera de la reacción, o utilizando también otros reactivos, de modo que estos contengan azufre en su composición [46]. La reacción propuesta es:



El procedimiento seguido en este caso es un primer mezclado de las sustancias (sin ser necesariamente exhaustivo) y su posterior calentamiento a temperaturas entre 550°C y 950°C. Siendo la temperatura de calentamiento óptima a 850°C [46].

- **Síntesis en estado de disolución con molino de bolas y horno**

En este segundo recurso propuesto, donde no es necesario el uso de ningún gas a modo de atmósfera que envuelva la reacción, la reacción empleada es [47]:



Los primeros pasos de este proceso consisten en la obtención de galio y europio complejos. Para el europio complejo, por un lado se disuelve Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en HNO<sub>3</sub> caliente, obteniendo nitrato de europio [Eu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] y, tras esto, se hace reaccionar el nitrato con (CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>NCl. En el caso de galio complejo, se hace reaccionar Ga(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> con (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NCS<sub>2</sub>Na. [47]

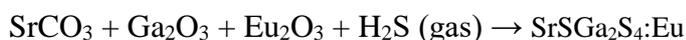
La siguiente fase corresponde a la molienda usando un molino de bolas. En él se introducen el galio y europio complejos obtenidos, junto con SrS y S. Toda esta mezcla, añadiendo etanol, se deja moliendo durante 20 horas [47].

A continuación, la mezcla se deja secar en el horno a 1000°C durante 5 horas. Por último, una vez seco el producto, se realiza una segunda molienda para romper las aglomeraciones formadas [47].

Además, como tratamiento opcional, se puede realizar un recalentamiento a bajas temperaturas para mejorar propiedades [47].

- **Síntesis en estado sólido con molienda y horno**

Tal y como se expone en la primera opción, a menudo se hacen reaccionar los reactivos embebidos en una atmósfera de H<sub>2</sub>S, la cual proporciona el azufre necesario para la formación del TG-Green. En este caso, se propone esa alternativa en último puesto, para que, al igual que las anteriores, pueda servir como guía o referencia. La reacción es la que sigue [48]:



En este caso, se efectúa una molienda de los reactivos sólidos, pero, en esta ocasión, a diferencia de la segunda opción mostrada, se realiza en un mortero. Lo siguiente, es el calentamiento en un horno a una temperatura entre 600°C y 900°C durante 2 horas, introduciendo una corriente de H<sub>2</sub>S. Un detalle a destacar

en esta etapa es que cuando la temperatura está por debajo de los 500°C (en las fases inicial y final), el H<sub>2</sub>S es sustituido por Argón para prevenir la oxidación de la mezcla [48].

Finalmente, el producto resultante se muele de nuevo. Hay que puntualizar que en este tipo de reacciones se suele emplear el uso de “flux”, es decir, sustancias que se añaden para disminuir la temperatura de reacción y calcinación [48]. Ejemplos de flux son Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KBr, KI, o NaCl [47].

## 2.4.2 Mecanosíntesis

Como se estudiará con mayor profundidad en el próximo capítulo, el procedimiento experimental llevado a cabo hace uso de la mecano-síntesis como mecanismo para producir la energía necesaria para que pueda darse la reacción. Este tratamiento mecánico, la mecano-síntesis o mecano-química, es una técnica de procesado a temperatura ambiente, generalmente en seco, de materiales en forma de polvo. Gracias al aporte de energía mecánica que tiene lugar en el proceso, se obtienen productos homogéneos a partir de sus reactivos [49].

Habitualmente esta técnica se realiza mediante molinos de bolas donde la energía se transfiere a los reactivos por medio de molienda a través de fuerzas de impacto y/o cizallas. En este caso, el molino de bolas empleado es el denominado “molino planetario” [49] (véase apartado 3.1).

# 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el apartado que sigue, se procede a describir el proceso de síntesis llevado a cabo, así como las técnicas y materiales empleados. Cabe destacar que el proceso se ha realizado en dos fases consecutivas. La primera, se trata de la síntesis del tiogalato necesario para la formación de TG-Green; y la segunda, el dopaje con Europio, hasta formar el material centellador mencionado.

## 3.1 Material utilizado

1. **Reactivos:** SrS, Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, EuF<sub>3</sub>
2. **Molino planetario:** es una máquina centrífuga basada en la mecano-síntesis en la que los recipientes que contienen los reactivos y los medios de molienda giran alrededor de su propio eje (rotación) y alrededor del eje principal de la base (revolución), como se muestra en la Figura 3-1.

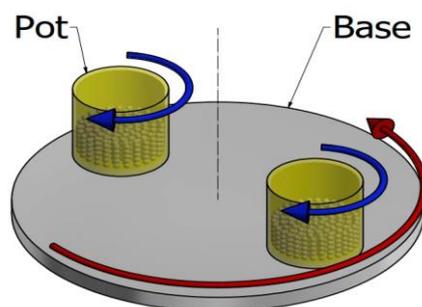


Figura 3-1: Representación del funcionamiento (giro) de un molino planetario. Fuente: [28]

3. **Balanza de precisión:** dispositivo para el correcto pesaje de los reactivos.
4. **Sistema de suministro de argón:** se trata de una instalación formada por el depósito de gas argón comprimido y una serie de conductos y válvulas que permiten o cierran su paso. Se usará para introducir el gas argón en el interior del jarro donde van los reactivos.

5. **Máquina de ultrasonidos:** utiliza ondas de ultrasonido para homogeneizar dispersando los reactivos (generalmente en estado sólido-líquido).
6. **Agitador magnético:** se trata de una herramienta para agitar y mezclar medios líquidos. La máquina posee un accionamiento magnético que, al introducir un imán en el seno del líquido, hace que este gire.

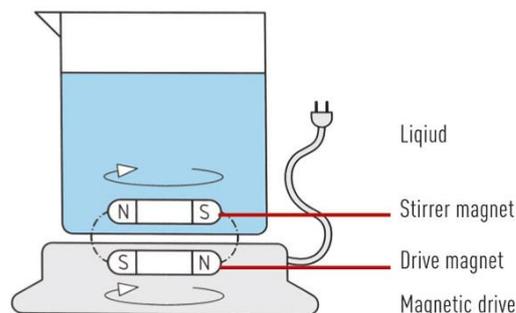


Figura 3-2: Esquema del sistema de agitación magnética en un agitador. Fuente: [52]

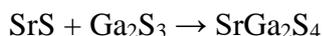
7. **Baño de arena:** este equipo realiza un calentamiento uniforme a alta temperatura (>250°C) [29].
8. **Horno:** herramienta para el calentamiento a muy altas temperaturas (mayores temperaturas que el baño de arena).

Cabe destacar que las herramientas 5, 6, 7 y 8 solo han sido utilizadas en el proceso de dopaje en húmedo, como se verá en apartados posteriores.

## 3.2 Síntesis de Tiogalato

### 3.2.1 Proceso

En vista de los diferentes caminos para la síntesis del TG-Green establecidos en el apartado 2.4.1, se quiso intentar otra vía usando los reactivos de la primera opción, junto con el método de molienda a través del molino de bolas de la segunda. La principal idea del proceso fue buscar siempre la máxima simplicidad. Por ello, se optó por sintetizar el tiogalato sin dopante. De modo que, sin usar aún europio, en el proceso que se propone, la reacción que tiene lugar es la siguiente:



En cuanto al proceso, de acuerdo a la Figura 3-3, tras realizar la medición de los reactivos y elección adecuada de los parámetros, se procede a la molienda en el molino planetario durante 4 horas como tiempo total. Además, entre cada hora, se procederá a recoger una muestra para posteriormente analizar los resultados de cada una, gracias al análisis con difracción de rayos X (DRX). Hay que destacar que, para evitar la descomposición y oxidación de los materiales que intervienen en la reacción, previamente a cada molienda, se introduce en la cámara del jarro del molino una atmósfera de argón (gas inerte).



Figura 3-3: Proceso desarrollado en la opción elegida para el procedimiento experimental

Para calcular la cantidad de reactivos necesaria, se realizan los siguientes cálculos:

Sabiendo las masas moleculares (MM):

- $MM(\text{SrGa}_2\text{S}_4)=357.67 \text{ g/mol}$
- $MM(\text{SrS})=120.27 \text{ g/mol}$
- $MM(\text{Ga}_2\text{S}_3)=237.396 \text{ g/mol}$

Se calculan las cantidades para 100g de producto; siendo n: número de moles y m: masa

En 100g de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  hay  $100/357.67=0.28$  moles

$\text{SrS}$ :  $0.28 \text{ mol} * 120.27 \text{ g/mol} = 33.6756 \text{ g}$

$\text{Ga}_2\text{S}_3$ :  $0.28 \text{ mol} * 237.396 \text{ g/mol} = 66.47 \text{ g}$

En términos proporcionales, para cualquier cantidad de producto, es necesario un 33% de  $\text{SrS}$  y un 66% de  $\text{Ga}_2\text{S}_3$  sobre esa cantidad.

Para la realización del procedimiento de síntesis en el laboratorio, se estimó que 1.5g de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  como resultado de la molienda sería un buen punto de partida. De modo que, se requiere una cantidad de 0.5g de  $\text{SrS}$  y 1g de  $\text{Ga}_2\text{S}_3$ .

Por otro lado, con los parámetros hay que buscar la relación idónea entre los mismos, pues todos son dependientes unos de otros:

- **Temperatura:** temperatura ambiente
- **Volumen de llenado:** su rango óptimo es de 1/3 - 1/2 del tarro
- **Tiempo de molienda:** 4 horas totales
- **Relación peso bola/peso de reactivos (BPR):** se recomienda una relación entre 5-50; donde cada bola pesa 4g

$30 = \text{peso bolas}/1.5 \rightarrow \text{peso bolas} = 45\text{g}; \text{número de bolas} = 45/4 = 11 \text{ bolas}$

$40 = \text{peso bolas}/1.5 \rightarrow \text{peso bolas} = 60 \text{ g}; \text{número de bolas} = 60/4 = 15 \text{ bolas}$

Usando un BPR de 30, las bolas ocupan aproximadamente la mitad del volumen del jarro y con un BPR de 40 se sigue cumpliendo el rango óptimo de llenado de volumen. Se decide escoger la opción de BPR=40 al ser la más energética.

- **Velocidad de revolución:** 400 rpm

El último paso previo a la molienda en el molino planetario es crear una atmósfera de argón en el interior del jarro. Para ello, se introduce el mismo (cerrado) en una bolsa de cierre hermético dejándola parcialmente

abierta. Es por la abertura donde se deja pasar el argón al mismo tiempo que el aire atmosférico va saliendo. Al haber transcurrido unos minutos, se deja la tapa del jarro abierta ligeramente para que el argón pueda acceder a su interior. Finalmente, después de unos 30 minutos aproximadamente, se vuelve a cerrar la tapa del jarro y la bolsa hermética por completo y, sin sacar el jarro de la bolsa, se sella todo con cinta adhesiva.



Figura 3-4: Proceso de llenado de argón en el jarro del molino

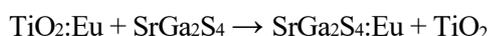
### 3.3 Dopaje del tiogalato para formar TG-Green

En esta sección se van a estudiar dos procesos distintos de dopaje del tiogalato. En el primero se usa como fuente de europio el  $\text{EuTiO}_2$ , donde este elemento se encuentra en su estado de oxidación II. En cambio, a pesar de que normalmente el TG-Green utilizado contiene el Eu en este estado de oxidación, en el segundo camino seguido, se quiso probar con  $\text{Eu}^{+3}$  para ver si se obtenían los mismos resultados.

Otro punto a destacar es que, aunque resulta inmediato pensar que el procedimiento de partida debería haber sido dopar el tiogalato con Eu (II) (en estado puro), debido a problemas de petición y envío del producto no se ha tenido acceso al mismo.

#### 3.3.1 Óxido de titanio

En esta primera opción se mezclaron 0.5g de  $\text{EuTiO}_2$  junto con 0.5g de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  formado previamente en el laboratorio (llevando a cabo el proceso anteriormente descrito). Esta mezcla se introdujo en el molino de bolas (introduciendo una atmósfera de Ar al igual que en la formación del tiogalato) durante 4 horas, tomando muestras a las 2, 3 y 4 horas de molienda. La reacción producida resulta:



#### 3.3.2 Fluoruro de Europio

Para este segundo procedimiento, se empleó un dopaje en húmedo. Previamente, se calcula la cantidad de  $\text{EuF}_3$  necesaria para reaccionar con 1g de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  en una proporción de 4% molar.

$$4\% \text{ molar} = x \text{ moles de Eu} / 1 \text{ mol de SrGa}_2\text{S}_4 \rightarrow x = 0.04 \text{ moles de Eu}$$

$$\text{Masa Eu} = 0.04 \text{ moles} * \text{MM}(\text{EuF}_3) \rightarrow \text{Masa Eu} = 8.358 \text{ g EuF}_3 \text{ (por cada mol de SrGa}_2\text{S}_4)$$

Una vez conocido el valor por mol de tiogalato (y sabiendo que 1g de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  son  $1/357.67 = 0.0028$  moles):

$$\text{Masa EuF}_3 = 8.358 * 0.0028 = 0.0234\text{g}$$

A continuación, se mezclan etanol y agua en la misma proporción (1:1). En esta mezcla se diluyen por separado: 1g de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  con 25ml de etanol y agua, y los 0.0233g de  $\text{EuF}_3$  con otros 25ml (de etanol y agua

en proporción 1:1). Seguidamente, se dejan 10 minutos cada uno en la máquina de ultrasonidos para homogeneizar ambas mezclas (Figura 3-4).



Figura 3-4: máquina de ultrasonidos dispersando los reactivos de ambas mezclas

Una vez transcurrido este tiempo, se mezcla el contenido de los 2 recipientes y 10 ml de la mezcla anterior de agua y etanol (en proporción 1:1) y la mezcla se deja durante 4 horas en el agitador magnético (Figura 3-5).



Figura 3-5: Mezclado de los componentes en el agitador magnético

Lo siguiente es hacer que el líquido de la disolución se evapore, y para ello se deja reposar en el baño de arena (Figura 3-6), a 110°C hasta que esto ocurra. El proceso duró aproximadamente 1 hora en eliminar toda la humedad.



Figura 3-6: Secado de la mezcla en el dispositivo de baño de arena

El último paso consiste en introducir el resultado en el horno durante 8 horas a una temperatura de 550°C. (Figura 3-7).



Figura 3-7: Horneado del material seco en el horno

### 3.3.3 Reducción de Europio

En relación al uso habitual de  $\text{Eu}^{+2}$  en lugar de  $\text{Eu}^{+3}$  se propuso obtener la reducción de europio a partir de diferentes procesos (Figura 3-8).

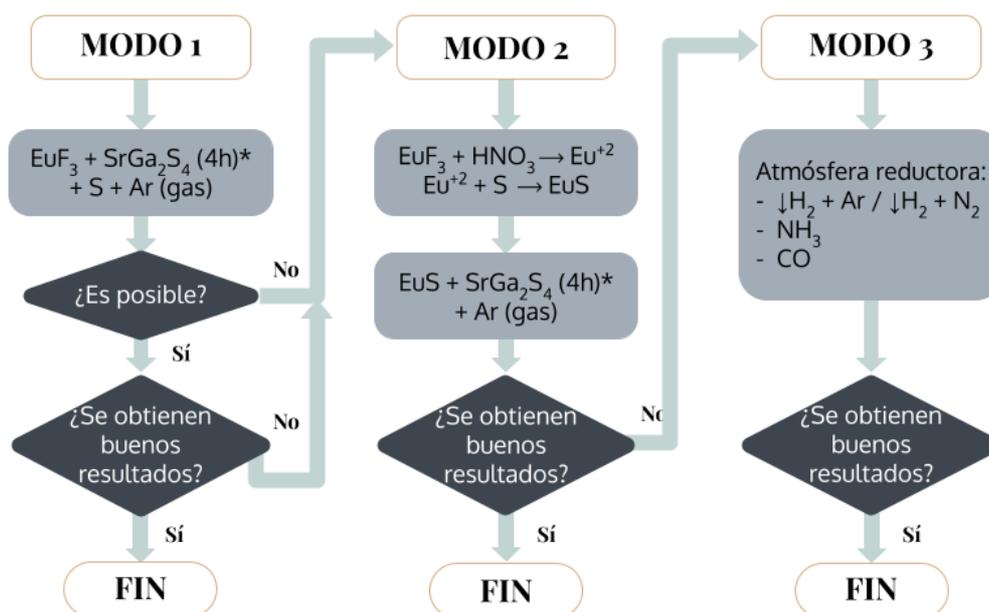


Figura 3-8: Diagrama de flujo para el proceso de reducción del europio desde el estado de oxidación III al estado II

El “MODO 1” consiste en introducir en el molino de bolas  $\text{EuF}_3$  junto con  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  y  $\text{S}$ , actuando este último como elemento reductor. Todo ello envuelto en una atmósfera de argón. En un primer estudio de esta opción, se evaluó que podría resultar peligroso hacer reaccionar el flúor dentro del molino, pues es un elemento altamente reactivo. Además, en el laboratorio no se poseían las condiciones operacionales necesarias para emplear el procedimiento de manera segura.

Por ello, en el “MODO 2” se pretendía conseguir la reducción de europio usando  $\text{HNO}_3$ . Una vez alcanzado este objetivo, habría que añadir azufre al  $\text{Eu}^{+2}$  hasta lograr  $\text{EuS}$ . De esta manera, ya se podrían mezclar el tiogalato y  $\text{EuS}$  en el molino sin lugar a posibles riesgos.

El último de los caminos a seguir (MODO 3), consistiría en usar una atmósfera reductora como  $\text{H}_2$ , teniendo especial cuidado con el contenido del mismo, pues en el molino puede resultar explosivo, u otras opciones como  $\text{NH}_3$  o  $\text{CO}$ .

## 4 RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos para la síntesis del tiogalato y para el dopaje del mismo. Para la obtención de los mismos, las tecnologías empleadas han sido la difracción de rayos X (DRX) y pruebas de ionoluminiscencia, respectivamente.

### 4.1 Síntesis de tiogalato

#### 4.1.1 Difracción de rayos X

Es una técnica analítica que se utiliza principalmente para la identificación de fase de un material cristalino y puede proporcionar información sobre las dimensiones de la celda unitaria. El material analizado se muele finamente, se homogeneiza y se determina la composición aparente promedio [51].

El funcionamiento de esta herramienta consiste en un haz de rayos X que entra en contacto con el material con

un ángulo de incidencia  $\theta$ . Los rayos X se reflejan y se registra la intensidad con la que lo hacen. Cuando la geometría de los rayos X incidentes satisface la Ecuación de Bragg ( $n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$ ). Al observar el patrón de interferencia, se puede deducir la estructura interna del material cristalino [50,51].

#### 4.1.2 Difractogramas obtenidos

Para la correcta interpretación de los resultados obtenidos del procedimiento en el laboratorio, en primer lugar, se expone el espectro generado por un TG-Green commercial (Figura 4-1).

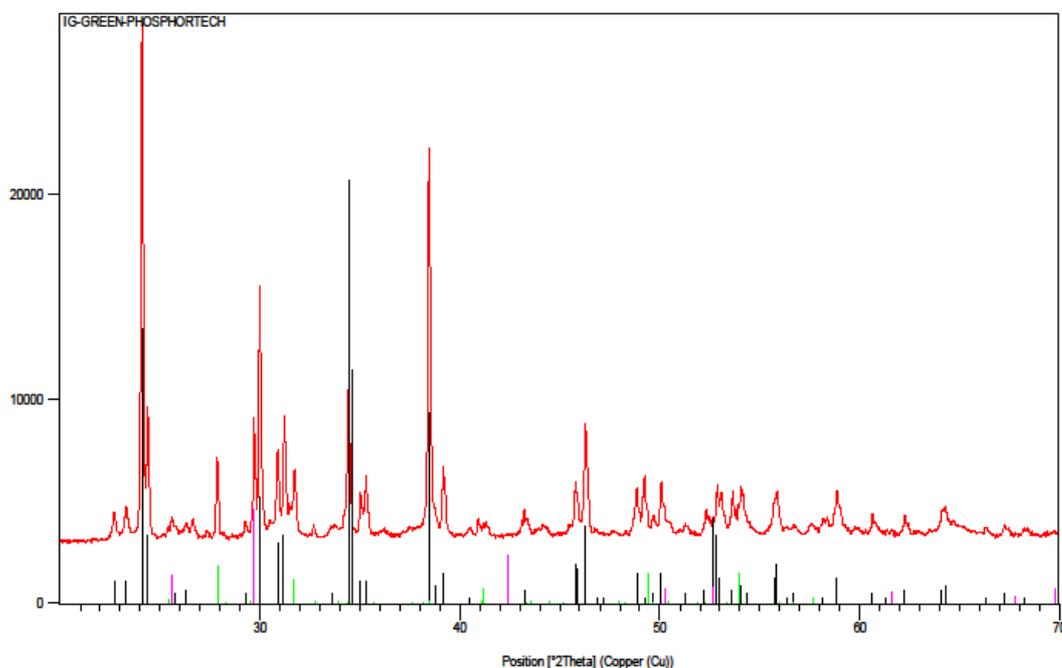


Figura 4-1: DRX de una muestra de TG-Green commercial

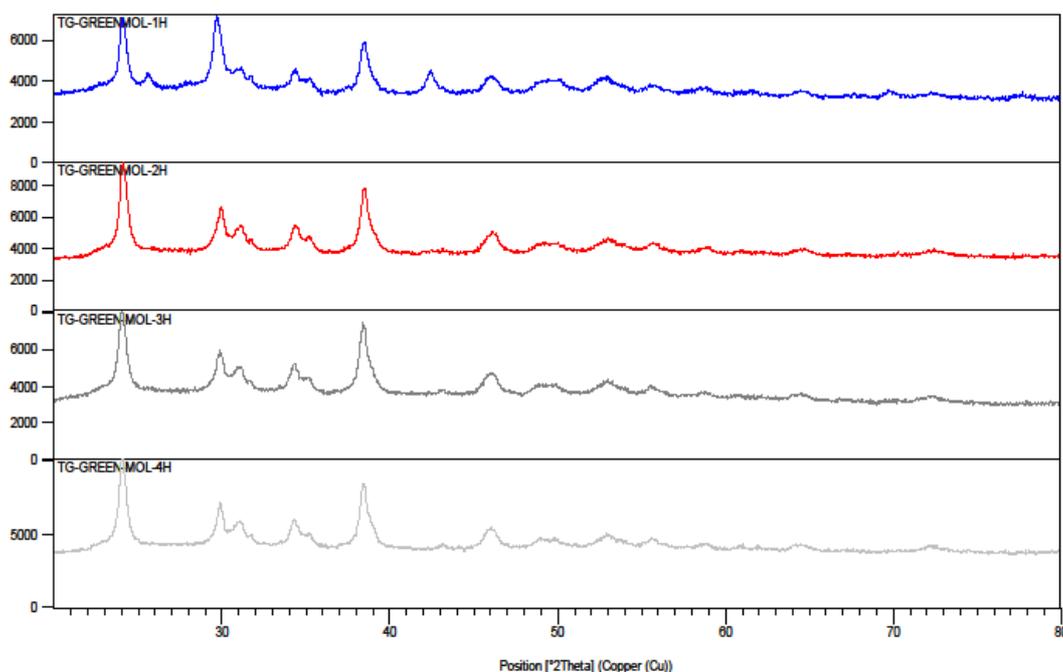


Figura 4-2: DRX de las muestras recogidas en la síntesis con 1h (azul), 2h (rojo), 3h (gris oscuro) y 4h (gris claro) de molienda

En una primera observación de los resultados obtenidos para distintos tiempos de molienda (Figura 4-2) se puede

destacar que existe una diferencia notable en los picos del espectro entre la primera y la segunda hora. Sin embargo, para 2, 3 y 4 horas, no se aprecia tanta distinción. En las figuras 4-3 y 4-4 se expone una vista de los espectros de 1h y 2h superpuestos y de 2h, 3h y 4h también superpuestos, respectivamente.

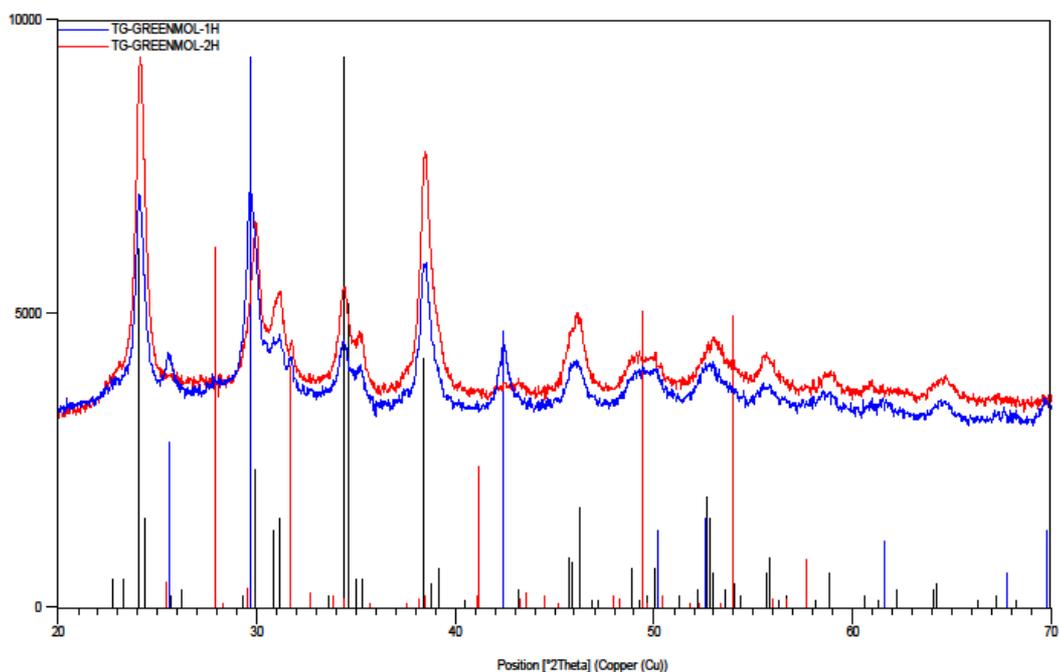


Figura 4-3: DRX comparativo entre muestras de 1h (azul) y 2h (rojo)

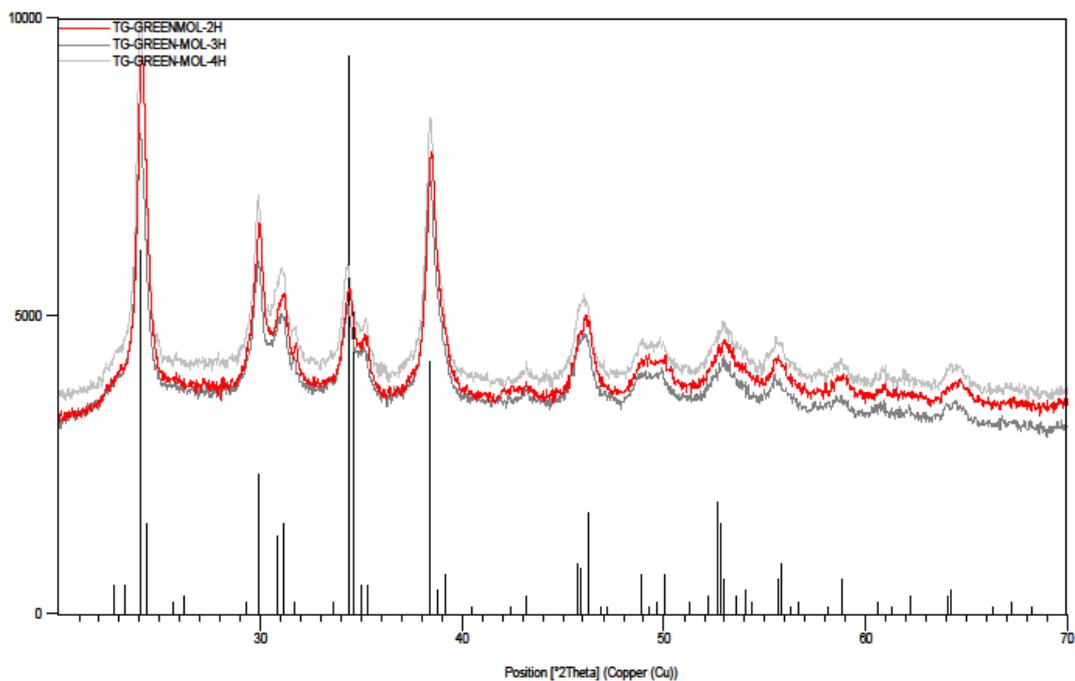


Figura 4-4: DRX comparativo entre muestras de 2h (rojo), 3h (gris oscuro) y 4h (gris claro)

De acuerdo a los DRX mostrados se puede confirmar que el tiogalato se forma completamente a partir de las 2

horas de molienda, pues los picos característicos de este material coinciden en los casos experimental y comercial.

## 4.2 Dopaje

Con respecto a los resultados del dopaje del tiogalato generado mediante mecano-síntesis, no fueron los esperados. Pues en la figura 4-5 se observa que desaparecen prácticamente los picos de  $\text{SrGa}_2\text{S}_4$  que indica que la molienda ha amorfizado esa fase.

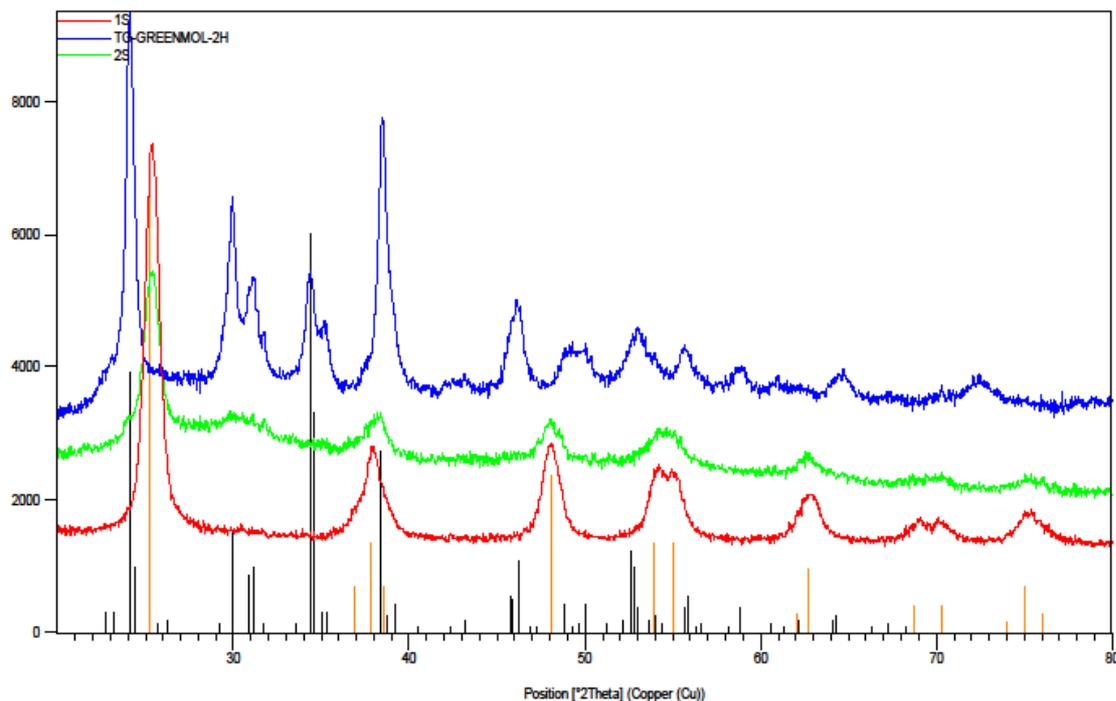


Figura 4-5: DRX comparativo entre el  $\text{TiO}_2:\text{Eu}$  (rojo), el tiogalato con molienda de 2h (azul) y la mezcla de ambos (verde)

Como se puede visualizar, no se han expuesto los resultados del dopaje en húmedo con  $\text{EuF}_3$ . Esto es debido a que el proceso de dopaje fue realizado con un tiogalato mal formado (el proceso de llenado de argón fue incompleto y la muestra se oxidó con el oxígeno que quedaba en el jarro).

## 5 CONCLUSIÓN

---

**T**ras los procedimientos experimentales llevados a cabo en base a los fundamentos teóricos expuestos, es remarcable el logro de haber obtenido la síntesis del tiogalato a través de un método sencillo, rápido y de bajo costo.

Por otro lado, el dopaje con europio en estado de oxidación III no ha resultado adecuado por medio de ningún procedimiento de los expuestos.

Como posibles avances en la materia en base a los resultados obtenidos en el dopaje habría que caracterizar el material con otras tecnologías; posiblemente con procesos más enérgicos se pueda conseguir la introducción del europio como agente dopante en el tiogalato.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nathanson, JA (9 de mayo de 2022). contaminación \_ Enciclopedia Britannica . <https://www.britannica.com/science/pollution-environment>
- [2] Hocking, M. B. (martin B. (2005). Handbook of chemical technology and pollution control (3a ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120887965500053>
- [3] Kadam, Vinod. (2018). Multifunctional Air Filtration for Respiratory Protection using Electrospun Nanofibre Membrane. [https://www.researchgate.net/publication/329672584\\_Multifunctional\\_Air\\_Filtration\\_for\\_Respiratory\\_Protection\\_using\\_Electrospun\\_Nanofibre\\_Membrane](https://www.researchgate.net/publication/329672584_Multifunctional_Air_Filtration_for_Respiratory_Protection_using_Electrospun_Nanofibre_Membrane)
- [4] Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. and Bezirtzoglou, E., 2020. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8.
- [5] Hannah Ritchie, Max Roser and Pablo Rosado (2020) - "CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- [6] World-nuclear.org. 2022. History of Nuclear Energy - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- [7] Právãlie, R. and Bandoc, G., 2018. Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications. *Journal of Environmental Management*, 209, pp.81-92.
- [8] Barbarino, M., 2020. A brief history of nuclear fusion. *Nature Physics*, [online] 16(9), pp.890-893. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41567-020-0940-7#citeas>
- [9] Sánchez, J., 2014. Nuclear fusion as a massive, clean, and inexhaustible energy source for the second half of the century: brief history, status, and perspective. *Energy Science & Engineering*, [online] 2(4), pp.165-176. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.43>
- [10] Brook, B., Alonso, A., Meneley, D., Misak, J., Bles, T. and van Erp, J., 2014. Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*, 1-2, pp.8-16.
- [11] Miller, W., 1993. Present and Future Nuclear Reactor Designs: Weighing the Advantages and Disadvantages of Nuclear Power with an Eye on Improving Safety and Meeting Future Needs. *Journal of Chemical Education*, [online] 70(2), p.109. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed070p109>
- [12] Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., 2022. Energy. [online] Our World in Data. Available at: <https://ourworldindata.org/nuclear-energy>
- [14] Toschi, R., 1997. Nuclear fusion, an energy source. *Fusion Engineering and Design*, 36(1), pp.1-8.

- [15] Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., 2022. Emissions by sector. [online] Our World in Data. Available at: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- [16] Ritchie, H. and Roser, M., 2022. Air Pollution. [online] Our World in Data. Available at: <https://ourworldindata.org/air-pollution>
- [17] Ritchie, H., 2022. What are the safest and cleanest sources of energy?. [online] Our World in Data. Available at: <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>
- [18] Atomic Heritage Foundation. 2022. Idaho Falls. [online] Available at: <https://www.atomicheritage.org/location/idaho-falls>
- [19] Mapio.net. 2022. Experimental Breeder Reactor 1. [online] Available at: <https://mapio.net/pic/p-17321460/>
- [20] Asme.org. 2022. Experimental Breeder Reactor I. [online] Available at: <https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/39-experimental-breeder-reactor-i>
- [21] Fisher, M., Constantin, A. and Liou, J., 2022. The Use of Nuclear Power Beyond Generating Electricity: Non-Electric Applications. [online] Iaea.org. Available at: <https://www.iaea.org/newscenter/news/the-use-of-nuclear-power-beyond-generating-electricity-non-electric-applications#:~:text=There%20are%20many%20applications%20beyond,refining%20and%20synthesis%20gas%20production>
- [22] World-nuclear.org. 2022. The Many Uses of Nuclear Technology - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/overview/the-many-uses-of-nuclear-technology.aspx>
- [23] World-nuclear.org. 2022. Radioisotopes in Industry | Industrial Uses of Radioisotopes - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-industry.aspx>
- [24] World-nuclear.org. 2022. Radioisotope uses for food and agriculture - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-food-agriculture.aspx>
- [25] World-nuclear.org. 2022. Radioisotope uses for consumer products - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-consumer-products.aspx>
- [26] World-nuclear.org. 2022. Nuclear-Powered Ships | Nuclear Submarines - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>
- [27] World-nuclear.org. 2022. Nuclear Reactors for Space - World Nuclear Association. [online] Available at: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx>
- [28] Camargo, I., Erbereli, R., Lovo, J. and Fortulan, C., 2019. Planetary Mill with Friction Wheels Transmission Aided by an Additional Degree of Freedom. *Machines*, 7(2), p.33.
- [29] “1.4H: Water, Sand, and Oil Baths.” Chemistry LibreTexts, 6 Oct. 2017 [online] Available at: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic\\_Chemistry/Organic\\_Chemistry\\_Lab\\_Techniques\\_\(Nichols\)/01%3A\\_General\\_Techniques/1.04%3A\\_Heating\\_and\\_Cooling\\_Methods/1.4H%3A\\_Water\\_Sand\\_and\\_Oil\\_Baths](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_Lab_Techniques_(Nichols)/01%3A_General_Techniques/1.04%3A_Heating_and_Cooling_Methods/1.4H%3A_Water_Sand_and_Oil_Baths)
- [30] “CLTheory.” Geochemical Instrumentation and Analysis, 10 Nov. 2016, [online] Available at: [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/CLTheory.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/CLTheory.html). Accessed 4 Jan. 2020
- [31] Obodovskiy, Ilya. “Luminescence.” *Radiation*, 2019, pp. 207–220, 10.1016/b978-0-444-63979-0.00012-4.
- [32] Xinmin, Zhang, et al. “Luminescent Properties of SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> :Eu<sup>2+</sup> and Its Application in Green-LEDs.” *Journal of Rare Earths*, vol. 25, no. 6, Dec. 2007, pp. 701–705, 10.1016/s1002-0721(08)60010-1.
- [33] Videla M. “Characterization of scintillators for ion detection diagnostics in nuclear fusion reactors”. Seville (Spain). 2021.

- [34] Fernández G. “Simulación de fotones ópticos en centelleadores inorgánicos: estudio de DETECT2000”. Seville (Spain).
- [35] Toledo J.J “Deposición y caracterización de materiales centelleadores para su utilización en el detector FILD”. Seville (Spain). 2018.
- [36] “Infographic: Fission vs. Fusion: What’s the Difference.” Energy.gov, 2020, [online] Available at: <https://www.energy.gov/ne/downloads/infographic-fission-vs-fusion-whats-difference>
- [37] Duke Energy. “Fission vs. Fusion – What’s the Difference?” Duke Energy | Nuclear Information Center, 27 May 2021, [online] Available at: <https://nuclear.duke-energy.com/2021/05/27/fission-vs-fusion-whats-the-difference-6843001>
- [38] “Nuclear Fusion vs Fission: What.” [www.twi-global.com](http://www.twi-global.com), [online] Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/nuclear-fusion-vs-fission#WhatAreTheKeyDifferences>
- [39] IAEA. “Fusion - Frequently Asked Questions | IAEA.” Iaea.org, 12 Oct. 2016, [online] Available at: <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion/faqs>
- [40] Barbarino, Matteo. “What Is Nuclear Fusion?” [www.iaea.org](http://www.iaea.org), 31 Mar. 2022, [online] Available at: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>
- [41] “ITER and Heating Systems in Tokamaks.” Thales Group, [online] Available at: <https://www.thalesgroup.com/en/iter-and-heating-systems-tokamaks>
- [42] “Magnetic Fusion Confinement with Tokamaks and Stellarators.” [www.iaea.org](http://www.iaea.org), 2 June 2021, [online] Available at: <https://www.iaea.org/bulletin/magnetic-fusion-confinement-with-tokamaks-and-stellarators>
- [43] Oyola, P., et al. “Implementation of Synthetic Fast-Ion Loss Detector and Imaging Heavy Ion Beam Probe Diagnostics in the 3D Hybrid Kinetic-MHD Code MEGA.” Review of Scientific Instruments, vol. 92, no. 4, 1 Apr. 2021, p. 043558, 10.1063/5.0043757
- [44] Rivero-Rodriguez, J. F., et al. “A Rotary and Reciprocating Scintillator Based Fast-Ion Loss Detector for the MAST-U Tokamak.” Review of Scientific Instruments, vol. 89, no. 10, Oct. 2018, p. 10I112, 10.1063/1.5039311.
- [45] “Heating the Plasma.” Heating the Plasma - Hi-Tech Hydrogen Plasma, [online] Available at: <https://plasmahydro.blogspot.com/2011/11/heating-plasma.html>
- [46] Na, Sang-Hee, et al. “Preparation and Photoluminescence of Green-Emitting Phosphors SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu.” Bulletin of the Korean Chemical Society, vol. 34, no. 12, 20 Dec. 2013, pp. 3919–3922, 10.5012/bkcs.2013.34.12.3919.
- [47] Jiang, Y.D, et al. “Synthesis and Properties of Green Phosphor SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup> for Field Emission Displays by an Environmentally Clean Technique.” Solid State Communications, vol. 113, no. 8, Jan. 2000, pp. 475–478, 10.1016/s0038-1098(99)00493-7.
- [48] Do, Young Rag, et al. “Preparation and Optical Properties of SrGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Eu Phosphor.” ChemInform, vol. 21, no. 3, 2010
- [49] Chicardi, E “Desarrollo de cermets basados en soluciones sólidas mediante procesos mecanoquímicos”. Seville (Spain). 2014.
- [50] “X-Ray Diffraction | Physics | Britannica.” Encyclopædia Britannica, 2019, [online] Available at: <https://www.britannica.com/science/X-ray-diffraction>
- [51] “X-Ray Powder Diffraction (XRD).” Techniques, 5 Apr. 2019, [online] Available at: [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/XRD.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html)
- [52] “Stirrer - Magnetic Stirring.” BOLA - Tubing, Stirrer Shafts, Magnetic Stirring Bars - Labware Made of PTFE, [online] Available at: <https://www.bola.de/en/technical-information/stirring-and-mixing/stirrer-magnetic-stirring/>

