



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

La cuarta R de la tecnología nuclear:
Reprocesado

Autor: Marta Velasco Estévez

Director: B. Yolanda Moratilla Soria

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

La cuarta R de la tecnología nuclear: Reprocesado

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Marta Velasco Estévez

Fecha: 19/08/2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: B. Yolanda Moratilla Soria

Fecha: 19/08/2021



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

La cuarta R de la tecnología nuclear:
Reprocesado

Autor: Marta Velasco Estévez

Director: B. Yolanda Moratilla Soria

Madrid

LA CUARTA R DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR: REPROCESADO

Autor: Velasco Estévez, Marta.

Director: Moratilla Soria, B. Yolanda.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Con la revolución industrial, la carbonización inició los problemas relacionados con el efecto invernadero actual y al calentamiento global, uno de los principales problemas de la sociedad actual. Debido a esta crisis climática emergente, los países están tratando de reconducir la sociedad a un sistema de descarbonización. La energía nuclear comenzó en la década de 1950, constituyendo una potente tecnología sin emisiones de CO₂ que podía contribuir a la descarbonización del sistema sin comprometer el suministro eléctrico y sin salvedades económicas. Sin embargo, la falta de experiencia en materia de gestión de residuos radiactivos y los dos accidentes nucleares de Chernóbil y Fukushima han hecho que la energía nuclear tenga una escasa aceptabilidad social y quede a la espera de confirmar o negar su entrada a la cartera sugerida por la Unión Europea como tecnologías sostenibles desde el punto de vista medioambiental, a pesar de la recomendación de los expertos. Así, el presente proyecto pretende analizar la opinión actual de la población española respecto a la energía nuclear, así como desarrollar un estudio económico de la viabilidad de decantarse por una estrategia de ciclo cerrado en gestión de residuos nucleares. Se observa que la población más joven, más comprometida con el medio ambiente, tiene una opinión más positiva de la energía nuclear. Además, toda la población encuestada estuvo de acuerdo en mejorar su opinión si se había establecido una estrategia de ciclo cerrado. A pesar de ser una estrategia más costosa en cuanto a los costes directos, se vería compensada por una mayor producción de energía y menores costes indirectos, haciendo posible el ciclo de doble ciclo. Por lo tanto, este proyecto sienta las bases para una consideración tecnológica más profunda de la energía nuclear como un activo para la descarbonización y la sostenibilidad medio ambiental.

Palabras clave: Energía nuclear, Gestión de residuos, Ciclos avanzados del combustible, Sostenibilidad, Descarbonización, Aceptabilidad social

1. Introducción y Metodología

La sociedad actual, preocupada por los problemas medioambientales que se han acentuado las últimas décadas, se ha concienciado acerca de la necesidad de descarbonizar la sociedad. Aunque una sociedad descarbonizada se confunde en ocasiones con una sociedad electrificada, son conceptos diferentes puesto que hay otros vectores energéticos, como el vector hidrógeno actualmente en auge, que permiten descarbonizar el sistema. Son varias las tecnologías que conducen hacia este objetivo y entre ellas destaca la energía nuclear, que permite producir energía sin emitir gases de efecto invernadero [1].

Una correcta gestión de los residuos nucleares es fundamental para decantar la balanza a favor de esta tecnología. La producción de residuos es inherente a la actividad industrial y su gestión es una etapa imprescindible, siendo una de las prioridades de los grupos de investigación que buscan optimizar gestión de residuos de alta actividad, con el objetivo futuro de lograr que no existan residuos nucleares gracias a los ciclos avanzados que

permiten separar los componentes del combustible nuclear gastado y así poder ser reutilizados como materias primas.

2. Definición del proyecto

Se busca justificar la necesidad de mantener en España la energía nuclear como parte del mix energético, tanto por razones técnicas de estabilidad del sistema como por razones económicas para evitar la escalada de la pobreza energética. Además, se va a demostrar la aceptabilidad social a esta tecnología, siempre y cuando se renueve la imagen anticuada de los cementerios nucleares gracias a la utilización de tecnologías más de vanguardia, desarrolladas en línea con la regla de las 4R. Estas tecnologías, al igual que el slogan medioambiental citado anteriormente, buscan optimizar el aprovechamiento de materias primas gracias el reprocesado y posterior reciclaje y reutilización de materiales, no solo en la fase convencional actual sino avanzando tendencias económicas de invertir en el nuevo modelo de reprocesado que permite separar más isótopos.

3. Metodología

Con el fin de analizar la viabilidad económica del reprocesado avanzado, se estima el incremento en el coste del reprocesado avanzado con respecto al reprocesado convencional, a partir de los datos obtenidos en la tesis doctoral de Laura Rodríguez [23]. El objetivo es demostrar que el reprocesado avanzado podría ser una opción viable para la gestión de residuos en un futuro próximo, pasando a formar parte de las posibles estrategias españolas para la gestión de CNG.

El estudio de la aceptabilidad social se realiza mediante encuestas enviadas a diferentes segmentos de la población y su posterior análisis. Dicha encuesta se redacta con el objetivo de preguntar de forma indirecta sobre la preferencia de la población encuestada entre una gestión de residuos nucleares con ciclo abierto o dicha gestión en ciclo cerrado.

4. Resultados

4.1. Estudio económico

Para realizar el estudio se consideran las siguientes hipótesis: no se realiza ningún pago por el Pu obtenido -1-, se establece un reprocesado avanzado en el que se extrae, aparte de U y Pu, algunos lantánidos y actínidos -2-, y, por último, se consideran estos elementos extraídos materias primas que pueden ser introducidas al mercado energético obteniendo de ello un beneficio. Con estas hipótesis definidas y consultando en la bibliografía el sobrecoste esperado de este reprocesado avanzado, se obtienen los costes totales para un incremento del 5%, 10% y 15%, mostrado en la Tabla 1, representando su tendencia en la Ilustración 1, donde se aprecia una tendencia lineal y un incremento en el coste de alrededor de 350 € cada incremento de 5% con respecto al reprocesado convencional.

	0%	5%	10%	15%
Coste total	9.277,93 M€	9.632,21 M€	9.986,48 M€	10.340,75 M€

Tabla 1. Análisis de costes del reprocesado avanzado con respecto al coste del actual reprocesado.

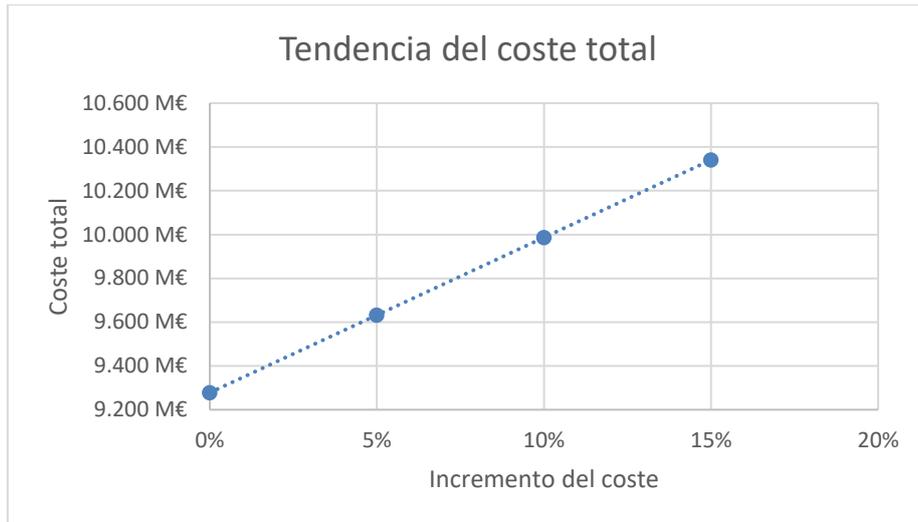


Ilustración 1. Tendencia del coste del reprocesado avanzado

Aunque este es un coste aproximado, se debe tener en cuenta que este sobrecoste, en gran medida, se va a compensar con la venta de las materias primas recicladas, con la disminución del volumen de residuos que retornan a los países que enviaron su CNG a plantas de reprocesado avanzado (así como la disminución de la radioactividad de estos, lo que reduce también las exigencias radiológicas a la hora de diseñar los AGPs y los ATCs), y con la reducción de transporte derivada de la reducción en el volumen de los residuos.

4.2. Estudio de aceptabilidad social

La encuesta realizada mediante el método CAWI (*Computer Assisted Web Interviewing*), consta de un total de cinco preguntas. A continuación, se muestran las preguntas (excluyendo la quinta que era solo para analizar la franja de edad) y sus correspondientes respuestas en las Ilustraciones 2-5.

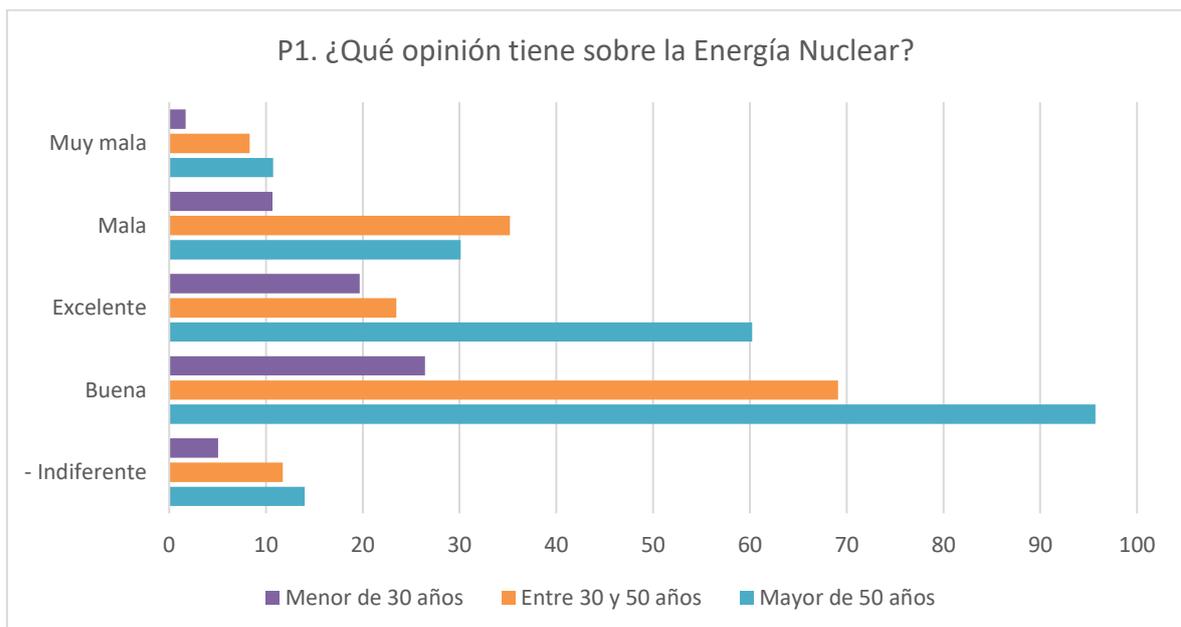


Ilustración 2. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta en función del rango de edades.

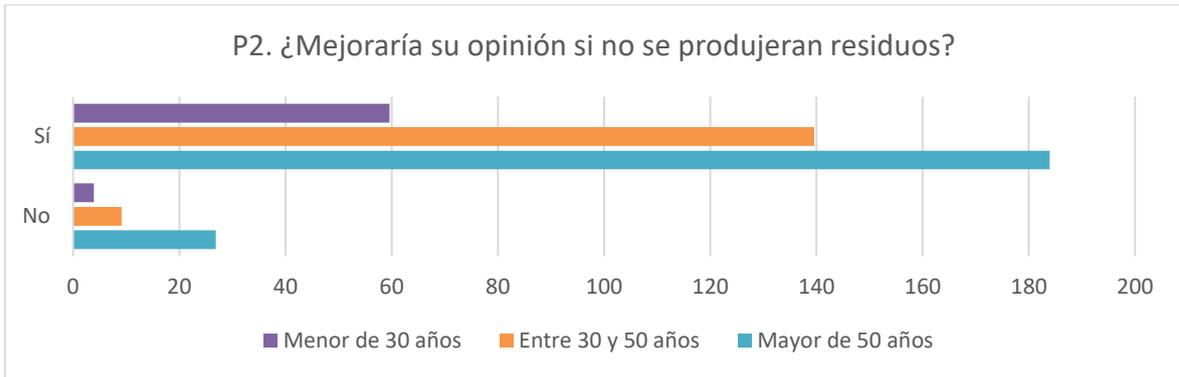


Ilustración 3. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta en función del rango de edades.

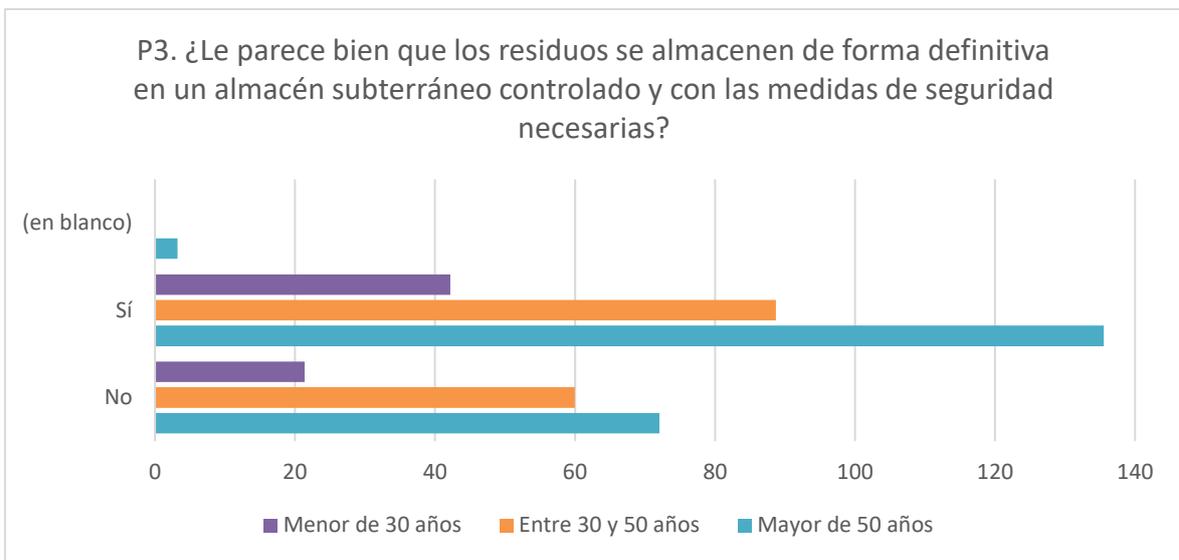


Ilustración 3. Respuestas a la pregunta 3 de la encuesta en función del rango de edades.

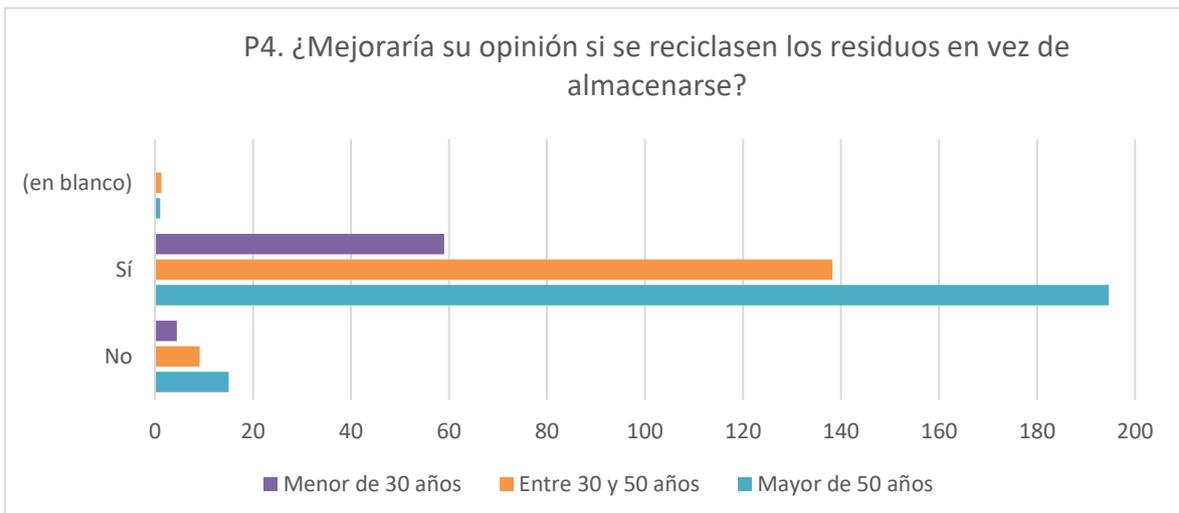


Ilustración 4. Respuestas a la pregunta 4 de la encuesta en función del rango de edades.

Analizando las respuestas se puede afirmar que el ciclo abierto no convence ni si quiera a todos los que están a favor de emplear la energía nuclear ya que el 64% afirma estar de acuerdo con el almacén directo de residuos frente al 71% que se declara a favor de la

energía nuclear. También se puede concluir que el empleo de un ciclo cerrado como estrategia para la gestión de residuos nucleares reduce significativamente la percepción negativa que tiene la población sobre la energía nuclear ya que el 22% de la población tiene una opinión negativa a cerca de esta fuente de energía y tan solo el 7% declara que el uso del ciclo cerrado no mejoraría su percepción. Cabe destacar que dentro de este 7% que no vería su opinión alterada, un 5% tenía una opinión “muy mala” acerca de la energía nuclear, lo que hace pensar que esta oposición es una oposición ideológica más que fundamentada en realidades tecnológicas. En esta línea, tan solo un 2% de los jóvenes menores de 30 declararon tener una opinión “muy mala” de la energía nuclear, lo que, unido al hecho de que este rango de edad está compuesto en su mayoría por estudiantes de ingenierías, da a entender que los jóvenes formados en esta área, con una opinión fundamentada en aspectos técnicos a priori, no presentan tanta oposición hacia esta tecnología como las personas adultas.

Por último, no se puede valorar a partir de las preguntas realizadas si alguna de las personas a los que no les convence el ciclo abierto basan esta opinión en una argumentación económica debida al sobre coste que este ciclo conlleva.

5. Conclusiones

El cese total de las centrales nucleares españolas es una acción irreversible, puesto que no sería viable económicamente abrir nuevas centrales nucleares una vez clausuradas todas las que están operativas actualmente. Es por ello por lo que debe ser una decisión premeditada y que sopesen todas las consecuencias.

Con el contexto actual europeo, analizando la posición de Alemania y Francia respecto a la energía nuclear, y el estudio realizado en el presente proyecto, queda demostrado que la tecnología nuclear es una tecnología clave para seguir con un sistema eléctrico estable y sin reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto hace que sea muy recomendable mantener las centrales nucleares españolas en operación, asegurando el suministro eléctrico las 24h del día, alineándose con el reto de alcanzar una sociedad descarbonizada, sin poner en peligro los avances tecnológicos e industriales debido a probables cortes de suministro de forzar su cierre. La disponibilidad, la fiabilidad, la estabilidad y la predictibilidad que ofrece posibilita una adecuada gestión del sistema eléctrico.

6. Referencias

- [1] Bataille C, Waisman H, Colombier M, Segafredo L, Williams J. The Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP): insights and emerging issues. *Climate Policy*. 2016;16(sup1): S1-S6.
- [2] L. Rodríguez Penalonga, Modelo para la gestión sostenible del combustible nuclear gastado, 2020.

THE FOURTH R IN NUCLEAR TECHNOLOGY - REPROCESSING

Author: Velasco Estévez, Marta.

Supervisor: Moratilla Soria, Yolanda.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

With industrial revolution, carbonization began leading to the current greenhouse effect and global warming, one of the main issues in current society. Due to this emerging climate crisis, countries are trying to switch to a decarbonization system. Nuclear energy began in 1950s, constituting a powerful technology with no CO₂ emissions that could contribute to the decarbonization of the system without compromising the electrical supply and without economical caveats. However, the lack of experience regarding radioactive waste management and the two nuclear accidents in Chernobyl and Fukushima, have made nuclear energy to have a poor social acceptability and to be left out of the first portfolio suggested by the European Union as environmentally sustainable technologies, despite the recommendation of experts, until a final decision is made. Thus, this project aims to analyze the current opinion of the Spanish population regarding nuclear energy as well as developing an economical analysis of the instauration of a twice-through cycle strategy. We observed that the younger population, more engaged with the environment, has a more positive opinion of nuclear energy. Furthermore, all surveyed population agreed on improving their opinion if a twice-through cycle strategy was in place. Despite being a more expensive strategy regarding direct costs, we found that it would be compensated by a higher energy production and lower indirect costs, making twice-through cycle a possible option. Therefore, this project sets the ground for a deeper technological consideration of nuclear energy as an asset for decarbonization and environmental sustainability.

Keywords: Nuclear energy; Reprocessing; Waste management; Closed cycle of fuels; Environmental sustainability; Decarbonization; Social acceptability.

1. Introduction

Current society, worried by the environmental crisis, is more compromised with the need of decarbonization of the system. Despite a decarbonized society is often mixed with an electrified society, those are very different concepts as there are other energetic vectors such as hydrogen energy. European Union is creating a portfolio of those environmentally sustainable technologies, and despite not being included yet, the nuclear energy could be a great ally as it can produce energy without emitting any greenhouse effect gas.

A proper management of the nuclear residues is fundamental to tip off the balance in favor to nuclear technology. The production of residues is inherent to the industrial activity and thus its management is key, needing to optimize those processes with the goal of achieving no nuclear residues production in the future, and reusing the components as new raw materials.

2. Project definition

This project aims to justify the need of nuclear technology in Spain as part of the energetic mix, both for system stability and economical reasons to about the rise of energetic poverty. Furthermore, it will show that the social acceptability of this technology can increase as long as the development in refinement and reuse of residues advances, in line with the rule of the 4R. These technologies, like the environmental slogan previously cited, look for an optimization of the raw materials thanks to the reprocessing, recycling and reuse of materials.

3. Model description

To analyze the economic feasibility of the advanced reprocessing, we estimated the increment in costs of the advanced process compared to the cost of conventional reprocessing. Such estimation was made from the data obtained in the PhD thesis of Laura Rodriguez. The goal of such calculation was to demonstrate that an advance reprocessing could be a feasible option for the waste management in a near future, thus becoming part of the portfolio of possible strategies for Spain to improve SNF management.

In order to assess the current opinion of the Spanish population regarding nuclear energy and its impact in the environment, a CAWI survey (Computer Assisted Web Interviewing) was designed with the five, below stated questions that could be answered in the scale from “excellent” to “very poor” or with a “yes/no” answer type.

4. Results

4.1. Economical study

When doing this analysis, the following hypothesis were held: (1) there is no associated payment for the plutonium obtained; (2) there is an advanced reprocessing in which lanthanoids and actinoids are obtained as well, alongside plutonium and uranium, and (3) the lanthanoids and actinoids obtained would be considered as raw material that put back in the market give an economical benefit.

With these defined hypotheses and using the literature to find the estimated over-cost of the advanced reprocessing, we obtained the total cost for an increment of 5%, 10% and 15%, showed in Table 1. representing the trend in Figure 1, where it can be seen as linear and with an increment of cost of around 350€ each increment of 5% compared to conventional reprocessing.

	<i>0%</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>
Total Cost	9.277,93 M€	9.632,21 M€	9.986,48 M€	10.340,75 M€

Table 1. Analysis of the advanced reprocessing cost compared to the current cost of reprocessing.

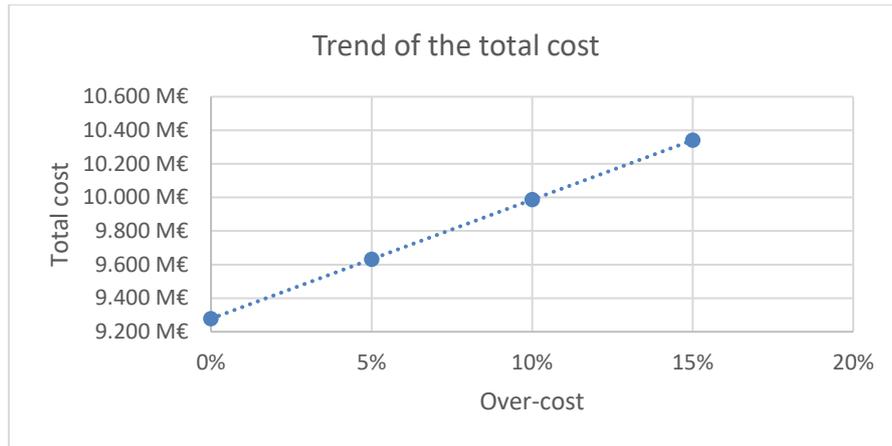


Figure 1: Linear trend of over-cost against total cost

Although this is an approximate cost, it has to be taken into account that the over-cost will largely be compensated with the sale of recycled raw materials, with the decrease in the residue volume that need to get back to their countries, and with the decrease in the transport need associated to this lower volume of residues.

4.1. Social acceptability

The survey performed by CAWI (*Computer Assisted Web Interviewing*) method consist of a total of five questions. Below, it is shown all the questions but the fifth one (only needed to set the age frame of the subject) and the corresponding answers.

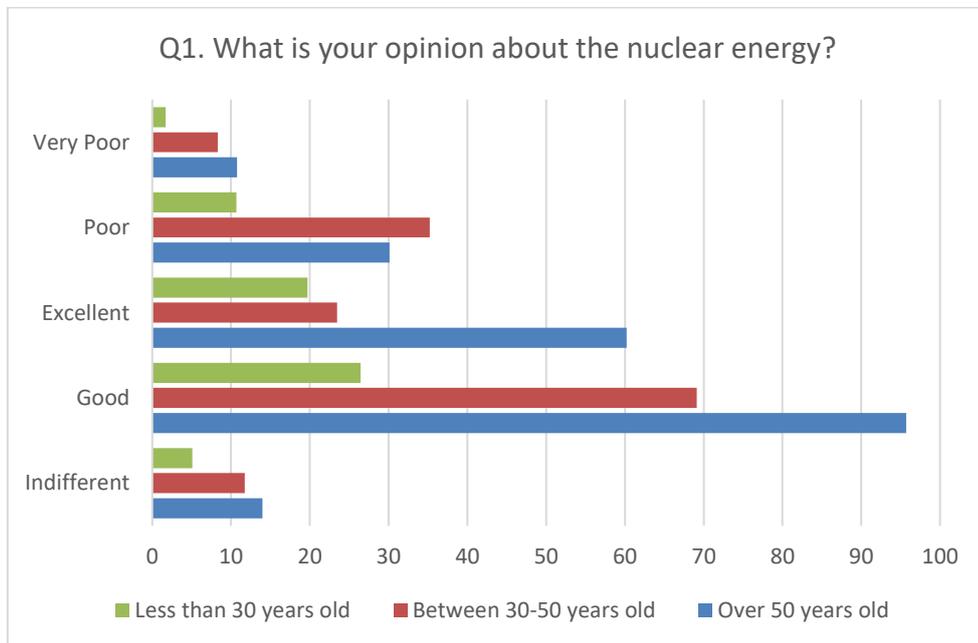


Figure 2: Answers to Q1 grouped by age.

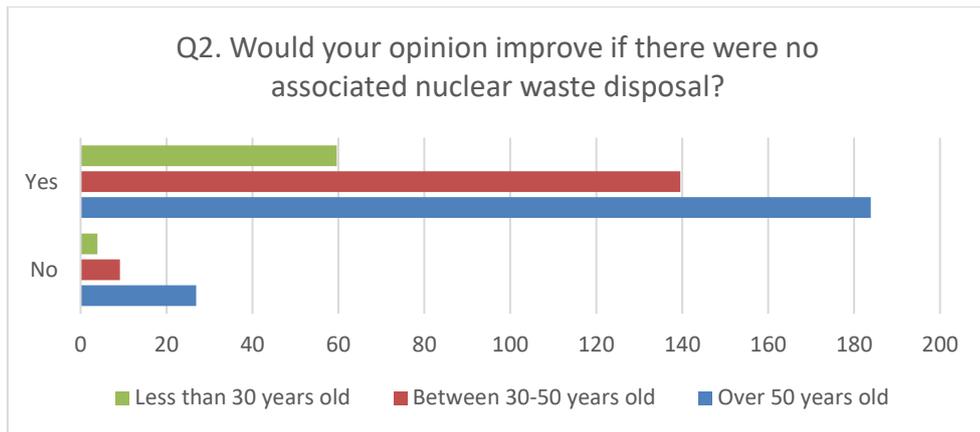


Figure 3: Answers Q2 classified by age groups.

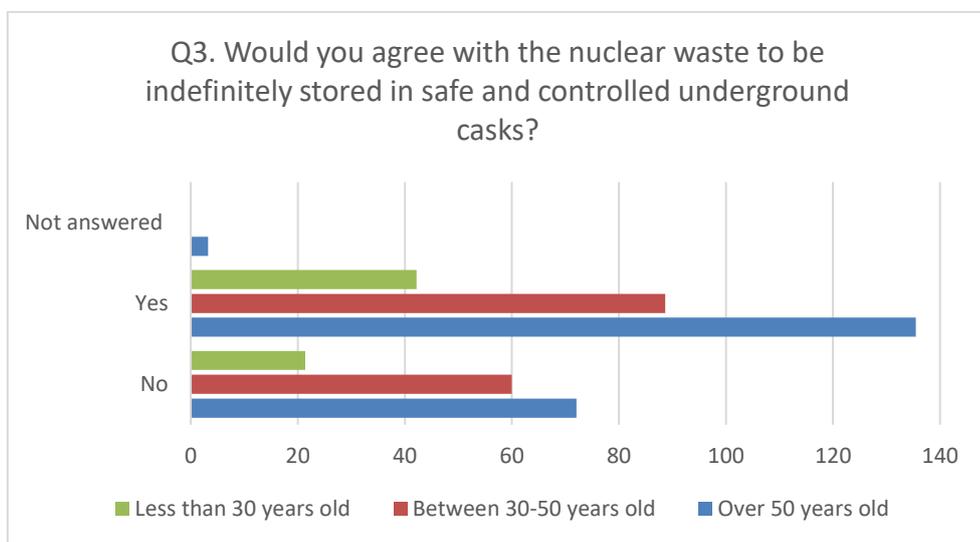


Figure 4: Answers to Q3 classified by age groups.



Figure 5: Answers to Q4 classified by age groups.

Based on all the answers collected, it is clear that a once-through cycle is not good enough for the population, not even for those who already hold a positive view of nuclear power (71% of population has a positive view of nuclear energy, while 64% agrees with the direct storage of SNF). On the other hand, it was also observed that the usage of a

twice-through cycle as SNF management strategy would significantly reduce the negative perception of the surveyed sample. This affirmation is held on the basis that 22% of the population answered to have a negative perception of nuclear energy and only 7% of them declared that a change of the SNF management strategy would not be enough for them to improve their opinion about nuclear. It is worth noting that inside that 7% who would not change their opinion, 5% had a “very poor” view of nuclear technology, which leads to the hypothesis that such opposition is funded upon ideological fundamentals rather than technological knowledge. Following this line, only the 2% of the people below 30 years old declared to have a “very poor” opinion about nuclear technology, and this, linked to the fact that most people belonging to this sample group are engineering students, leads to the hypothesis that when having the grounds and knowledge about what is nuclear technology and how it works, people is less inclined towards having a negative view of this technology. Finally, we could not evaluate from the survey performed whether the sample population who was not convinced with a once-through cycle base their opinions on an economical argumentation due to the over-costs that this management strategy implies.

5. Conclusions

The total cease of the Spanish nuclear centrals is an irreversible action, as it would not be economically feasible to open new ones afterwards. That is why it must be a strongly premeditated choice, with all the possible consequences very clear.

In the current European context, analyzing the position of France and Germany regarding nuclear energy and with this project, it has been proven that the nuclear technology is a key technology to maintain a stable electric system while reducing the emissions of greenhouse gases. Therefore, it seems highly advisable to keep the Spanish nuclear centrals operating, thus guaranteeing the electric supply 24/7 and helping achieve the goal of a decarbonized society without compromising the society. The availability, stability and predictability that nuclear technology possesses, offers the possibility of an adequate management of the electric system.

6. References

- [1] Bataille C, Waisman H, Colombier M, Segafredo L, Williams J. The Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP): insights and emerging issues. *Climate Policy*. 2016;16(sup1): S1-S6.
- [2] L. Rodríguez Penalonga, Modelo para la gestión sostenible del combustible nuclear gastado, 2020.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Energía nuclear en España	6
1.2 Opinión pública actual sobre la energía nuclear.....	8
Capítulo 2. Estado del arte	10
2.1 Ciclo del combustible nuclear	10
2.1.1 Fase inicial: de la naturaleza al reactor.....	11
2.1.2 Fase de gestión del CNG.....	11
2.2 Tecnologías de reprocesado	14
2.2.1 Reprocesado convencional - PUREX.....	15
2.2.2 Reprocesado avanzado.....	17
Capítulo 3. Definición del Trabajo	21
3.1 Justificación.....	21
3.2 Objetivos	21
3.3 Metodología.....	22
3.4 Alineación con los ODS	22
Capítulo 4. Estudio viabilidad económica	24
4.1 Modelo Mariño.....	24
4.2 Hipótesis consideradas	25
4.3 Análisis de resultados.....	26
Capítulo 5. Aceptabilidad social.....	28
5.1 Ficha técnica de la encuesta realizada	30
5.2 Población encuestada	30
5.3 Preguntas y respuestas obtenidas	31
5.3.1 ¿Qué opinión tiene sobre la Energía Nuclear?.....	31
5.3.2 ¿Mejoraría su opinión si no se produjeran residuos?.....	32
5.3.3 ¿Le parece bien que los residuos se almacenen de forma definitiva en un almacén subterráneo controlado y con las medidas de seguridad necesarias?.....	33
5.3.4 ¿Mejoraría su opinión si se reciclasen los residuos en vez de almacenarse?	33
5.3.5 ¿A qué franja de edad pertenece?	33
5.4 Análisis de las respuestas	34

5.5 Conclusiones derivadas del análisis	40
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	42
Capítulo 7. Bibliografía.....	44
ANEXO I: Respuestas individuales	47

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de generación eléctrica en España por tecnologías (2020). Elaboración propia obtenida a partir de los datos obtenidos de [7].	7
Figura 2. Fabricación de un elemento combustible [14].	11
Figura 3. Tendencia del coste del reprocesado avanzado.	27
Figura 4. Gráfico de percepción de la energía nuclear	32
Figura 5. Gráfico de cambio de percepción de la energía nuclear de no producirse residuos	32
Figura 6. Gráfico de la población encuestada considerando estudiantes o profesionales.	34
Figura 7. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta en función del rango de edades.	36
Figura 8. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta para el rango de edad: < 30 años.	36
Figura 9. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta para el rango de edad: 30 < 50 años.	37
Figura 10. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta para el rango de edad: > 50 años.	37
Figura 11. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta en función del rango de edades.	38
Figura 12. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta para el rango de edad: < 30 años.	38
Figura 13. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta para el rango de edad: 30 < 50 años.	38
Figura 14. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta para el rango de edad: > 50 años.	39
Figura 15. Respuestas a la pregunta 3 de la encuesta en función del rango de edades.	39
Figura 16. Respuestas a la pregunta 4 de la encuesta en función del rango de edades.	40

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis de sensibilidad obtenido del modelo Mariño.	26
Tabla 2. Análisis de costes del reprocesado avanzado con respecto al coste del actual reprocesado.	26
Tabla 3. Análisis de la reducción en costes de las etapas de la gestión del CNG.	27
Tabla 4. Ficha técnica de la encuesta realizada.	30
Tabla 5. Respuestas obtenidas para la pregunta 1 de la encuesta.	31
Tabla 6. Respuestas obtenidas para la pregunta 2 de la encuesta.	32
Tabla 7. Respuestas obtenidas para la pregunta 3 de la encuesta.	33
Tabla 8. Respuestas obtenidas para la pregunta 4 de la encuesta.	33
Tabla 9. Respuestas obtenidas para la pregunta 5 de la encuesta.	34
Tabla 10. Resultados obtenidos de ponderar las respuestas en función de cuotas de edad.	35

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

España, Europa y el mundo deben ir hacia una sociedad descarbonizada, lo cual no es sinónimo de una sociedad electrificada, ya que pueden existir otros vectores energéticos que permiten descarbonizar el sistema, como es el vector hidrógeno que hoy en día está despegando enormemente gracias al apoyo de los fondos europeos. Técnicamente, hay varias tecnologías que permiten la descarbonización del mix energético y una de ellas, sin duda alguna, es la tecnología nuclear. Esta tecnología permite la producción de energía sin emisiones de CO₂ [1]. Para poder llevar una descarbonización del sistema eléctrico minimizando el riesgo y el coste, es necesario contar con un porfolio de opciones lo más diverso posible [2]. Eliminar esta tecnología de las opciones técnicamente disponibles para descarbonizar el mix energético elevaría el coste de la producción eléctrica sustancialmente [3], así como disminuiría la capacidad de inercia que da estabilidad a la red, lo cual podría llevar a cortes en el suministro.

Para atajar esta crisis, la Comisión Europea creó el Pacto Verde, el cual tiene como objetivo lograr que los 27 estados miembros reduzcan sus emisiones un 55% en 2030, alcanzando la neutralidad en carbono en el año 2050 [4]. Si embargo, para poder alcanzar los objetivos definidos en el Pacto Verde Europeo, es necesario invertir en proyectos sostenibles que ayuden a alcanzar dichos retos. Sin embargo, no hay una definición clara de qué es un proyecto sostenible, razón por la cual se crea un plan de acción para promover el crecimiento sostenible comenzando por establecer un sistema de clasificación para actividades sostenibles: la Taxonomía UE. Este sistema de clasificación lista las actividades económicas que son sostenibles con el medio ambiente. La regulación de taxonomía entro en vigor en julio de 2020 estableciendo un marco de referencia y definiendo seis objetivos medioambientales: mitigación -1- y adaptación -2- al cambio climático, uso de recursos hídricos y marinos de forma sostenible y protección de los mismos -3-, transición a la economía circular -4-, prevención y control de los contaminantes -5- y protección y restauración de la biodiversidad y ecosistemas -6-. Con estos objetivos definidos, se establece una lista de actividades consideradas como medioambientalmente sostenibles,

dentro de la cual no está la energía nuclear porque se decidió retrasar la inclusión o no de esta para poder hacer un análisis más profundo. El grupo de expertos definido por la Comisión Europea aseguró que la energía nuclear produce prácticamente cero emisiones de gases de efecto invernadero en la generación de energía, lo que contribuiría a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, aunque el informe de los expertos era favorable [5], no se llegó a una conclusión definitiva con respecto al impacto en el resto de los objetivos medioambientales debido a la falta de experiencia en la gestión de residuos nucleares de alta actividad (RAA).

Una correcta gestión de los residuos, controlada y coordinada, decantaría la balanza y haría que la energía nuclear formase parte de la Taxonomía UE y fuera, por tanto, considerada una actividad sostenible medioambientalmente.

La producción de residuos es algo inherente a la actividad industrial, lo que hace que su correcta gestión sea un asunto primordial para poder seguir desarrollando nuevas tecnologías. En las últimas décadas se ha aumentado la generación de desechos de forma alarmante [6]. Con el fin de parar este incremento descontrolado y proteger al planeta, se propuso la regla de las “3R”: Reducir, Reutilizar y Reciclar. En los últimos años, debido al incremento en la preocupación por el planeta y los efectos del cambio climático, se añadió un nuevo término: Recuperar. Esta última “R” se relaciona directamente con los procesos industriales y consiste en recuperar materiales o elementos que sirvan como materia prima. El reprocesado de combustible nuclear gastado consiste expresamente en recuperar materiales radiactivos que todavía son útiles para poder reutilizarlos en los reactores nucleares. Esta es la razón por la que el proyecto propone el Reprocesado como la 4R de la tecnología nuclear.

1.1 ENERGÍA NUCLEAR EN ESPAÑA

Actualmente, España cuenta con un mix energético muy diversificado, mostrado en la Figura 1. Respecto a las energías renovables, la energía hidráulica supuso un 12 % de la producción

total en 2020; mientras que, la energía solar solo supuso un 8% [7]. La razón por la que la energía fotovoltaica supone un porcentaje tan pequeño, siendo España uno de los países con más irradiación solar de la Unión Europea, es que aun presenta bastantes limitaciones [8]. La energía eólica sí que contribuye sustancialmente a la producción de energía en España, suponiendo un 22% de la producción total, igualando dicha producción con la generada por la energía nuclear. Aunque la producción de eólica y de nuclear es idéntica, la potencia instalada es significativamente menor en el caso de la energía nuclear, siendo 17.093 MW de potencia eólica instalada frente a los 7.117 MW de potencia nuclear instalada, al igual que la extensión dedicada a los parques eólicos es mucho mayor que la ocupada por centrales nucleares [9].

En este contexto, si España decide seguir adelante con su plan de desnuclearización, tendría que sustituir dicho 22% de producción eléctrica, considerando las características propias de la energía nuclear: inercia, estabilidad a la red y sin emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Encontrar una tecnología que pueda sustituir a la nuclear con las mismas cualidades es un reto en sí mismo. Las tecnologías existentes que aportan estabilidad, como los combustibles fósiles, lo hacen a cambio de altas emisiones de GEI; mientras que, las renovables permiten reducir las emisiones, aunque también reducen la estabilidad del sistema eléctrico y, al no ser gestionables, requieren una energía de respaldo cubrir las demandas.



Figura 1. Estructura de generación eléctrica en España por tecnologías (2020).

Elaboración propia obtenida a partir de los datos obtenidos de [7].

Actualmente, España cuenta con instalaciones nucleares que cubren el ciclo de combustible completo [10]: siete reactores nucleares operativos Almaraz I y II (Cáceres), Ascó I y II (Tarragona), Cofrentes (Valencia), Trillo (Guadalajara) y Vandellós II (Tarragona); la fábrica de combustible nuclear de Juzbado (Salamanca) y un centro de almacenamiento de residuos radiactivos de muy baja, baja y media actividad en El Cabril (Córdoba).

Respecto a la gestión del combustible nuclear gastado (CNG), aunque en España en un primer momento, con el desmantelamiento de Vandellós I, se optó por el reprocesado, enviando los residuos de dicha central a las plantas de reprocesado *La Hague* en Francia (los vidrios procedentes de este reprocesado continúan esperando su regreso a España desde Francia) y *Sellafield* en Reino Unido. En el VI Plan General de Residuos Radiactivos de 2006, que es el vigente en la actualidad, estableció una estrategia de ciclo abierto donde se previó la construcción de un Almacén Temporal Centralizado (ATC) para alojar el CNG de las diferentes centrales nucleares de España. El ATC se proyectó para estar en uso en 2010; sin embargo, a día de hoy aún no se ha iniciado la construcción debido a las continuas dificultades que retrasan el proyecto [11].

Sin ATC construido, a medida que las piscinas de las centrales se llenan y su capacidad no se puede aumentar más, se van construyendo Almacenes Temporales Individualizado (ATIs).

1.2 OPINIÓN PÚBLICA ACTUAL SOBRE LA ENERGÍA NUCLEAR

Las decisiones que incluyen a tecnologías cuestionadas por la opinión pública y muy arraigadas políticamente suelen ser más difíciles de tomar y es una de las razones por las que la gestión de residuos nucleares en España no tiene establecido una estrategia definitiva a largo plazo.

La opinión pública se ve muy influenciada por los accidentes nucleares y el desconocimiento que tiene la población general sobre la energía nuclear. Tras el accidente de Chernóbil en 1986, se describió como uno de los daños más importantes producidos en la población el

impacto psicológico derivado del desconocimiento del efecto de la radiación. Posteriormente, en el 2011 se produjo el accidente de Fukushima, tras el cual varios países de la UE establecieron un plan de desmantelamiento de sus centrales nucleares, a pesar de que dicha central llegó a parada segura y todos los muertos producidos se debieron al tsunami y no a la exposición radioactiva.

Cabe destacar que la energía nuclear no es uno de los problemas que más preocupan a la población general; sin embargo, el precio de la electricidad sí que lo es [12]. La energía nuclear no solo da estabilidad al sistema sirviendo de producción base, sino que, al no depender de elementos externos, es capaz de contener la tarifa. Esto la convierte en un gran aliado teniendo en cuenta que este año el precio de la electricidad ha batido varios récords.

Se puede deducir que la razón principal de la oposición pública a dicha energía es debida al miedo a accidentes nucleares y desconocimiento sobre la radiación. Con una gestión eficaz de los residuos nucleares esta opinión pública podría mejorar sustancialmente y tornarse positiva hacia la energía nuclear, como se demuestra en el presente estudio.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se va a realizar un análisis del Estado del Arte en el ciclo cerrado del combustible nuclear, haciendo énfasis en el reprocesado avanzado que se va a analizar en este proyecto, y en los estudios existentes sobre aceptabilidad social de la energía nuclear.

Así, en primer lugar, se van a analizar las estrategias de ciclo cerrado adoptadas por los países que se han decantado por este tipo de tratamiento de residuos nucleares y qué líneas de investigación se están llevando a cabo en cuanto a reprocesado avanzado.

A continuación, se realiza un análisis de los estudios llevados a cabo hasta la actualidad sobre la aceptabilidad social de la energía nuclear.

2.1 CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

El ciclo del combustible nuclear engloba todas las etapas y los procesos a los que se someten el uranio y, posteriormente, sus derivados, desde su extracción en la mina hasta su disposición final. Los diferentes tipos de ciclos definen diferentes estrategias para la gestión de los nucleidos físis, suponiendo implicaciones importantes para la gestión de residuos nucleares y la proliferación de armas nucleares, dos de los tres principales impactos negativos para el medioambiente de la energía nuclear [13] (siendo el tercero los accidentes nucleares).

El ciclo del combustible nuclear tiene dos grandes fases: la fase inicial (o *front-end*, en inglés) y la fase de gestión del combustible nuclear gastado (o *back-end*). La primera engloba todas las etapas previas a la utilización del combustible nuclear en los reactores de las centrales para la generación de energía eléctrica. Por otro lado, la segunda fase se refiere a aquellos procesos a los que se somete el combustible nuclear irradiado tras su extracción del reactor hasta su almacenamiento definitivo. A continuación, se explica cada una de ellas.

2.1.1 Fase inicial: de la naturaleza al reactor

Esta primera fase tiene cinco etapas: minería para extraer el uranio -1-, conversión del concentrado de uranio (U_3O_8) en hexafluoruro de uranio (UF_6) -2-, enriquecimiento del uranio para obtener la concentración del isótopo fisionable U-235 requerida por los reactores nucleares -3-, conversión del UF_6 enriquecido en polvo de dióxido de uranio (UO_2) -4-, y, por último, la fabricación del elemento combustible -5-.

La última etapa de esta primera fase, la fabricación del elemento combustible, se describe en detalle en la **Figura 2**. En ella se parte de una pastilla de uranio, obtenida al compactar el UO_2 en pastillas cilíndricas.



Figura 2. Fabricación de un elemento combustible [14][13].

2.1.2 Fase de gestión del CNG

La gestión de los residuos nucleares gastados tiene como objetivo evitar que dichos residuos supongan un riesgo para el medio ambiente o para los seres humanos, ya sea de forma directa, mediante el aire o el agua, o de forma indirecta a través de la cadena alimenticia.

Esta fase parte de la extracción del combustible gastado de los reactores y termina con la disposición final del CNG. El combustible se considera “gastado” cuando el crecimiento de los productos de fisión (PF), responsables de absorber los neutrones, y el decrecimiento del

^{235}U , consumido en las reacciones, reducen la eficacia de la cadena de reacciones de fisión [14]. Esta reducción en su efectividad conduce a la necesidad de sustituir parte de estos elementos por combustible nuevo, lo que se denomina recarga.

El combustible gastado que se extrae del reactor mantiene un alto grado de capacidad energética ya que el reactor solo ha utilizado el 5% de la energía que contenía inicialmente [14]. Esta capacidad energética remanente puede ser utilizada nuevamente en otros reactores.

Las etapas de esta fase dependen de la estrategia de ciclo del CNG que se haya decidido implantar. Son dos las estrategias actuales seguidas por la mayoría de los países: el ciclo abierto y el ciclo cerrado. A continuación, se explica cada una de ellas.

2.1.2.1 Ciclo abierto

El ciclo abierto consiste en el almacenamiento directo del combustible nuclear gastado, sin someterlo a procesos intermedios. Este almacenamiento se realiza cumpliendo con la normativa vigente de seguridad durante miles de años hasta que su radiactividad haya alcanzado los niveles del uranio natural o niveles de seguridad. Este ciclo consta de dos etapas principales: almacenamiento temporal y almacenamiento definitivo, incluyendo las etapas intermedias de transporte y encapsulamiento.

Almacenamiento temporal

Existen dos tipos de almacenamiento temporal, en función del tipo de refrigeración empleada: en húmedo, empleando piscinas de enfriamiento con agua, y en seco, mediante el uso de un gas inerte o simplemente aire como refrigerante.

En primer lugar, tras extraer el combustible gastado de los reactores, se introduce en piscinas dentro de la propia central con el fin de disminuir su radioactividad y el calor residual para facilitar las siguientes fases. En estas piscinas se mantiene entre 5 y 10 años, dependiendo de las características específicas de la central (tipo de reactor, grado de quemado, combustible empleado, etc) [15]. Esta etapa la comparten el ciclo cerrado y el ciclo abierto, siendo la primera fase del almacenamiento temporal del CNG.

Tras ser refrigerado en las piscinas, se traslada el combustible gastado a un almacenamiento en seco, donde permanecerán entre 50 y 100 años, hasta su disposición final a gran profundidad. Este almacén puede estar ubicado en la propia central nuclear, lo que se denomina Almacén Temporal Individualizado (ATI) o en una localización externa a la central donde se reúnen el CNG de varias centrales, lo que se denomina un Almacén Temporal Centralizado (ATC).

Finalmente, los residuos radiactivos se trasladan a un su destino final, donde permanecerán hasta que los niveles de radioactividad sean iguales a los naturales o hasta que alcancen unos límites seguros. La opción actual más demandada para este almacén definitivo es un Almacén Geológico Profundo (AGP).

2.1.2.2 Ciclo cerrado

El combustible gastado extraído de los reactores está formado en su mayoría por uranio, unido a productos de fisión y actínidos minoritarios. Aunque la composición varía en función de las características de la central y el reactor, la cantidad de Uranio es en torno al 95%, cuya capacidad energética sigue siendo muy elevada. Por ello, en el ciclo cerrado se separa el CNG en diferentes componentes para poder aprovechar dicha capacidad energética residual. Por ende, en el ciclo cerrado el combustible gastado se considera un recurso y no un residuo, concepto apoyado por los principios de la economía circular, lo que convierte en esta estrategia, una estrategia basada en la sostenibilidad, reduciendo notablemente la cantidad de residuos y su alcance temporal [16].

Para reaprovechar estos componentes con alto poder calorífico, es necesario separar los materiales físis (el uranio y el plutonio) del resto de componentes del combustible gastado. El U y Pu extraídos, se reutilizan formando una mezcla de óxido de uranio (UO_2) y óxido de plutonio (PuO_2) llamada óxidos mixtos o mezclados (MOX, *Mixed OXides*). Este combustible puede ser utilizado en las centrales nucleares, consiguiendo con ello mejorar el aprovechamiento del uranio. Tras ser empleado de nuevo en los reactores, el MOX puede ser reprocesado nuevamente pero no es aconsejable hacer esto más de 2 o 3 ciclos ya que la reducción de eficiencia sería muy elevada. El resto de los componentes del CNG (productos

de fisión y actínidos minoritarios) se someten a un proceso de vitrificación para reducir su radioactividad y así facilitar su manejabilidad en las etapas posteriores.

El reprocesado de residuos nucleares se suele llevar a cabo mediante un proceso denominado PUREX por sus siglas en inglés *Plutonium Uranium Recovery by EXtraction*. Este proceso, desarrollado en Estados Unidos en la última mitad del siglo XX, es el más empleado actualmente para reprocesar a escala industrial. De entre los países que cuentan con plantas de reprocesado con PUREX, destacan por el volumen de residuos reprocesados los siguientes países: Japón (Rokkasho), Francia (La Hague), Reino Unido (Sellafield) y Rusia (Mayak).

Separar el Uranio y Plutonio del resto de componentes del combustible gastado se considera un ciclo cerrado convencional. Sin embargo, hay tecnologías novedosas, aún en fase de desarrollo, que permiten separar también algunos productos de fisión y actínidos minoritarios. Estas últimas tecnologías formarían parte de una estrategia de ciclo cerrado avanzado.

2.2 TECNOLOGÍAS DE REPROCESADO

El reprocesado consiste en separar, mediante procesos químicos, los diferentes materiales que componen el combustible nuclear gastado [17]. Actualmente, en el reprocesado convencional, se separan el uranio y el plutonio del resto de componentes. Sin embargo, las líneas de desarrollo de nuevas tecnologías de reprocesado buscan separar también algunos productos de fisión y actínidos minoritarios.

El combustible nuclear gastado está compuesto en su gran mayoría de materiales reutilizables (alrededor de un 95% es U) que mantienen su potencial energético. Este afán por desarrollar una tecnología de reprocesado avanzado que sea viable económica y técnicamente está en línea con el actual interés hacia un desarrollo sostenible. Lograr una economía circular, donde los “residuos” producidos puedan ser reutilizados, convirtiéndose de nuevo en recursos y reduciendo así la disposición final de residuos, es el objetivo del reprocesado avanzado. Con él, la energía nuclear se convertiría en una fuente de energía más

sostenible, sin emisiones de CO₂ y con baja tasa de producción de residuos, convirtiéndose en la aliada perfecta para la deseada descarbonización.

Cabe destacar que el reprocesado, aunque reduce los residuos nucleares, no los eliminaría por completo, siendo necesario un almacén final para aquellos productos que no se pueden reprocesar. Existen varias tecnologías de reprocesado en desarrollo, explicadas a continuación, pero solo PUREX está accesible comercialmente.

2.2.1 Reprocesado convencional - PUREX

El reprocesado actual, accesible a nivel comercial, es el método denominado PUREX por su significado en inglés *Plutonium Uranium Recovery by EXtraction*. Esta tecnología fue desarrollada en la segunda mitad del siglo XX, gracias a la tecnología militar y su experiencia. PUREX consiste en trocear el combustible gastado, disolverlo en ácido nítrico y extraer los solventes utilizando tributilfosfato (TBP). Con este proceso, el uranio y el plutonio se separan de los productos de fisión y de los actínidos minoritarios, quedando estos disueltos en el ácido.

Para comenzar la etapa del reprocesado, el CNG se traslada a las plantas de reprocesado, donde se introduce en piscinas (almacenamiento húmedo), idénticas a las que se emplean en las centrales cuando se extrae el CNG de los reactores. En estas piscinas pueden permanecer varias décadas hasta ser reprocesados. A continuación, comenzaría el proceso de PUREX como tal, que consta de cuatro etapas: eliminación del revestimiento, disolución, separación y purificación de materiales (U, Pu), y una etapa final de tratamiento y acondicionamiento de residuos radiactivos. A continuación, se explican en detalle cada una de las etapas del proceso de PUREX [18].

2.2.1.1 Eliminación del revestimiento

El combustible se reviste con diferentes metales con el fin de que no entre en contacto con el refrigerante. Para que el CNG pueda estar en contacto con el ácido nítrico y así poder reaccionar, se debe eliminar el revestimiento. Esta eliminación puede ser mecánica, mediante el troceado del CNG, o química.

2.2.1.2 Disolución

Para poder separar el U y Pu del resto de componentes, se disuelve el CNG en ácido nítrico. El grado de disolución depende de varios factores, como la temperatura, porosidad o concentración de Pu. Este proceso deriva en la emisión de óxidos de nitrógeno y productos de fisión volátiles que son requeridos de un tratamiento previo a la liberación a la atmósfera.

2.2.1.3 Separación y purificación de materiales

Para poder extraer el U y el Pu se debe preparar la disolución filtrándola y regulando su pH hasta obtener los valores óptimos para la separación. Una vez separados, se somete al extracto de U y Pu a un tratamiento químico para separar uno del otro y, posteriormente, se purifican ambos elementos por separado.

2.2.1.4 Tratamiento y acondicionamiento de residuos

El uranio y el plutonio se reconvierten en PuO_2 y UO_3 y se envían a las plantas de fabricación de combustible para poder ser reutilizados, mientras que, los productos de fisión y los actínidos minoritarios que quedaron estado líquido se vitrifican para obtener vidrios que se deben almacenar como residuos radiactivos de alta actividad, pero con menor vida que los residuos de un ciclo abierto.

El reprocesado PUREX es una tecnología madura que logra casi el 100% de separación de U y Pu, por lo que las líneas de mejora se centran en la reducción de la radiotoxicidad de los residuos producidos para poder facilitar el almacenamiento de estos.

El uranio y el plutonio obtenidos del reprocesado pueden ser reutilizados convirtiéndolos en un nuevo combustible: MOX (Mixed Oxide). Este combustible está formado de óxidos de plutonio y óxidos de uranio y pueden sustituir al U-235 en los reactores térmicos para la producción de energía nuclear. El MOX puede ser reprocesado de nuevo una vez termina su ciclo de vida en el reactor; sin embargo, este proceso solo puede llevarse a cabo dos o tres veces por la producción de isótopos no fisionables y la dificultad que adquiere tratar este combustible por su alto grado de radiotoxicidad. El empleo de MOX no solo ayuda a reducir los residuos de alta actividad, sino también permite reducir las necesidades de uranio natural

y disminuye el riesgo de proliferación al reducir la cantidad de plutonio puro separado en el reprocesado.

Otra forma de reutilizar estos isotopos separados en el reprocesado es someter al uranio obtenido a un proceso de re-enriquecimiento, denominado REPOUX (Reprocessed Uranium Oxide). Sin embargo, esta opción es menos empleada que la anterior puesto que el uranio reprocesado tiene mayor radiotoxicidad que el uranio natural y esto encarece el coste de las instalaciones necesarias para enriquecerlo.

2.2.2 Reprocesado avanzado

A comienzos de la década de los 90 surgió una estrategia de ciclo cerrado avanzado, basada en la transmutación de algunos radionucleidos de vida larga presentes en el combustible nuclear gastado, con el fin de disminuir su radiotoxicidad y así reducir el tiempo que transcurre hasta que alcancen un nivel de toxicidad similar al del uranio natural una vez enviados al AGP [15]. Para llevar a cabo la transmutación, se requiere un previo reprocesado para poder separar los actínidos minoritarios (Np-237, Am-241 y Cm-242/243/244) y algunos productos de fisión de vida larga (Tc-99 y I-129). De forma complementaria, surgió el interés por separar también el Sr-90 y Cs-137 debido a que son emisores de calor y condicionan el diseño térmico del AGP y, aunque separar el estroncio y el cesio es muy complicado, su transmutación es inviable económicamente a día de hoy.

En cuanto a las tecnologías de reprocesado, o separación, hay dos grandes líneas de investigación: procesos hidrometalúrgicos, que implican el empleo de un medio húmedo, y procesos pirometalúrgicos, desarrollados en un medio seco. Ambos tipos de procesos se explican en detalle a continuación.

2.2.2.1 Procesos hidrometalúrgicos

Estos procesos tienen lugar en un medio acuoso y se basan en la extracción de isotopos mediante disolventes orgánicos. Estas tecnologías son las más desarrolladas y parten del proceso PUREX, explicado en el anterior apartado, desarrollando mejoras para aumentar el rendimiento y reducir la radiotoxicidad y el volumen de residuos que se envían a deposición final. Entre ellos destacan los procesos UREX, DIAMEX y TRUEX [19].

2.2.2.1.1 UREX

El proceso UREX (Uranium Extraction), también conocido como PUREX avanzado, es una adaptación del proceso PUREX para poder extraer el neptunio, además del plutonio y del uranio, así como otros actínidos minoritarios con altos rendimientos. Una de las ventajas que esta tecnología presenta es la posibilidad de poder extraer el plutonio junto con otros elementos, evitando así la cantidad de Pu puro extraído y disminuyendo con ello el riesgo de proliferación. Este proceso consiste en someter el combustible gastado a varias etapas consecutivas de extracción de solvente mediante disoluciones de ácido nítrico, separando en cada una de ellas diferentes componentes. Dependiendo de las etapas que se realicen y de los actínidos que se busque extraer, se distinguen diferentes variantes del proceso.

2.2.2.1.2 DIAMEX

El proceso denominado DIAMEX (Diamide Extraction), es un proceso de extracción de solvente que permite extraer actínidos y lantánidos a partir de los residuos generados por el proceso PUREX. El proceso, desarrollado en Francia, consta de 16 etapas divididas en cuatro categorías principales: extracción, incorporando el CNG a una solución ácida; dos etapas de depuración de la fase orgánica; y una etapa de separación, empleando ácido nítrico.

Esta tecnología ha sido muy desarrollada y probada en laboratorios, estando lista para su incorporación a la fase comercial, desarrollándose a escala de ingeniería.

2.2.2.1.3 TRUEX

TRUEX (Transuranic Extraction), es un proceso basado en PUREX, al igual que los anteriores, que se presenta como una alternativa al DIAMEX gracias al cual se pueden separar los elementos transuránicos (plutonio -Pu-, uranio -U-, americio -Am- y curio -Cm-) del combustible nuclear gastado, reduciendo significativamente la radioactividad de los residuos.

Este proceso se desarrolló en estados unidos a final del siglo XX, consistiendo en un proceso de extracción mediante solventes que logra separar los elementos citados anteriormente de la solución acida empleada. Este proceso cuenta con 20 etapas divididas en 4 categorías:

extracción, en la cual el CNG se incorpora a una solución ácida; depuración de la fase orgánica; separación, primero del Am y posteriormente del Pu; y varias etapas de limpieza del solvente [19]. Esta tecnología se ha probado en diversos laboratorios obteniéndose resultados muy satisfactorios.

2.2.2.2 Procesos pirometalúrgicos

Estos procesos tienen lugar en un medio seco, implican múltiples etapas y se basan en la extracción de isótopos mediante sales fundidas, como cloruros o fluoruros, o metales fundidos, como bismuto o aluminio [19]. Se diseñaron para aplicarse a combustibles metálicos, previéndose para reprocesar los combustibles de los reactores de IV generación.

Entre todos los procesos pirometalúrgicos, se describen a continuación los procesos de electro-refinación de Estados Unidos y de la Unión Europea, así como el proceso de extracción líquido-líquido en sales de fluoruro fundidas.

2.2.2.2.1 Electro-refinación - Estados Unidos

Con el fin de desarrollar un proceso que fuera viable económicamente, capaz de ser adaptado a multitud de materiales nucleares y eficaz operativamente produciendo la mínima cantidad de residuos posibles, investigadores del *Argonne National Laboratory (ANL)*, en Estados Unidos, diseñaron un proceso piroquímico de electro-refinación a finales del siglo XX. Actualmente hay dos versiones de este proceso, la primera solo reprocesa uranio y está actualmente disponible industrialmente; mientras que la segunda, solo disponible en fase de investigación, permite recuperar todos los elementos transuránicos.

El proceso comienza con la eliminación extracción de las celdas de combustible de sus varillas y su posterior troceado. Estos segmentos se introducen en un electro-refinador para separar los actínidos de los productos de fisión presentes en el combustible gastado. Posteriormente, el uranio puro se recoge en un cátodo de mandril sólido y la mezcla de plutonio, curio, neptunio, americio y algunos productos de fisión de tierras raras en un cátodo de cadmio líquido. Los productos restantes permanecen en la sal y la capa de cadmio debajo de la sal.

2.2.2.2.2 Electro-refinación – Unión Europea

El proceso europeo está diseñado para reprocesar el combustible metálico a través de la separación por electrorrefinación en un cátodo de aluminio en cloruro fundido. Este proceso se basa en el estadounidense, y ha sido desarrollado por los proyectos europeos EUROPART y ACSEPT, y ahora el proyecto SACSESS.

La ventaja del proceso de electrorrefinación de la UE en comparación con el de ANL es que la etapa de reducción anterior no es necesaria, ya que se basa puramente en la electrólisis sin ninguna etapa de extracción reductiva de sal/metal, y por lo tanto el proceso se simplifica. Al final de este proceso, los actínidos y el uranio se separan y recuperan.

2.2.2.2.3 Extracción líquido-líquido en sales de fluoruro fundidas

Este proceso, desarrollado por la *CEA Marcoule*, en Francia, tiene como objetivo separar los actínidos de los lantánidos con LiF-AlF_3 . Para ello, el combustible nuclear gastado se somete a un tratamiento térmico a 1100°C para eliminar el cesio y el rubidio y, posteriormente, los elementos restantes se someten a fluoración a $450\text{-}500^\circ\text{C}$ para eliminar el circonio en forma ZrF_4 . Una vez que estos elementos han sido eliminados de la mezcla, la etapa de extracción reductiva se lleva a cabo utilizando sales de fluoruro fundido.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 JUSTIFICACIÓN

Con el presente proyecto se va a justificar la necesidad de mantener en España la energía nuclear como parte del mix energético, tanto por razones técnicas de estabilidad del sistema como por razones económicas para evitar la escalada de la pobreza energética. Además, se va a demostrar la aceptabilidad social a esta tecnología, siempre y cuando se renueve la imagen anticuada de los cementerios nucleares gracias a la utilización de tecnologías más de vanguardia, desarrolladas en línea con la regla de las 4R. Estas tecnologías, al igual que el slogan medioambiental citado anteriormente, buscan optimizar el aprovechamiento de materias primas gracias el reprocesado y posterior reciclaje y reutilización de materiales, no solo en la fase convencional actual sino avanzando tendencias económicas de invertir en el nuevo modelo de reprocesado que permite separar más isótopos.

3.2 OBJETIVOS

Este proyecto se realiza con el fin de determinar la viabilidad económica del reprocesado avanzado como opción para la gestión de residuos y así poder mejorar la aceptabilidad social de la energía nuclear, empleando una estrategia que permite reutilizar parte del combustible nuclear gastado, reduciendo así el volumen de combustible que se lleva a deposición final.

Se realizan encuestas con el objetivo de evaluar el impacto de emplear un ciclo cerrado en vez del actual ciclo abierto en la estrategia española de gestión de residuos nucleares. La oposición pública es uno de los principales inconvenientes con los que se encuentra la energía nuclear y por ello es importante mejorarla para que las tecnologías nucleares puedan seguir desarrollándose.

3.3 *METODOLOGÍA*

Con el fin de analizar la viabilidad económica del reprocesado avanzado, se estima el incremento en el coste del reprocesado avanzado con respecto al reprocesado convencional. Dicha estimación se realiza a partir de los datos obtenidos en la tesis doctoral de Laura Rodríguez [23]. El objetivo es demostrar que el reprocesado avanzado podría ser una opción viable para la gestión de residuos en un futuro próximo, pasando a formar parte de las posibles estrategias españolas para la gestión de CNG.

El estudio de la aceptabilidad social se realiza mediante encuestas enviadas a diferentes segmentos de la población y su posterior análisis. Dicha encuesta se redacta con el objetivo de preguntar de forma indirecta sobre la preferencia de la población encuestada entre una gestión de residuos nucleares con ciclo abierto o dicha gestión en ciclo cerrado. Para obtener este análisis se diseña una encuesta CAWI (*Computer Assisted Web Interviewing*) que consta de las siguientes cinco preguntas.

- P1. ¿Qué opinión tiene sobre la Energía Nuclear?
- P2. ¿Mejoraría su opinión si no se produjesen residuos?
- P3. ¿Le parece bien que los residuos se almacenen de forma definitiva en un almacén subterráneo controlado y con las medidas de seguridad necesarias
- P4. ¿Mejoraría su opinión si se reciclasen los residuos en vez de almacenarse?
- P5. ¿A qué franja de edad corresponde?

3.4 *ALINEACIÓN CON LOS ODS*

El desarrollo sostenible es aquel capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las posibilidades de futuras generaciones. Con el fin de alcanzar dicho desarrollo, se crearon los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que son 17 objetivos globales que tienen en cuenta tres aspectos: social, medioambiental y económico [26].

El presente proyecto se relaciona directamente con el plano medioambiental y dentro de los objetivos que pertenecen a él, con el **ODS-13: Acción por el clima**. Este ODS busca incorporar medidas contra el cambio climático en estrategias nacionales y mejorar la mitigación del cambio climático. El presente proyecto plantea la necesidad de establecer una estrategia para la gestión de residuos radiactivos en España y propone la energía nuclear como tecnología para producción de electricidad sin emisiones de GEI, ayudando a mitigar el cambio climático.

Otro de los objetivos clave relacionados con el proyecto es el **ODS-7: Energía asequible y no contaminante**. La energía nuclear genera cada año alrededor de 60.000 GWh, lo que supone más del 20% de la electricidad consumida en España, convirtiéndose en la mayor fuente de energía libre de emisiones de CO₂. Además, la producción eléctrica en centrales nucleares garantiza el suministro eléctrico las 24 horas todos los días del año y operan en base (dando estabilidad a la red eléctrica). Además, no emiten gases de efecto invernadero, lo que la convierte sin duda en un punto clave para obtener energía de forma asequible, puesto que ayudan a regular los precios de la electricidad, y sin contaminar la atmósfera, lo que genera un alto valor a la sociedad.

Capítulo 4. ESTUDIO VIABILIDAD ECONÓMICA

A la hora de decantarse por una estrategia de gestión del combustible nuclear gastado u otra, son muchos los factores a tener en cuenta. Entre ellos destacan el social, analizado en el Capítulo 5. , el medioambiental, el técnico y el económico. En este capítulo se analizará la viabilidad económica del ciclo cerrado avanzado, siendo el aspecto económico un aspecto crucial a la hora de decidir una estrategia nacional, aunque en muchas ocasiones debería darse más importancia a otros aspectos que a este.

Las tecnologías de reprocesado avanzado, que permitirían poder crear una estrategia de ciclo cerrado avanzado, están aún en fase de desarrollo y, aunque ya se han demostrado sus ventajas, el coste asociado a la implementación de esta tecnología novedosa para poder gestionar el CNG todavía no está fijado. Son varios los estudios que consideran que el precio del reprocesado avanzado, en función de los isótopos que se separen para reciclarse además del uranio y el plutonio, sería entre un 5% y un 15% mayor que el del reprocesado actual.

Sin embargo, la posibilidad que brinda el reprocesado avanzado de obtener elementos que se pueden vender como materias primas, podría hacer de esta estrategia la más exitosa, puesto que, al no reutilizar los materiales extraídos (a parte del U y Pu) en el reprocesado convencional, hay una falta de aprovechamiento económico que se saldaría con las nuevas tecnologías de reprocesado avanzado.

4.1 *MODELO MARIÑO*

El modelo se desarrolla con el fin de estimar los costes asociados a diferentes tecnologías de gestión de CNG mediante la técnica del Valor Actual Neto (VAN) y así poder estudiar la diferencia en costes entre diferentes escenarios.

La técnica del cálculo de los costes se establece como el cálculo de los costes normalizados a través de la definición del sumatorio de los costes descontados (flujos de caja) divididos por la producción total de electricidad [23].

El modelo, desarrollado en MATLAB, cuenta con cuatro etapas: estimación de las fechas futuras de recargas de los reactores y del inventario final de CNG -1-, cálculo del flujo de materiales anual -2-, cálculo de los costes -3- y estimación de la producción de electricidad futura de las plantas nucleares -4-.

Por último, para cada instalación de gestión del combustible nuclear gastado se establecen tres tipos de costes: inversión, operación y mantenimiento, y desmantelamiento. Además de éstos, habrá un coste de carga en contenedores desde las piscinas, el coste de los contenedores y los costes de transporte entre las diversas instalaciones.

4.2 HIPÓTESIS CONSIDERADAS

Para realizar el estudio se consideran las siguientes hipótesis:

- No se realiza ningún pago por el Pu obtenido.
- Se establece un reprocesado avanzado en el que se extrae, aparte de U y Pu, lantánidos y actínidos.
- Los lantánidos y actínidos obtenidos del reprocesado pasarían a considerarse materias primas que pueden ser introducidas al mercado obteniendo de ello un beneficio.

Para la realización del estudio de viabilidad económica, se obtienen los resultados publicados del empleo del modelo Mariño desarrollo en la tesis doctoral de Laura Rodríguez [23]. Se parte del estudio de sensibilidad que se observa en la Tabla 1, aplicándoles las hipótesis definidas anteriormente para obtener resultados con respecto al reprocesado avanzado, el cual no se consideraba en dicha tesis doctoral.

<i>Coste</i>	<i>-50%</i>	<i>0%</i>	<i>50%</i>
ATIS	12.793,45 M€	12.820,68 M€	12.847,90 M€
ATC	12.539,90 M€	12.820,68 M€	13.101,45 M€
AGP	12.648,65 M€	12.820,68 M€	12.992,70 M€
Transporte	12.476,93 M€	12.820,68 M€	13.164,42 M€
Contenedores	12.741,02 M€	12.820,68 M€	12.900,33 M€

Reprocesado	7.506,56 M€	12.820,68 M€	18.134,79 M€
Reprocesado Pu 0	5.735,19 M€	9.277,93 M€	12.820,68 M€

Tabla 1. Análisis de sensibilidad obtenido del modelo Mariño.

Una de las simplificaciones que se va a tener en cuenta en este proyecto es considerar tanto al plutonio como al uranio reprocesado como materias primas que pueden ser vendidas en los mercados energéticos internacionales. No se considera la opción de tener que dar una contraprestación económica para que cualquier otro estado miembro de la Unión Europea se quede con el plutonio. Por tanto, de la Tabla 1 se selecciona la fila correspondiente al precio del plutonio igual a cero (última fila). En este análisis de sensibilidad se estudia el caso base (0%) y los casos de +/- 50%, observando una tendencia lineal en la variación del precio del reprocesado. En base a esta tendencia lineal, partiendo del caso base equivalente a 9.277,93 M€ y la horquilla de sobrecostes porcentuales del reprocesado obtenida de estudios previos realizados por otros equipos de investigación, se estudia el precio del reprocesado avanzado como muestra la Tabla 2.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De todos los estudios previos realizados por otros equipos de investigación consultados, se obtiene un intervalo para el sobrecoste del reprocesado avanzado con respecto al reprocesado convencional actual de un 5-15% de mayoración. Con este punto de partida y las hipótesis mencionadas en el anterior apartado se obtienen los sobrecostes y los costes totales del reprocesado avanzado para un incremento del 5%, 10% y 15%. Este incremento en el coste es algo variable puesto que, al ser una tecnología comercial, depende de las negociaciones que se lleven a cabo con las empresas involucradas.

	0%	5%	10%	15%
Incremento en el coste	-	354,27 M€	708,55 M€	1.062,82 M€
Coste total	9.277,93 M€	9.632,21 M€	9.986,48 M€	10.340,75 M€

Tabla 2. Análisis de costes del reprocesado avanzado con respecto al coste del actual reprocesado.

Con el fin de poder analizar la tendencia del coste se realiza el gráfico de dispersión que se puede apreciar en la **Figura 3**.

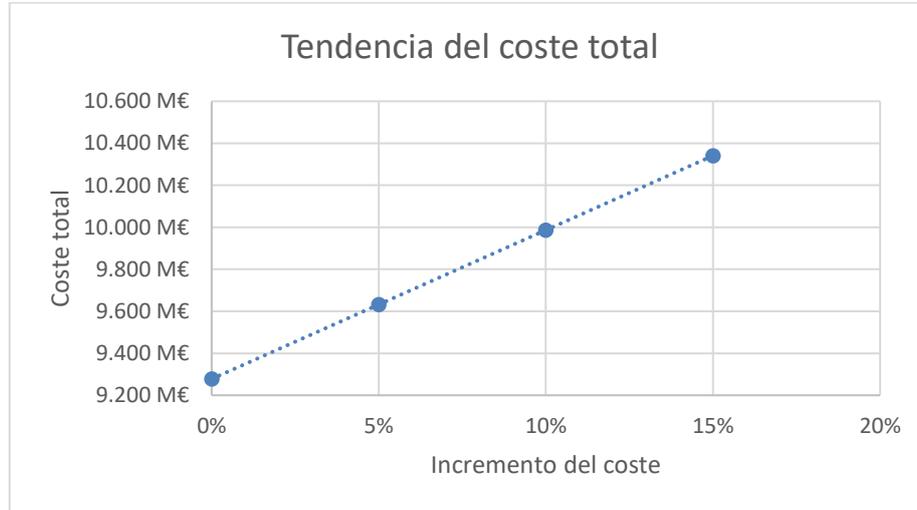


Figura 3. Tendencia del coste del reprocesado avanzado

Aunque este es un coste aproximado, se debe tener en cuenta que este sobrecoste, en gran medida, se va a compensar con la venta de las materias primas recicladas, con la disminución del volumen de residuos que retornan a los países que enviaron su CNG a plantas de reprocesado avanzado (así como la disminución de la radioactividad de estos, lo que reduce también las exigencias radiológicas a la hora de diseñar los AGPs y los ATCs), y con la reducción de transporte derivada de la reducción en el volumen de los residuos. Con el fin de analizar el impacto de las reducciones en costes de las diferentes etapas de gestión del CNG gracias a las ventajas ofrecidas por el reprocesado avanzado, se recogen las estimaciones de dichas reducciones en la Tabla 3.

	<i>ATC</i>	<i>AGP</i>	<i>Transporte</i>
Disminución en el coste	3%	1%	1%

Tabla 3. Análisis de la reducción en costes de las etapas de la gestión del CNG.

Capítulo 5. ACEPTABILIDAD SOCIAL

Uno de los grandes impedimentos con los que se encuentra la energía nuclear es la opinión pública sobre esta tecnología. La toma de decisiones que incluye aspectos nucleares es muy cuestionada por la sociedad y con tintes políticos, lo que hace difícil establecer una estrategia clara sobre la gestión de residuos nucleares. Esta también es una de las razones por las que el proyecto de ATC, diseñado para entrar en funcionamiento hace más de una década, no haya comenzado aún. Es por ello por lo que, mejorar la opinión pública con relación a la energía nuclear es un aspecto primordial para que esta tecnología pueda seguir desarrollándose.

Son varios los estudios que han definido tres principales razones para la oposición social: riesgo a la proliferación de armas nucleares, accidentes nucleares y gestión de residuos nucleares [13]. La implementación de un ciclo cerrado avanzado mejoraría la opinión respecto a dos de esos tres aspectos:

- Riesgo a la proliferación de armas nucleares. En el ciclo abierto, este riesgo reside en el enriquecimiento del uranio, puesto que los reactores nucleares empleados en las centrales emplean uranio enriquecido, además de en la posible utilización del CNG para obtener Pu. Enriquecer uranio hasta obtener una concentración suficiente es una tecnología que puede ser empleada para la creación de armas nucleares de no llevar el control exhaustivo requerido [21]. Por otro lado, en el ciclo cerrado, el riesgo reside en que, al separar el uranio y el plutonio del resto de componentes, el plutonio obtenido resulta ser muy atractivo para la creación de este tipo de armas. El proceso de reprocesado PUREX logra recuperar casi el 100% del Pu contenido en el combustible, lo que supone aproximadamente un cuarto de tonelada de plutonio [27] por cada 1000 MWe – PWR anuales. Esta masa es equivalente a 31 SQs (*Significant Quantity*) que es una unidad empleada por la IAEA para hacer referencia a cuándo no se puede descartar que se esté manejando un explosivo nuclear. Sin embargo,

procesos de reprocesado avanzado, como el UREX, evitan la proliferación haciendo que el plutonio permanezca en una disolución y evitando así obtener Pu puro [21].

- Gestión de residuos nucleares: en el ciclo abierto el combustible nuclear gastado se considera un residuo y se almacena temporalmente hasta ser trasladado a su disposición final. Sin embargo, en el ciclo cerrado, este CNG se considera un recurso, siendo recuperado para su reutilización en los reactores. Siendo la economía circular uno de los motores que impulsa el desarrollo sostenible, poder recuperar materiales con alta capacidad energética para poder ser reutilizados es algo clave para decantar la balanza hacia el uso de la energía nuclear. Independientemente del combustible empleado para la producción de energía, es necesario consumir unos recursos naturales (recursos hídricos, terreno, minerales y otras materias primas, etc) igual que es inevitable que como resultado de este uso se produzcan residuos. El problema actual con los residuos nucleares probablemente también ocurrirá con los residuos de la producción de energías renovables. Cabe esperar que los equipos y la infraestructura queden obsoletos en el transcurso de algunos años, siendo necesario abordar la gestión de los residuos al finalizar su vida útil. Por tanto, el objetivo de cualquier fuente de energía debe ser optimizar al máximo el empleo de materias primas y establecer un plan de gestión para los residuos producidos a los que no se les puede dar más uso.

Para poder analizar el impacto de cambiar de la actual gestión de residuos española, basada en un ciclo abierto, a una estrategia de ciclo cerrado, se elaboró una encuesta donde se preguntó de forma indirecta si cambiaría la opinión del encuestado de poder reutilizar los residuos nucleares. Esta encuesta consta de cuatro preguntas más una última para determinar el rango de edad del encuestado. Las preguntas, así como el análisis de las respuestas y la ficha técnica de la encuesta, se describen a continuación.

5.1 FICHA TÉCNICA DE LA ENCUESTA REALIZADA

Opciones	Respuestas (%)
Nombre del proyecto de investigación	Percepción de la energía nuclear.
Universo	Encuesta dirigida a hombres y mujeres mayores de edad y residentes en España.
Objetivo de estudio	Analizar si el ciclo cerrado para la gestión de residuo nuclear frente al ciclo abierto actual mejoraría la aceptabilidad social de la energía nuclear.
Tipo de muestra	Aleatoria simple.
Fecha de realización	Encuesta abierta desde el día 28/06/2021 hasta el día 21/07/2021.
Tamaño de muestra	Se han completado 423 encuestas, ponderando los resultados para que sea representativo por sectores de edad.
Método de recolección de datos	Encuesta CAWI (Computer Assisted Web Interviewing).

Tabla 4. Ficha técnica de la encuesta realizada.

5.2 POBLACIÓN ENCUESTADA

La población encuestada se divide en tres grupos de edad:

- Menores de 30 años: Esta franja de edad ha ido dirigida mayoritariamente a estudiantes de ingeniería de todos los niveles académicos y recién egresados. Por tanto, es población con buena formación técnica y con capacidad de entender la diferencia entre un ciclo abierto (a lo que se hace referencia indirectamente en la tercera pregunta de la encuesta) y un ciclo cerrado (referenciado indirectamente en la cuarta pregunta). Son personas jóvenes, a los que la aplicación de tecnología para el desarrollo sostenible del combustible nuclear gastado les convence como una solución para continuar usando la energía nuclear como se observará a continuación en el análisis de los resultados.

- Entre 30 y 50 años: Dirigido a todo tipo de personas, no expertos en la materia, pero sí con cualificación. Por tanto, es población en activo capaces de cambiar su opinión sobre el uso de la energía nuclear si se dan opciones técnicas modernas.
- Mayores de 50 años: Representan más de la mitad de las respuestas recogidas. Está dirigido a población general, sin opción a identificar el grado de cualificación. En base a los contactos a los que se ha enviado la encuesta, se puede estimar un nivel de cualificación alto, al igual que ocurre con la franja media de edad.

5.3 PREGUNTAS Y RESPUESTAS OBTENIDAS

Como se ha mencionado anteriormente, la encuesta consta de un total de cinco preguntas, siendo la última la que establece el rango de edad del encuestado. A continuación, se exponen las preguntas de las que se compone la encuesta y sus correspondientes respuestas.

En el ANEXO I se pueden consultar todas las respuestas individuales obtenidas.

5.3.1 ¿Qué opinión tiene sobre la Energía Nuclear?

En la Tabla 5 se reúnen las respuestas obtenidas para esta primera pregunta de la encuesta. De esta primera pregunta, como se puede observar en la Figura 4, se puede afirmar que más del 70% de la población tiene una percepción positiva de la energía nuclear.

Opciones	Respuestas (%)	Respuestas (n°)
Excelente	26%	109
Buena	45%	189
Mala	17%	74
Muy mala	5%	20
- Indiferente	7%	31
	100%	423
	Omitidas:	0

Tabla 5. Respuestas obtenidas para la pregunta 1 de la encuesta.

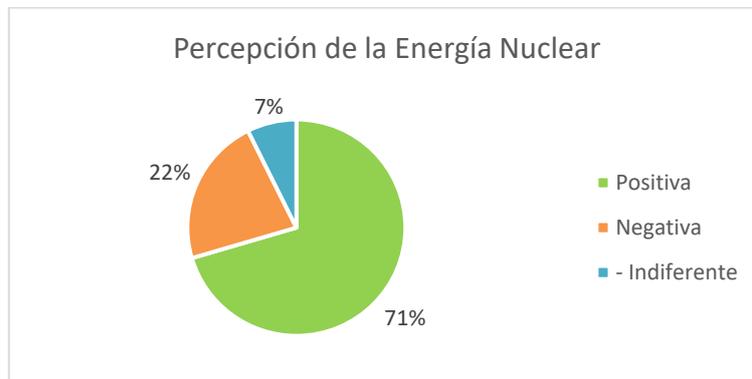


Figura 4. Gráfico de percepción de la energía nuclear

5.3.2 ¿Mejoraría su opinión si no se produjeran residuos?

En la Tabla 6 se reúnen las respuestas obtenidas para esta segunda pregunta de la encuesta. A partir de esta segunda pregunta, como se puede observar tanto en la Tabla 6 como en su representación gráfica de la Figura 5, se puede afirmar que más del 90% de la población cambiaría su percepción hacia la energía nuclear de resolverse la problemática de los residuos.

Opciones	Respuestas (%)	Respuestas (n°)
Sí	91%	384
No	9%	39
	100%	423
	Omitidas:	0

Tabla 6. Respuestas obtenidas para la pregunta 2 de la encuesta.

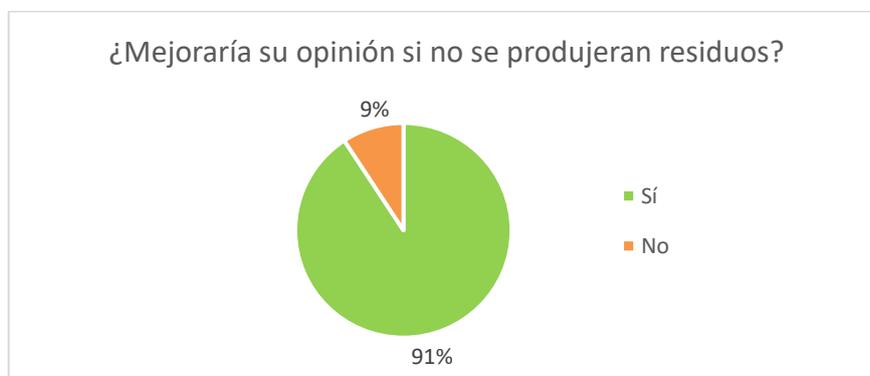


Figura 5. Gráfico de cambio de percepción de la energía nuclear de no producirse residuos

5.3.3 ¿Le parece bien que los residuos se almacenen de forma definitiva en un almacén subterráneo controlado y con las medidas de seguridad necesarias?

En la Tabla 7 se reúnen las respuestas obtenidas para la tercera pregunta de la encuesta. Con esta pregunta se puede afirmar que, a priori, no es un inconveniente el ciclo abierto para el 64% de la población.

Opciones	Respuestas (%)	Respuestas (n°)
Sí	64%	269
No	36%	151
	100%	420
	Omitidas:	3

Tabla 7. Respuestas obtenidas para la pregunta 3 de la encuesta.

5.3.4 ¿Mejoraría su opinión si se reciclasen los residuos en vez de almacenarse?

En la Tabla 8 se reúnen las respuestas obtenidas para la cuarta pregunta de la encuesta. Se puede concluir con esta última pregunta que el ciclo cerrado convencería al 93% de la población, frente al 64% al que le convence el ciclo abierto, como se vio en la Tabla 7.

Opciones	Respuestas (%)	Respuestas (n°)
Sí	93%	392
No	7%	29
	100%	421
	Omitidas:	2

Tabla 8. Respuestas obtenidas para la pregunta 4 de la encuesta.

5.3.5 ¿A qué franja de edad pertenece?

En la Tabla 9 se reúnen las respuestas obtenidas para la quinta y última pregunta de la encuesta, relacionadas con la franja de edad perteneciente. En la Figura 6 se representa la población según si es estudiante o profesional, considerando estudiantes los menores de 30

años y profesionales al resto de franjas horarias. Esta estimación se ha realizado teniendo en cuenta el público al que se le ha mandado la encuesta.

Opciones	Respuestas (%)	Respuestas (nº)
Menor de 30 años	27%	113
Entre 30 y 50 años	27%	114
Mayor de 50 años	46%	196
	100%	423
	Omitidas:	0

Tabla 9. Respuestas obtenidas para la pregunta 5 de la encuesta.

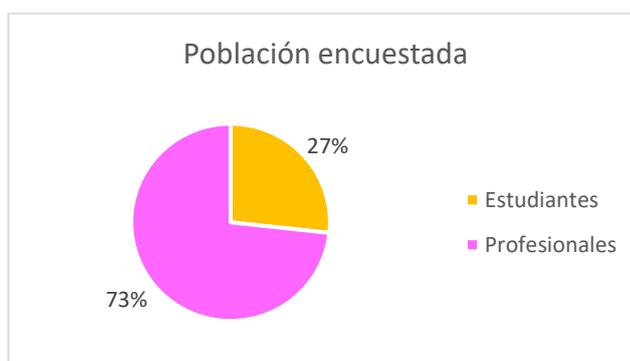


Figura 6. Gráfico de la población encuestada considerando estudiantes o profesionales.

5.4 ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS

Para una mejor interpretación de los resultados, se ha considerado las cuotas de edad. Con ello se busca que la población encuestada sea representativa a la población nacional. Para ello, se obtienen los datos de habitantes de cada franja de edad de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) y se hace una ponderación entre estas proporciones y las proporciones obtenidas de los resultados de la encuesta. Esta ponderación resulta en los datos recogidos en la Tabla 10. El objetivo de este ejercicio es que se mantenga la proporción de población de cada rango de edad en la población encuestada con respecto a la población española actual.

<i>Rango de edad</i>	<i>Población INE</i>	<i>Población encuestada</i>	<i>Ponderación</i>	<i>Población encuestada equivalente</i>
18-29	5.879.514	113	0,56	64
30-49	13.757.322	114	1,30	149
>50	19.505.013	196	1,08	211
TOTAL	39.141.849	423	1,00	424

Tabla 10. Resultados obtenidos de ponderar las respuestas en función de cuotas de edad.

Una vez realizada la ponderación de las respuestas, se estudian por rangos de edad todas las preguntas obteniéndose los siguientes gráficos.

Para complementar el gráfico de barras de la Figura 7 con todas las respuestas de la primera pregunta, se crean gráficos de círculos por grupos de edades donde se puede observar la percepción que tiene la población sobre la energía nuclear, clasificándose en positiva, negativa o indiferente. Se considera positiva las respuestas “buena” y “muy buena”; mientras que, la percepción negativa se asigna a las respuestas “mala” y “muy mala”. En la Figura 8, correspondiente a los menos de 30 años, y en la Figura 10, correspondiente a los mayores de 50 años, se observa como los porcentajes son idénticos; siendo más negativos en el rango de edades intermedio como muestra la Figura 9. El hecho de que el rango de edades intermedio tenga una percepción ligeramente peor que el resto de rangos puede ser dado a que es población activa a la que los retos de la sostenibilidad que afrontamos en la actualidad les despierta interés y que consideran que la energía nuclear aún tiene que avanzar en su gestión de residuos para poder ser sostenible.

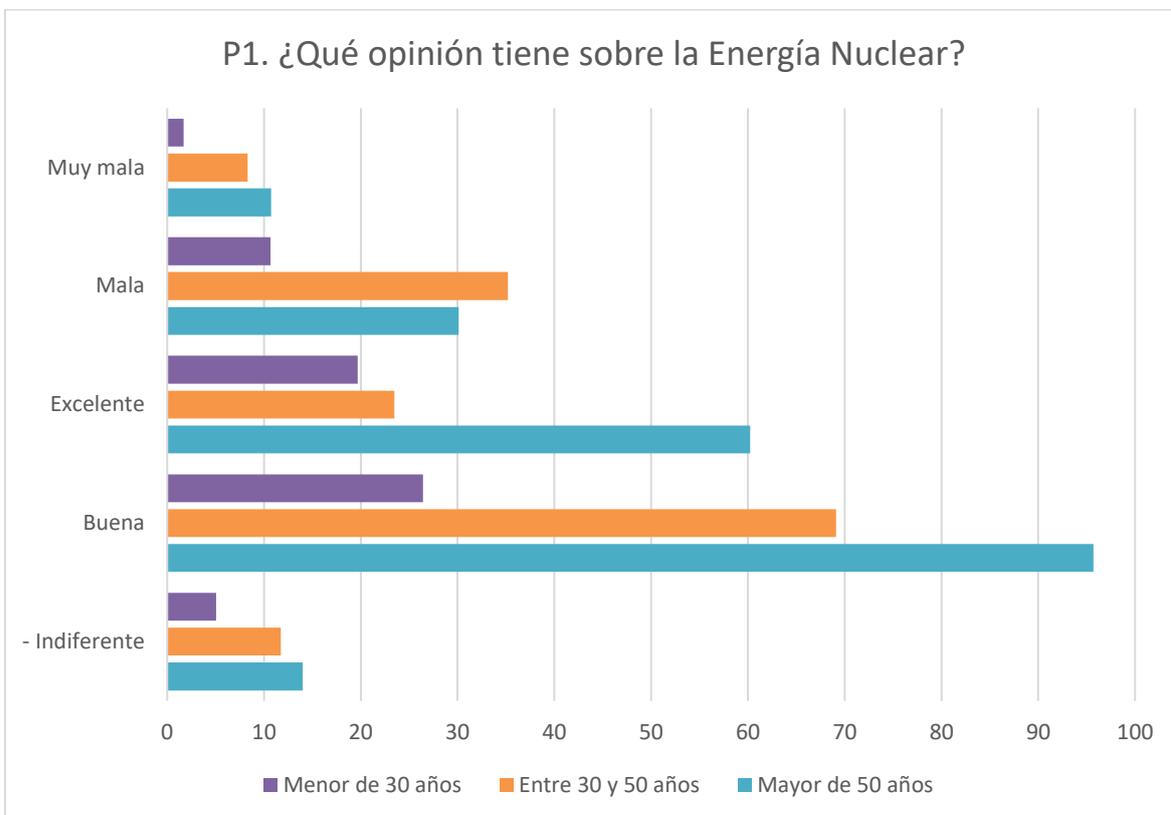


Figura 7. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta en función del rango de edades.



Figura 8. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta para el rango de edad: < 30 años.

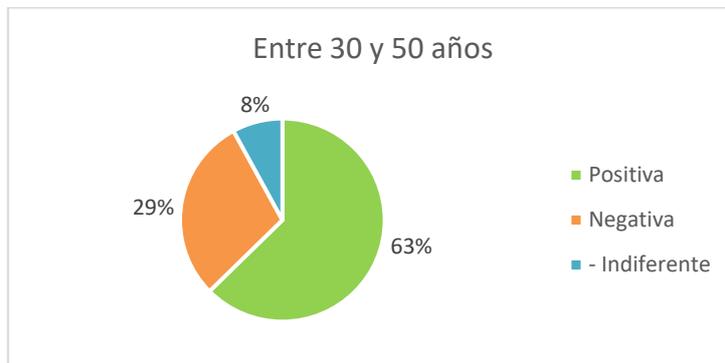


Figura 9. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta para el rango de edad: 30 < 50 años.

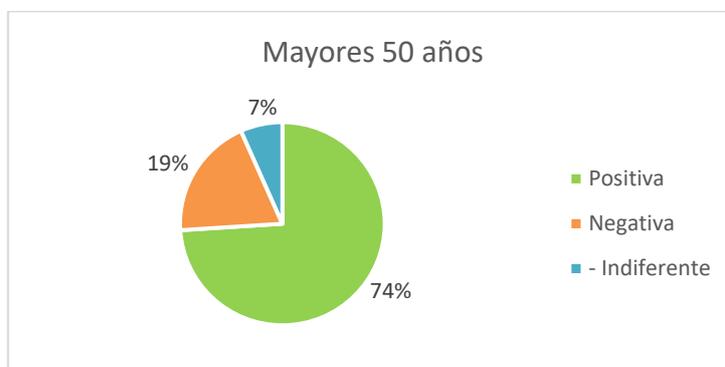


Figura 10. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta para el rango de edad: > 50 años.

En la Figura 11, que recoge el número de respuestas afirmativas y negativas de cada rango de edad, se puede observar como la proporción entre ambas es similar para todos los grupos de edades. Para comprobar este hecho, se realizan gráficos de círculos paWhenra cada rango de edad, observándose idénticas proporciones entre los dos primeros rangos en la Figura 12 y la Figura 13. Sin embargo, el porcentaje de personas que declaran que su opinión no variaría si no se produjeran residuos se duplica para el último grupo de edades, como se muestra en la Figura 14. Siendo el grupo más adulto, cabe entender que en este rango de edad la opinión acerca de la energía nuclear, positiva o negativa, está muy arraigada y no influye tanto un cambio en la tecnología que permitiera reducir los residuos como a los más jóvenes. Esto puede ser debido también a que la sostenibilidad y la búsqueda de una economía circular que permita optimizar el empleo de residuos y reducir al máximo los desperdicios, es un concepto más novedoso y que ha calado mucho más en la población joven que es consciente de que pueden liderar el cambio.

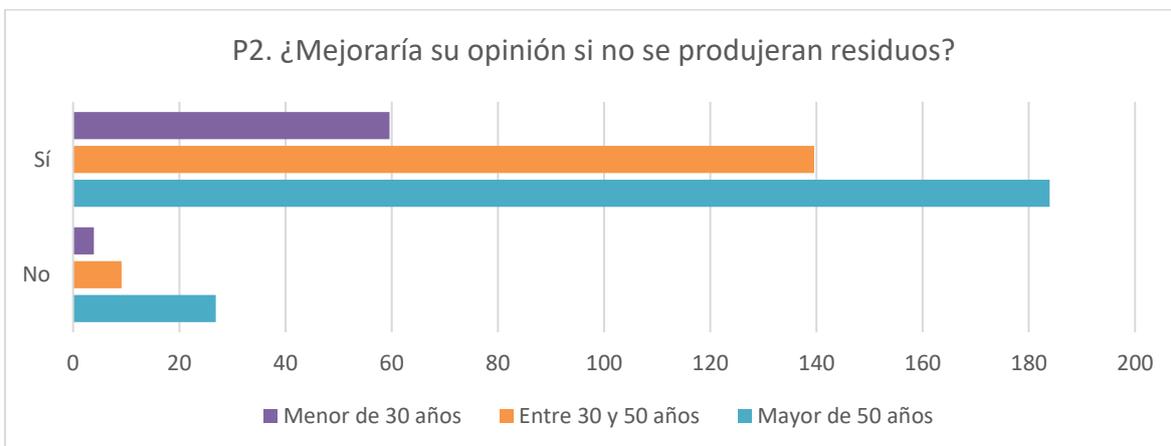


Figura 11. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta en función del rango de edades.



Figura 12. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta para el rango de edad: < 30 años.



Figura 13. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta para el rango de edad: 30 < 50 años.

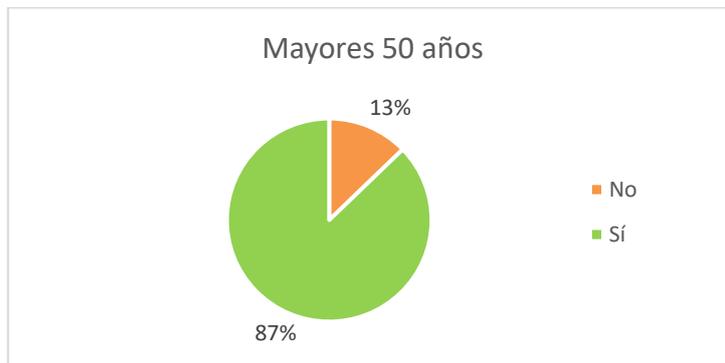


Figura 14. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta para el rango de edad: > 50 años.

La pregunta tres hace referencia a la opinión de la población respecto a la gestión de residuos nucleares siguiendo una estrategia de ciclo abierto. Para preguntar de forma indirecta esta opinión, se decide hacer referencia al almacenamiento definitivo de los residuos, siempre bajo los estándares de control requeridos. En la Figura 15 se reúnen todas las respuestas obtenidas a esta pregunta, obteniendo una mayoría de entorno el 60% para todos los grupos de edad.

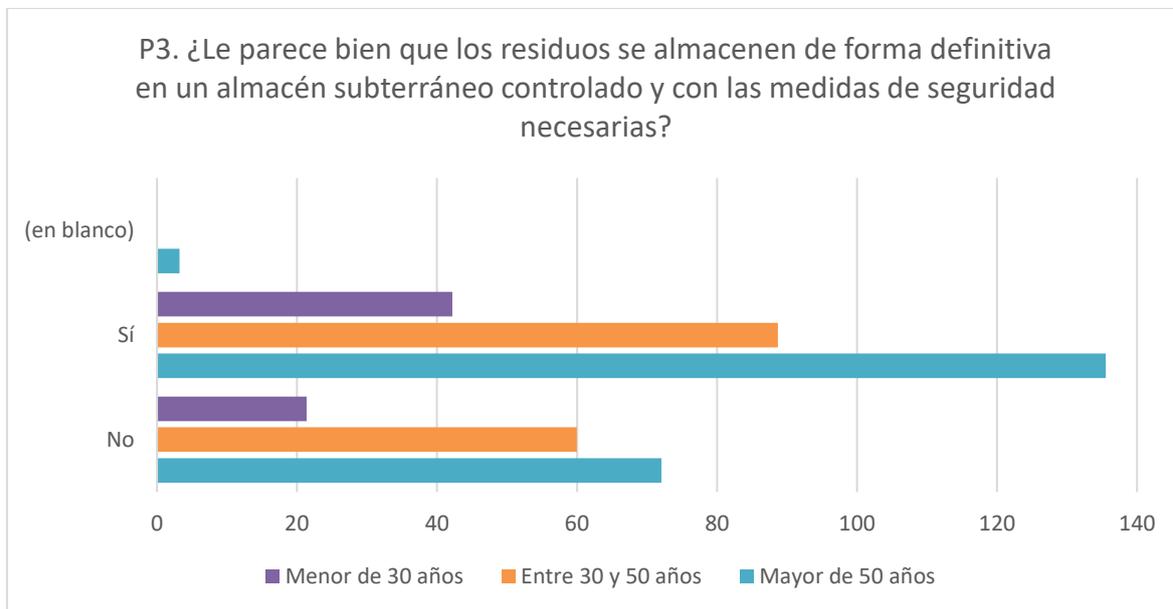


Figura 15. Respuestas a la pregunta 3 de la encuesta en función del rango de edades.

Por último, se pregunta de forma indirecta respecto a una gestión de residuos de ciclo cerrado, haciendo referencia al reciclado de los residuos que esta permite. La Figura 16 representa en número de respuestas afirmativas y negativas de los diferentes grupos de edad.

Se puede observar cómo el 92-93% de la población tendría una mejor percepción de la energía nuclear si se pudieran reciclar los residuos en vez de simplemente almacenarse como ocurre en el ciclo abierto. Esta respuesta apoya la afirmación de diversos estudios de que la gestión de residuos es uno de los mayores problemas de la energía nuclear puesto que, tan solo el 7% de la población cree que su percepción no mejoraría de poder reducir los residuos generados.

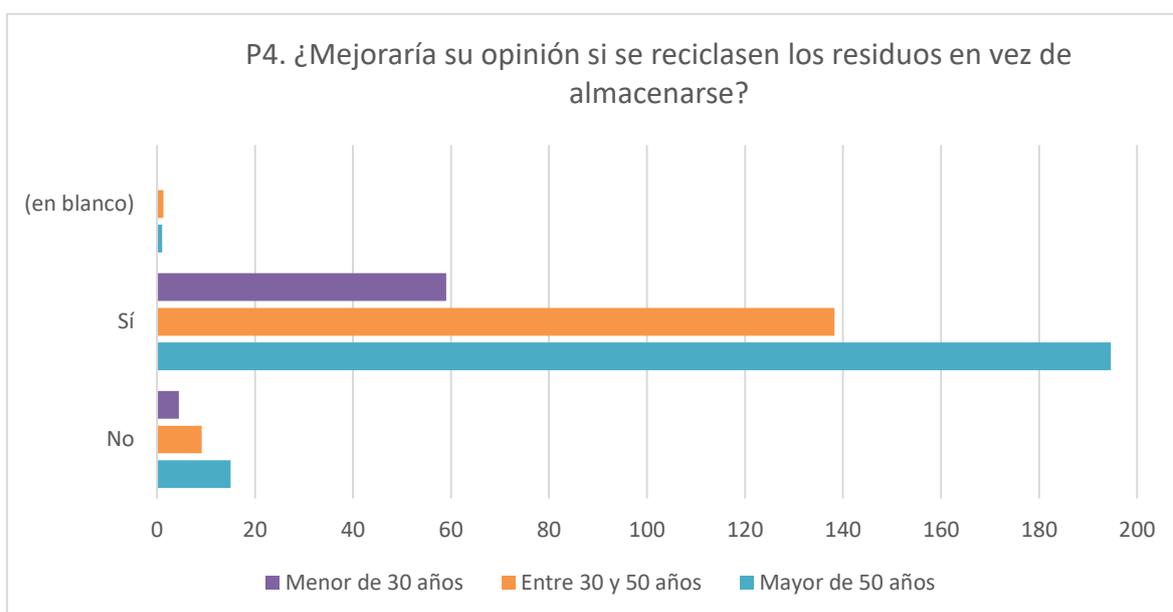


Figura 16. Respuestas a la pregunta 4 de la encuesta en función del rango de edades.

5.5 CONCLUSIONES DERIVADAS DEL ANÁLISIS

Con el análisis de la tercera pregunta se puede afirmar que el ciclo abierto no convence ni siquiera a todos los que están a favor de emplear la energía nuclear (64% frente al 71%). Esta conclusión se apoya en la Figura 4, donde se observa que el 71% de la población se declara a favor de la energía nuclear, y en la Tabla 7, en la cual se observa que al 64% de la población le parece bien el almacén directo de residuos.

Por otro lado, del análisis de la cuarta pregunta se puede concluir que el empleo de un ciclo cerrado como estrategia para la gestión de residuos nucleares reduce significativamente la percepción negativa que tiene la población sobre la energía nuclear. Esta afirmación se apoya

en que el 22% de la población tiene una opinión negativa a cerca de esta fuente de energía (dato obtenido Figura 4) y tan solo el 7% de la población declara que el uso de esta estrategia de gestión de CNG no mejoraría su percepción a cerca de la energía nuclear (dato obtenido de la Tabla 8). Cabe destacar que dentro de este 7% que no vería su opinión alterada, un 5% tenía una opinión “muy mala” acerca de la energía nuclear, lo que hace pensar que esta oposición es una oposición ideológica más que fundamentada en realidades tecnológicas. En esta línea, tan solo un 2% de los jóvenes menores de 30 declararon tener una opinión “muy mala” de la energía nuclear, lo que, unido al hecho de que este rango de edad está compuesto en su mayoría por estudiantes de ingenierías, da a entender que los jóvenes formados en esta área, con una opinión fundamentada en aspectos técnicos a priori, no presentan tanta oposición hacia esta tecnología como las personas adultas.

Por último, no se puede valorar a partir de las preguntas realizadas si alguna de las personas a los que no les convence el ciclo abierto basan esta opinión en una argumentación económica debida al sobre coste que este ciclo conlleva.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El cese total de las centrales nucleares españolas es una acción irreversible, puesto que no sería viable económicamente abrir nuevas centrales nucleares una vez clausuradas todas las que están operativas actualmente. Es por ello por lo que debe ser una decisión premeditada y que sopesa todas las consecuencias. Aunque Europa está dividida en cuestión de energía nuclear, hay dos grandes países que ya han establecido una estrategia definitiva: Alemania y Francia. Por una parte, Alemania ha optado por cerrar todos sus reactores nucleares, alcanzando este objetivo a finales del año 2022 y basando su sistema de red eléctrica en energías renovables y centrales de gas, aunque mantiene varias centrales de carbón. Este país defiende que hay que inclinarse hacia una integración de la red eléctrica europea y así evitar posibles pérdidas de estabilidad de la red. Por otro lado, Francia se considera el país exportador de energía por referencia en la Unión Europea y basa su mix energético en la tecnología nuclear, siendo la energía nuclear la responsable del 77% de la producción eléctrica en dicho país. En Francia aseguran que mantener la energía nuclear como base de su mix energético en las próximas décadas es la mejor forma de ir hacia una sociedad descarbonizada porque de cerrar dichas centrales, sería necesario abrir centrales eléctricas de carbón y gas, como han hecho otros países, e importar energía de carbono, lo que no permitiría llegar a la descarbonización total del sistema eléctrico.

Con el contexto actual europeo y el estudio realizado en el presente proyecto, se ha demostrado que la tecnología nuclear es una tecnología clave para seguir con un sistema eléctrico estable y sin reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto hace que sea muy recomendable mantener las centrales nucleares españolas en operación, asegurando el suministro eléctrico las 24h del día, alineándose con el reto de alcanzar una sociedad descarbonizada, sin poner en peligro los avances tecnológicos e industriales debido a probables cortes de suministro de forzar su cierre. La disponibilidad, la fiabilidad, la estabilidad y la predictibilidad que ofrece posibilita una adecuada gestión del sistema eléctrico.

Al continuar en investigación el reprocesado avanzado y existir varias posibilidades de desarrollo comercial, no se puede analizar con exactitud el impacto económico, aunque, a la vista de los resultados del modelo sí se puede apreciar que la tendencia sería una subida mínima del coste.

De las encuestas realizadas se puede concluir que, en un grupo con formación media-alta, no necesariamente expertos ni relacionados con el tema de estudio, el hecho de cambiar la gestión de los residuos nucleares haciendo un uso sostenible de los mismos mejoraría significativamente la percepción de la sociedad sobre la energía nuclear. Esto se logra tanto con el reprocesado comercial actual como con el reprocesado avanzado, el cual permite reciclar aún más cantidad de componentes y obtener materiales de mayor calidad, así como reducir tanto el volumen de los residuos como la radioactividad de los mismos. Con tecnologías de ciclo cerrado se replantearía el uso de la energía nuclear convirtiéndola en una tecnología sostenible, a la vez que se mantienen sus ventajas características como ser una fuente de energía barata, sin emisiones de CO₂, que ayuda a la estabilidad del sistema y que permite estabilizar la factura de la luz.

Según se vayan consolidando las distintas investigaciones relativas al reprocesado avanzado y concretando los diferentes isótopos que se puedan ir extrayendo, se podría, mediante la utilización del mismo modelo Mariño, hacer el cálculo exacto de los costes en cada uno de los modelos que se presentasen.

En línea de la aceptabilidad social, para complementar el estudio realizado se propone ampliar el espectro de la encuesta preguntando la provincia de residencia, pudiendo así realizar un análisis proterritorios.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bataille C, Waisman H, Colombier M, Segafredo L, Williams J. The Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP): insights and emerging issues. *Climate Policy*. 2016;16(sup1): S1-S6.
- [2] Koningstein R, Fork D. Energy's creative destruction. *IEEE Spectrum*. 2014;51(12):30-5
- [3] Clarke et al., Chapter 6: Assessing Transformation Pathways. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*". United Kingdom, 2014.
- [4] European Commission S-G. Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. *The European Green Deal*. OM/2019/640 final ed2019.
- [5] Centre ECJR. Technical assessment of nuclear energy with respect to the ‘do no significant harm’ criteria of Regulation (EU) 2020/852 (‘Taxonomy Regulation’). 2021.
- [6] Yoshikawa S, Tanaka M, Shekdar AV. Global trends in waste generation. *Recycling, waste treatment and clean technology*. 2005: 1541-1552.
- [7] Red Eléctrica de España. Acceso online: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion> (Accedido el 02/08/2021).
- [8] Shah TR, Ali HM. Applications of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations and challenges: A critical review. *Solar energy*. 2019; 183: 173-203
- [9] Red Eléctrica de España. Acceso online: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/potencia-instalada> (Accedido el 02/08/2021).

- [10] Foro Nuclear. Acceso online: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-espana/> (Accedido el 27/07/2021).
- [11] V. Casajús Díaz, J. M. Moreno Mellado, J. A. Gago Bádenas, B. Y. Moratilla Soria, M. Martín Ramos, M. Navarro Santos. *La Estrategia Española en la Gestión del Combustible Nuclear Usado*, Cortes Generales. Madrid: Congreso de los Diputados, 2018.
- [12] OECD/NEA, Public Attitudes to Nuclear Power, NEA#6859, 2010.
- [13] Richard L. Garwin (2001) Can the world do without nuclear power? Can the world live with nuclear power?, *Interdisciplinary Science Reviews*, 26:4, 265-271, DOI: 10.1179/isr.2001.26.4.265.
- [14] Foro nuclear – Explicación ciclo del combustible gastado. Acceso online: <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/etapas-para-la-obtencion-del-combustible-nuclear-a-partir-del-uranio/> (Accedido el 02/08/2021).
- [15] L. Rodríguez-Penalonga, B. Y. Moratilla Soria. A Review of the Nuclear Fuel Cycle Strategies and the Spent Nuclear Fuel Management Technologies, *Energies*, vol. 10, n.o 8, p. 1235, ago. 2017.
- [16] B. Y. Moratilla Soria, A. Villar Lejarreta. Influence of the New Spanish Legislation concerning the Management of Nuclear Waste, *Sci. Technol. Nucl. Install.*, p. 316414, 2013.
- [17] Foro nuclear – ¿Qué es el reprocesado y dónde se realiza?. Acceso online: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear/que-es-el-reproceso-y-donde-se-realiza/> (Accedido el 02/08/2021).
- [18] R. Natarajan, Reprocessing of spent nuclear fuel in India: Present challenges and future programme, *Prog. Nucl. Energy*, vol. 101, pp. 118-132, 2017.
- [19] Pierre Joly, Eva Boo. Actinide separation process, 2015.
- [20] Gestión de residuos radiactivos: Situación, análisis y perspectiva, Vol.1. Fundación para Estudios sobre la Energía, 2007.
- [21] Seung Min Woo, Sunil S. Chirayath y Matthew Fuhrmann, Nuclear fuel reprocessing: Can pyro-processing reduce nuclear proliferation risk?, *Energy Policy*, vol. 144, 2020.

- [22] Agencia Europea de Medio Ambiente, Acceso online:
<https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2017-configuracion-del-futuro/articulos/la-energia-en-europa-situacion-actual> (Accedido el 02/08/2021).
- [23] L. Rodríguez Penalonga, Modelo para la gestión sostenible del combustible nuclear gastado, 2020.
- [24] Gestión de residuos radiactivos: Situación, análisis y perspectiva, Vol.1. Fundación para Estudios sobre la Energía, 2007.
- [25] B. Yolanda Moratilla Soria, M. Uris Mas, M. Estadieu, A. Villar Lejarreta, y D. Echevarria-Lopez, «Recycling versus Long-Term Storage of Nuclear Fuel: Economic Factors», *Sci. Technol. Nucl. Install.*, p. 417048, 2013.
- [26] Naciones Unidas, Acceso online:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
(Accedido el 15/07/2021).
- [27] Benedict et al., Nuclear Chemical Engineering, Second Edition, 1981.

ANEXO I: RESPUESTAS INDIVIDUALES

A continuación, se adjunta la tabla de respuestas individuales obtenidas de la encuesta realizada.

Nº Respuesta	¿Qué opinión tiene sobre la Energía Nuclear?	¿Mejoraría su opinión si no se produjeran residuos?	¿Le parece bien que los residuos se almacenen de forma definitiva en un almacén subterráneo controlado y con las medidas de seguridad necesarias?	¿Mejoraría su opinión si se reciclasen los residuos en vez de almacenarse?	¿A qué franja de edad pertenece?
1	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
2	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
3	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
4	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
5	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
6	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
7	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
8	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
9	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
10	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
11	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
12	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
13	Excelente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
14	Muy mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
15	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
16	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años

17	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
18	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
19	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
20	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
21	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
22	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
23	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
24	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
25	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
26	Buena	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
27	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
28	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
29	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
30	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
31	Excelente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
32	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
33	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
34	Excelente	No	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
35	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
36	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
37	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
38	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
39	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
40	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
41	Mala	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
42	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años

43	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
44	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
45	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
46	Muy mala	No	No	Sí	Mayor de 50 años
47	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
48	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
49	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
50	Muy mala	Sí	No	No	Mayor de 50 años
51	Muy mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
52	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
53	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
54	Mala	Sí		Sí	Mayor de 50 años
55	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
56	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
57	Buena	No	Sí	No	Menor de 30 años
58	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
59	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
60	Excelente	No	Sí	No	Mayor de 50 años
61	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
62	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
63	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
64	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
65	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
66	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
67	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
68	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años

69	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
70	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
71	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
72	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
73	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
74	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
75	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
76	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
77	Excelente	No	Sí	No	Menor de 30 años
78	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
79	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
80	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
81	- Indiferente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
82	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
83	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
84	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
85	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
86	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
87	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
88	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
89	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
90	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
91	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
92	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
93	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
94	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años

95	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
96	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
97	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
98	- Indiferente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
99	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
100	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
101	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
102	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
103	Mala	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
104	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
105	Excelente	No	Sí	Sí	Menor de 30 años
106	Muy mala	No	No	Sí	Mayor de 50 años
107	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
108	Muy mala	No	No	No	Mayor de 50 años
109	- Indiferente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
110	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
111	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
112	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
113	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
114	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
115	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
116	Mala	No	No	No	Mayor de 50 años
117	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
118	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
119	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
120	- Indiferente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años

121	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
122	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
123	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
124	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
125	Mala	No	No	Sí	Mayor de 50 años
126	Mala	Sí	No	No	Menor de 30 años
127	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
128	Mala	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
129	Muy mala	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
130	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
131	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
132	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
133	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
134	- Indiferente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
135	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
136	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
137	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
138	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
139	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
140	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
141	Muy mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
142	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
143	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
144	Muy mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
145	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
146	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años

147	Mala	No	No	Sí	Entre 30 y 50 años
148	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
149	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
150	Excelente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
151	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
152	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
153	Muy mala	Sí	No	No	Entre 30 y 50 años
154	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
155	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
156	Mala	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
157	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
158	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
159	Excelente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
160	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
161	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
162	- Indiferente	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
163	Muy mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
164	Excelente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
165	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
166	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
167	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
168	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
169	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
170	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
171	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
172	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años

173	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
174	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
175	Excelente	No	No	Sí	Mayor de 50 años
176	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
177	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
178	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
179	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
180	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
181	Excelente	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
182	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
183	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
184	Muy mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
185	Excelente	No	Sí	No	Mayor de 50 años
186	Buena	Sí	Sí		Mayor de 50 años
187	Buena	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
188	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
189	- Indiferente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
190	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
191	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
192	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
193	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
194	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
195	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
196	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
197	Excelente	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
198	- Indiferente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años

199	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
200	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
201	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
202	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
203	Buena	No	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
204	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
205	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
206	Buena	No	Sí	No	Menor de 30 años
207	Excelente	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
208	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
209	Muy mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
210	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
211	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
212	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
213	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
214	Buena	Sí	Sí	No	Entre 30 y 50 años
215	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
216	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
217	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
218	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
219	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
220	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
221	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
222	- Indiferente	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
223	Buena	Sí		Sí	Mayor de 50 años
224	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años

225	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
226	- Indiferente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
227	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
228	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
229	Excelente	No	No	Sí	Mayor de 50 años
230	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
231	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
232	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
233	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
234	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
235	- Indiferente	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
236	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
237	- Indiferente	Sí	Sí	No	Mayor de 50 años
238	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
239	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
240	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
241	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
242	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
243	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
244	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
245	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
246	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
247	Buena	Sí	No	No	Entre 30 y 50 años
248	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
249	Buena	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
250	Muy mala	No	No	No	Entre 30 y 50 años

251	- Indiferente	Sí		Sí	Mayor de 50 años
252	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
253	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
254	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
255	Buena	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
256	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
257	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
258	- Indiferente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
259	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
260	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
261	Excelente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
262	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
263	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
264	Buena	Sí	Sí	No	Entre 30 y 50 años
265	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
266	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
267	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
268	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
269	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
270	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
271	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
272	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
273	Excelente	Sí	Sí	No	Menor de 30 años
274	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
275	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
276	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años

277	Muy mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
278	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
279	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
280	Mala	Sí	No	No	Menor de 30 años
281	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
282	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
283	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
284	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
285	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
286	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
287	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
288	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
289	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
290	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
291	Excelente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
292	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
293	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
294	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
295	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
296	Excelente	No	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
297	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
298	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
299	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
300	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
301	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
302	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años

303	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
304	Buena	Sí	No		Entre 30 y 50 años
305	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
306	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
307	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
308	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
309	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
310	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
311	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
312	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
313	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
314	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
315	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
316	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
317	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
318	- Indiferente	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
319	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
320	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
321	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
322	Buena	No	No	Sí	Mayor de 50 años
323	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
324	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
325	Mala	Sí	No	No	Entre 30 y 50 años
326	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
327	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
328	Excelente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años

329	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
330	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
331	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
332	Muy mala	No	No	No	Menor de 30 años
333	Muy mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
334	Excelente	No	Sí	No	Entre 30 y 50 años
335	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
336	- Indiferente	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
337	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
338	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
339	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
340	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
341	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
342	Muy mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
343	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
344	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
345	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
346	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
347	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
348	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
349	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
350	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
351	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
352	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
353	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
354	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años

355	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
356	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
357	Excelente	No	Sí	No	Mayor de 50 años
358	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
359	Buena	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
360	Mala	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
361	Excelente	No	Sí	Sí	Menor de 30 años
362	Buena	No	No	Sí	Entre 30 y 50 años
363	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
364	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
365	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
366	Mala	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
367	Mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
368	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
369	- Indiferente	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
370	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
371	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
372	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
373	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
374	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
375	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
376	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
377	Mala	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
378	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
379	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
380	Buena	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años

381	- Indiferente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
382	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
383	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
384	Excelente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
385	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
386	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
387	- Indiferente	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
388	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
389	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
390	- Indiferente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
391	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
392	Muy mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
393	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
394	Mala	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
395	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
396	Buena	Sí	No	Sí	Menor de 30 años
397	Mala	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
398	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
399	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
400	Excelente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
401	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
402	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
403	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
404	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
405	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
406	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años

407	- Indiferente	Sí	No	No	Mayor de 50 años
408	Buena	Sí	Sí	Sí	Entre 30 y 50 años
409	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
410	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
411	Excelente	Sí	Sí	No	Menor de 30 años
412	Excelente	No	Sí	Sí	Menor de 30 años
413	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
414	Excelente	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años
415	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
416	Buena	No	No	Sí	Mayor de 50 años
417	Muy mala	Sí	No	Sí	Entre 30 y 50 años
418	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
419	Buena	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
420	Excelente	Sí	No	Sí	Mayor de 50 años
421	Excelente	No	Sí	Sí	Mayor de 50 años
422	Excelente	Sí	Sí	Sí	Mayor de 50 años
423	Buena	Sí	Sí	Sí	Menor de 30 años