

Disrupción de la Red Eléctrica

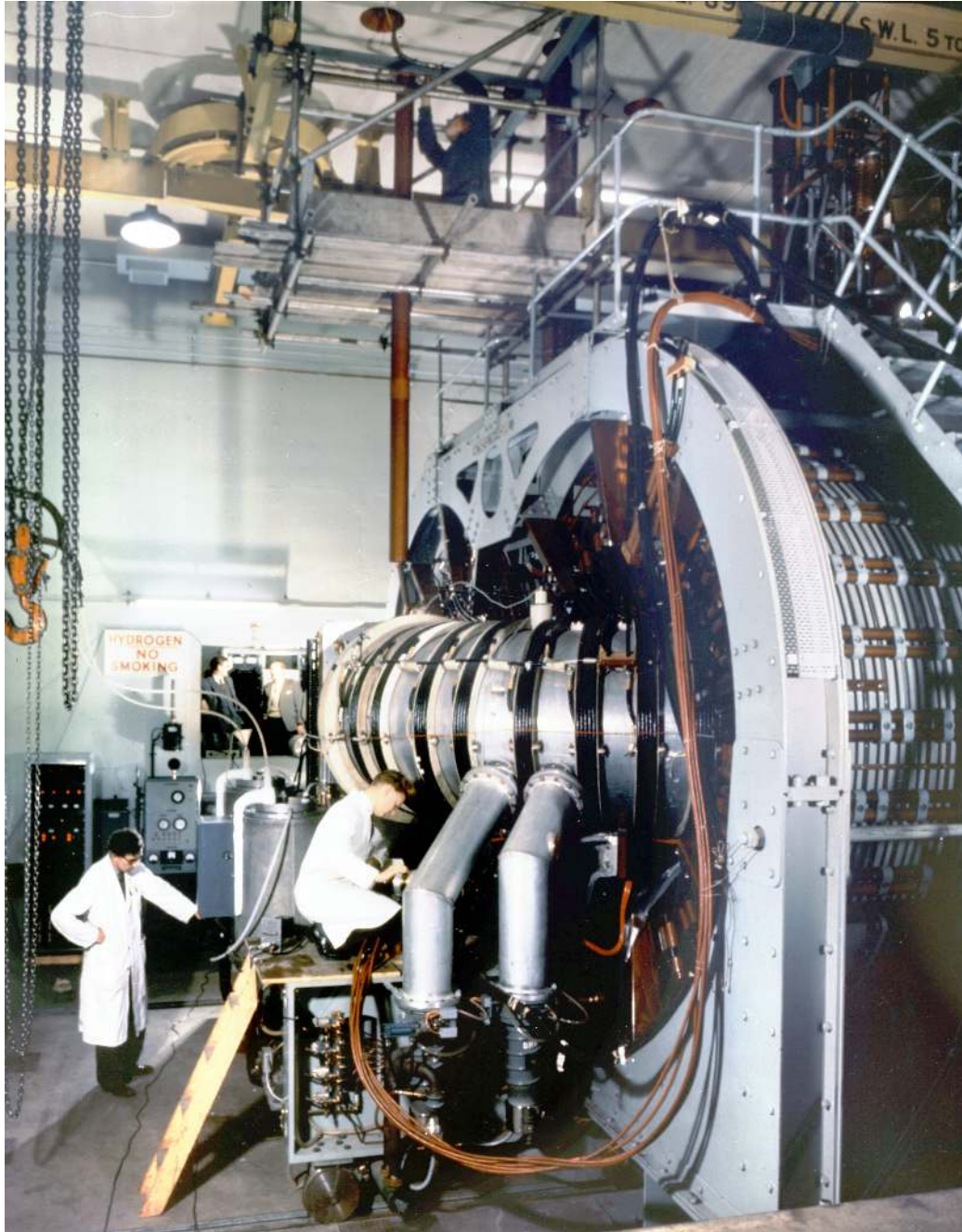


Figura 1: Reactor experimental de fusión nuclear, ZETA (1958)

Investigadores:

Elies García Alvira, Aarón Chaves Caseiro

Tutor:

José Antonio Sánchez

Colegio SANTO ANGEL, 2º Bachillerato Tecnológico promoción 2021/22

Resum

L'objectiu d'aquest projecte de recerca és analitzar l'estructura actual de la xarxa elèctrica per poder predir com podria ser la futura xarxa de la península espanyola. I molt lligat a aquest tema és el futur de la fusió nuclear, que també explorarem, però que no és tan immediata com aquest canvi fonamental de la xarxa.

La metodologia utilitzada per arribar a una conclusió definitiva donada l'evidència és essencialment un model macroeconòmic, és a dir, un model que es basa en les economies d'escala, l'oferta i la demanda i el més important: el ritme de millora de la tecnologia disruptiva.

En conclusió, amb el coneixement de com funciona la xarxa actual i una comprensió de com la disrupció ha afectat diversos altres mercats al llarg de la història (acompanyat d'una anàlisi exhaustiva) predim que el sector elèctric està a punt de patir una interrupció, liderat per tres tecnologies: solar, eòlica i de bateries.

Abstract

The objective of this research project is to analyze the current structure of the power grid to be able to foretell what the future grid of the Spanish peninsula might look like. And closely linked to this is the future of nuclear fusion, which we also explore, but isn't as immediate as this fundamental change of the grid.

The methodology used to arrive at a definitive conclusion given the evidence is essentially a macroeconomical model, that is, a model that hinges on economies of scale, supply and demand and most importantly: rate of improvement of disruptive technology.

In conclusion, with the knowledge of how the current grid operates and an understanding of how disruption has affected several other markets throughout history (accompanied by a thorough analysis) we predict that the electric sector is about to undergo a disruption, led by three technologies: solar, wind and batteries.

Paraules Clau / Key Words

Xarxa elèctrica / Power grid

Fusió nuclear / Nuclear fusion

Model macroeconòmic / Macroeconomical model

Disrupció / Disruption

Sector elèctric / Electric sector

Solar, eòlica i bateries / Solar, wind and batteries

Índice

1. Introducción	6
1.1. Síntesis del tema	7
2. Exposición y Análisis	12
2.1. Producción, transmisión y distribución de la energía eléctrica	12
2.1.1. Generación eléctrica	12
2.1.2. Energía fósil y nuclear	14
2.1.2.1. Principales tipos de plantas y su funcionamiento	14
2.1.2.2. Dependencia extranjera	16
2.1.3. El debate nuclear	19
2.2. Disrupción	33
2.2.1. Introducción	34
2.2.2. La naturaleza de la disrupción, la curva en S	41
2.2.3. Las viejas tecnologías y la curva en X	45
2.2.4. La curva en U de la energía limpia	47
2.2.5. Conclusión	50
2.2.6. La electroquímica, el almacenamiento de la energía eléctrica	50
2.2.6.1. Batería de iones de litio	50
2.2.6.2. Batería de metal líquido	54
2.3. La revolución del autoconsumo	57
2.3.1. Los servicios públicos centralizados están desactualizados, la energía distribuida es el futuro	58
2.3.2. La producción de electricidad descentralizada es más eficiente	59
2.3.3. La generación distribuida es flexible y proporciona resiliencia	59
2.3.4. Una arquitectura de red descentralizada para un sistema eléctrico respetuoso con el medio ambiente	60
2.3.5. ¡La energía distribuida vale la pena!	60
2.4. Conclusión	61
3. Descubrimiento de la Energía Nuclear	63
3.1. Reacción nuclear	64
4. El Fusor Aaries	66
4.1. Materiales necesarios para su construcción	66
4.2. Materiales básicos para la construcción del fusor	66
4.3. Materiales para la construcción de la cámara	67
4.4. Materiales para la construcción del armazón	68
4.5. Materiales eléctricos	69
4.6. Proceso de fabricación y problemas	70
4.7. Cableado	74
4.8. Pruebas	75
4.9. Futuro nuclear	77
4.9.1. Introducción y corrección	77
4.9.2. El equilibrio	80
4.10. Conclusión	82

4.11. Motivación	82
5. Fuentes consultadas	83
5.1. Webgrafía	83
5.1.1. Disrupción	83
5.1.2. Fusor/Fusión	83
5.2. Fotografías	84
5.3. Bibliografía	84
6. Agradecimientos	84

1. Introducción

La generación, distribución y almacenamiento de la energía eléctrica es vital para el desarrollo de cualquier civilización. Esta observación se vuelve evidente después de examinar el transcurso de la historia humana a través de la utilización de la energía y cómo diversos avances tecnológicos cambian el panorama. El suceso que destaca en este aspecto es la revolución industrial, donde por ejemplo la máquina de vapor hizo posible la mejora en el trabajo del metal basado en el uso de coque en vez de carbón vegetal, que en comparación posee un menor poder calorífico^{1,2}.

Esto quiere decir que una disrupción en la red eléctrica no solo significa reemplazar las fuentes de energía (coque por carbón vegetal), sino también aumentar la cantidad de energía eléctrica que se podrá extraer y utilizar más eficientemente mediante avances tecnológicos. Es por tanto razonable hipotetizar, con la llegada de energías sostenibles y la revolución del almacenamiento de la energía producida por plantas eléctricas, que en las próximas décadas la red eléctrica experimentará una revolución, tanto sistemática como conceptual. Avances en electroquímica, la evolución del autoconsumo y la llegada de plantas virtuales serán los catalizadores de una reestructuración y disrupción en el sector eléctrico.

En este trabajo de investigación se analizará cómo cambiarán los aspectos citados de la red eléctrica interconectada española y qué efecto tendrán estos cambios, tanto sociales como económicos. Debido a la compleja naturaleza de la red eléctrica, y la tarea incluso más complicada de correctamente pronosticar su estado futuro, se simplificarán las influencias legislativas y se subestimarán el ritmo de progreso de ciertas tecnologías, o visto de otra manera, esperamos que el ritmo de incorporación de estas tecnologías en España sea considerablemente menor a su ritmo de mejora y crecimiento en otros países.

Considerando estos parámetros y limitaciones, prevemos que en la presente y próxima década, gradualmente, se integrará el almacenamiento de energía eléctrica en la red lo cual permitirá reducir el estrés de esta en momentos de carga máxima; el autoconsumo se expandirá por toda España, con paneles fotovoltaicos y coches eléctricos convirtiéndose en un elemento básico de la mayoría de hogares; y la red eléctrica pasará a consistir tanto de centrales eléctricas físicas como de centrales eléctricas virtuales de generación distribuida, permitiendo dar paso a la generación individual de energía eléctrica en la red. Estos cambios necesariamente resultan en una red con capacidad de generación de dos a cinco veces mayor que la actual y en

¹ El poder calorífico (p_c) es la energía por unidad de masa o volumen que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.

² Díez Díaz-Estébanez, M. A. (2013). Del carbón vegetal al coque en la industria del hierro y del acero.

una mejora sustancial en la manera que transmitimos y distribuimos energía eléctrica por el país, dando así lugar a una red más eficaz, estable y sostenible para el medio ambiente.

Estos cambios ayudarán por tanto a evitar una catástrofe global climática, ya que las nuevas fuentes energéticas serán renovables. Viendo que el futuro de la red eléctrica está ligado al calentamiento global, es inevitable que no nos interese en este tema, debido al profundo impacto que supondrá en nuestro futuro.

Este documento se divide en dos secciones, la teórica y la práctica. Elies es el encargado de la sección teórica de la disrupción de la red eléctrica. Investiga los cambios y efectos de la generación, transmisión, distribución y almacenamiento de la energía eléctrica. Por otro lado, para ilustrar la variedad de maneras de generar energía eléctrica y comentar una de las variables cuyo efecto es menos predecible, Aarón se ocupa de diseñar y detallar la teoría del fusor Farnsworth-Hirsch-Meeks, un aparato de fusión iónica por confinamiento inercial. Los dos investigadores construirán el aparato como demostración del futuro de la generación de energía eléctrica. Es importante mencionar que todo lo relacionado a la red eléctrica ocurrirá más inmediatamente que una planta eléctrica suministrada por un reactor de fusión nuclear (que se espera que aparezca a mediados de este siglo).

Inicialmente se había planeado construir el fusor mencionado anteriormente, pero se utilizaría como combustible deuterio. Hay numerosas razones por las que decidimos cambiar a otro modo de completar el circuito, detalladas en la sección práctica, pero las principales fueron seguridad, dinero y tiempo.

Muchas otras proposiciones similarmente ambiciosas o redundantes en el ámbito teórico verán su mención y serán exploradas más seriamente en el blog (<https://sites.google.com/view/disrupcion-electrica/inicio>).

1.1. Síntesis del tema

La red eléctrica, en su mayor parte, está formada por centrales de carbón, petróleo, gas y nucleares. Estas centrales, en términos básicos, son calderas gigantes. Reciben agua para calentarla y convertirla en vapor, que luego se transforma en movimiento circular girando turbinas masivas de cientos de toneladas de acero que a su vez generan un constante suministro de energía eléctrica. Esta energía se transmite mediante líneas eléctricas de alta tensión que son distribuidas y manejadas por estaciones eléctricas, mejor conocidas como subestaciones, que suministran la energía eléctrica necesaria a los domicilios que la demandan.

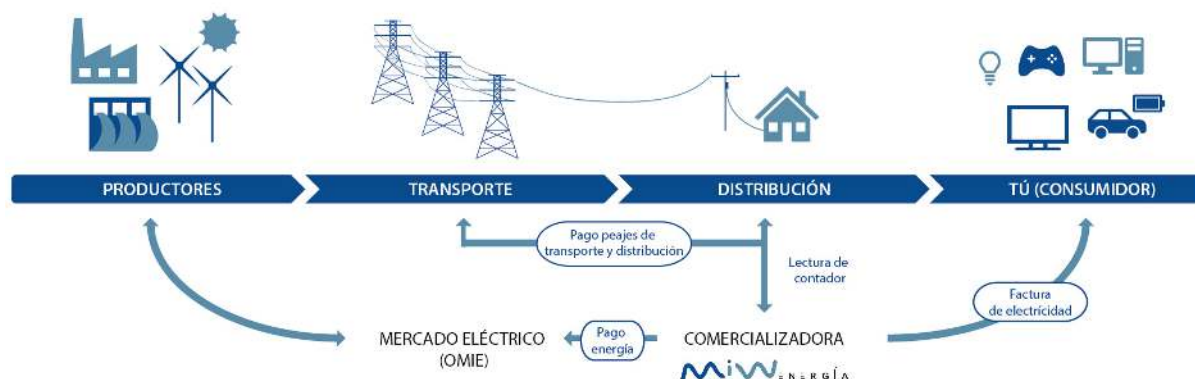


Figura 2: Esquema del ciclo de generación, transmisión y distribución eléctrica

La anterior mencionada gran masa rotacional de las turbinas proporciona inercia al sistema. Dicho de otra manera, estabilidad. Si varias centrales eléctricas dejan de funcionar la energía cinética de las turbinas seguirá proporcionando energía eléctrica hasta que se frenen, incluso se pueden preparar reemplazos de emergencia en el tiempo que tardan en frenar.

En cambio, las centrales solares fotovoltaicas no poseen la inercia necesaria para adquirir estabilidad y las centrales eólicas tampoco son estables debido a la turbulencia del viento. Como resultado estas energías renovables, consideradas en su estado actual, serían incapaces de revolucionar el sector de generación eléctrica debido a su poca fiabilidad.

Hay varias soluciones a este problema, pero la única solución práctica y económicamente viable que consideramos es la descentralización de la red eléctrica, a causa de que es la única vía que no requiere de nuevas tecnologías no demostradas, como un reactor de fusión nuclear. La otra alternativa que podría ser considerada es la de las plantas nucleares, que aunque siendo de bajas emisiones y una fuente estable de generación eléctrica que puede respaldar a las fuentes de energía menos fiables, son a la vez poco populares en el ámbito social, y condenadas a la extinción en España, debido a que el Plan de Integración Nacional de Energía y Clima sigue planeando desfasar la energía nuclear gradualmente de 2027 hasta 2035.

No hay duda de que la demanda de energía eléctrica seguirá aumentando en los siguientes años³, y confiar en un centenar de centrales que además no son operadas por un sistema particularmente modernizado, es un desperdicio de tecnología existente que mejoraría la estabilidad, eficiencia energética e impacto en el medio ambiente del sistema eléctrico sustancialmente. Esto para la futura población española significa más energía, más barata, menos apagones y menos polución por tanto mejor calidad de vida

La descentralización de la red eléctrica, como el nombre sugiere, propone distanciarse de la idea de central eléctrica, antónimo al concepto de descentralización puesto que una central ocupa un solo lugar y generalmente son infraestructuras de considerable tamaño y escala. Una manera de descentralizar una red sería colocar paneles fotovoltaicos en domicilios conectados a esta que proporcionan energía eléctrica a cambio de dinero. También se puede vender el exceso de energía eléctrica almacenada en vehículos eléctricos conectados a la red en momentos de cargas máxima, devolviendo de cierta manera parte de la energía utilizada para cargarlos. Dicho todo esto es imprescindible mencionar que aún son necesarios avances en la fabricación y eficiencia energética de tecnologías de generación y acumulación de energía eléctrica renovables para lograr la descentralización del sector eléctrico.

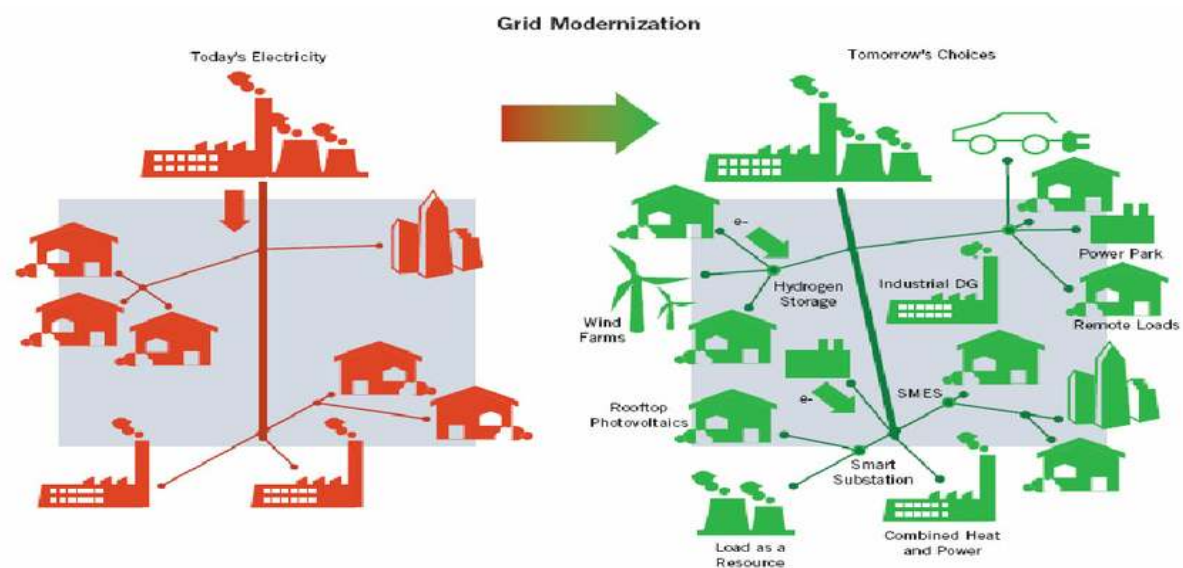


Figura 3: Esquema de una red descentralizada (fuente: IEEE)

³ https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/rebeca/01b_pniec.pdf

Para tener una idea del ritmo de crecimiento al que están expuestas estas tecnologías solo hace falta tener presente que los costes de las baterías de iones de litio se han reducido en un 97% desde su llegada al mercado en 1991.⁴ Debido a la reducción de costes en la fabricación e implementación de los paquetes de baterías en vehículos eléctricos, o *Battery Electric Vehicles* (BEV), estos dominarán las ventas de coches a finales de esta década. El grueso de la lógica y razonamiento detrás de esta afirmación es detallada en la subsección "La naturaleza de la disrupción, la curva en S". El resumen es que la reducción en costes de fabricación de baterías dará lugar a economías de escala, haciendo posible posicionar los BEV en paridad de precios comparado con los coches de combustión interna, o *Conventional Internal Combustion Engine Vehicles* (CICEV). Esto es sin tener en cuenta el coste de mantener un coche eléctrico, que es menor a largo plazo. Lo que quiere decir que técnicamente algunos BEV ya están a paridad de precios, sólo que no es inmediatamente obvio comparando el precio de compra.⁵

La asunción de que las baterías seguirán bajando de precio a un ritmo similar al actual es razonada en la sección de "Disrupción".

Este resumen deja que desear, ya que asumimos del lector cierta familiaridad con el crecimiento exponencial aplicado a nuevas tecnologías. Para una explicación más matizada y que no asume familiaridad con el tema, puede leer la sección donde se entra en más detalle sobre cómo se lleva a cabo la disrupción de un sector, las tecnologías disruptivas, sus efectos a medio y largo plazo además del profundo impacto social que a veces conllevan (cuando afectan a un sector ya establecido con una industria o presencia considerable)

Como consecuencia del aumento exponencial en ventas de coches eléctricos tendremos decenas de millones de paquetes de baterías (cada BEV posee un paquete de baterías) que están la mayoría del tiempo, de media, en reposo sin producir ningún tipo de valor.

⁴ Ziegler, M. S., & Trancik, J. E. (2021). Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy & Environmental Science*, 14(4), 1635-1651

⁵Hamza, K., Laberteaux, K., & Chu, K. C. (2020). On Modeling the Total Cost of Ownership of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles.

Esto es importante ya que ahora mismo es posible que un BEV venda energía eléctrica que no esté utilizando mientras se esté cargando, o en otras palabras, conectado a la red eléctrica. Ya hay avances en este ámbito, mayoritariamente realizados por Tesla (fabricante de vehículos eléctricos), debido a su desarrollo de *Autobidder*, “una plataforma de transacciones y control en tiempo real que proporciona una gestión de activos y una optimización de la cartera basadas en el valor, lo que permite a los propietarios y operadores configurar estrategias operativas que maximicen los ingresos en función de sus objetivos empresariales y preferencias de riesgo”. Este programa es aplicable tanto para centrales eléctricas virtuales, en inglés *Virtual Power Plants* (VPP), como para vehículos eléctricos. Esto tiene un paralelo con el autoconsumo en España, donde se puede vender el superávit de energía eléctrica acumulada por paneles fotovoltaicos (instalados en domicilios o negocios) a la red eléctrica.⁶

En conclusión, la descentralización de la red eléctrica consiste en distribuir el almacenamiento y la generación de energía eléctrica. Y será disruptivo para todo el sector eléctrico.

⁶ Esto es debido a la iniciativa de autoconsumo impulsada por el Gobierno Español en la Ley 16/2017 del cambio climático en los artículos 19, 27, 29, 38 y 51.

2. Exposición y Análisis

2.1. Producción, transmisión y distribución de la energía eléctrica

Para poder predecir con cierta convicción el futuro de una entidad tan inmensa como es la red eléctrica interconectada española, se han de fundamentar los componentes clave que sufrirán los cambios más considerables; ya sean las fuentes de la energía eléctrica, la distribución de esta misma, o incluso la posibilidad de almacenarla para uso en horas punta.

Esta sección por tanto sirve como cimiento del trabajo de investigación, a partir del cual se construirá la estructura argumentativa necesaria para soportar las conclusiones de este proyecto.

Antes de comenzar, aquí hay una breve explicación de cómo se estructura esta sección:

Primero se habla exclusivamente de las fuentes de generación eléctrica, de las fósiles y nucleares a las renovables y biocombustibles. Esto sirve para averiguar cuál es el estado de la matriz energética actual de España, qué partes pueden prevalecer, crecer o desaparecer y en concreto miraremos qué fuentes serían mejores para el futuro, desde una perspectiva económica, social y ambiental. Luego se discutirá cómo de realista es esta perspectiva.

Después de lo cual se hablará brevemente del problema al evaluar ciertas tecnologías renovables como sostenibles, es decir renovables y limpias. Esto sólo es perjudicial al medio ambiente, pero como parece que nos estamos moviendo hacia energías más sostenibles, es importante mencionarlo.

Teniendo esta base, se analizará el estado de ciertos componentes de la red eléctrica española, principalmente lo relacionado y relevante a la discusión del futuro de esta.

2.1.1. Generación eléctrica

El sector de la generación de energía eléctrica, en la mayor parte, consiste en centrales de carbón, petróleo, gas y nucleares. Estas centrales, en términos básicos, son calderas gigantes. Reciben agua para calentarla y convertirla en vapor, que a presiones vertiginosas, colisiona con una turbina de cientos de toneladas de acero que gira cientos de veces por minuto de manera síncrona con otras turbinas en la misma red.

El obstáculo principal comienza en el hecho de que es un sistema de generación eléctrica cuya potencia de salida a todo momento equivale a la demanda de energía eléctrica. Como actualmente la red eléctrica española no posee métodos para almacenar la electricidad generada se ha de proyectar cual será la demanda del

próximo día con la intención de asegurar que no se sobrepase la capacidad de abastecimiento momentánea o se subestime la demanda de ésta en determinados puntos de la red.

En resumen, debido a la dificultad que supone ajustar la potencia de salida de turbinas masivas giratorias a tiempo real y además con el añadido de que las vidas de millones de personas giran alrededor de que el sistema eléctrico funcione correctamente, se ha de predecir la demanda de electricidad para poder abastecer a la población sin problemas. La cuestión principal es, ¿cómo se adivina el futuro?

Para esto Red Eléctrica de España (REE), el organismo encargado de operar el sistema eléctrico y de gestionar su red de transporte, creó el Centro de Control Eléctrico (CECOEL). El CECOEL, de media, recibe 160.000 señales distintas cada 10 segundos que se actualizan. Con toda esta información y décadas de investigación es posible asegurar con poco margen de error la demanda eléctrica del día siguiente lo cual permite facilitar la gestión de las más de mil centrales formando el sistema eléctrico.



Figura 4: El Centro de Control de Red Eléctrica de España (CECOEL) en Alcobendas.

2.1.2. Energía fósil y nuclear

En 2020, según el Informe del Sistema Eléctrico, presentado por Red Eléctrica de España (REE): “Las tecnologías renovables produjeron en 2020 el 44% de toda la electricidad generada en España, registrando su mayor participación en el mix de generación desde que existen registros”. Seguido de “la producción libre de emisiones de CO₂ eq. alcanzó también un récord histórico, representando el 67,3% de la generación eléctrica total”. Teniendo en cuenta los datos anteriores, vamos a entender de dónde viene la mayoría de esta producción libre de emisiones de CO₂ equivalente y que es, ya que ocupa más de dos tercios de la generación eléctrica total. También se explorará cual es la tendencia de la red eléctrica en relación al crecimiento de diferentes tecnologías en el parque generador de España, cuales son estas tecnologías y cómo beneficiarán a la reducción de estas emisiones de CO₂.

2.1.2.1. Principales tipos de plantas y su funcionamiento

¿Cuáles son las principales tecnologías de combustible fósil y fisión nuclear en España?

Según REE⁷, un 32% de la generación eléctrica en 2020 vino de centrales termoeléctricas. La gran mayoría de estas centrales, casi un 90%, son centrales de ciclo combinado y cogeneración. Actualmente hay unas 600 plantas de cogeneración y 30 centrales de ciclo combinado.

Por otro lado, un 22,2% de la generación nacional provino de energía nuclear. En España hay cinco centrales nucleares con un total de siete reactores.⁸

¿Un quinto de la generación con cinco centrales? Esto es debido a que las centrales nucleares funcionan continuamente, actúan como centrales de base o principales, proporcionando energía eléctrica constantemente con muy poca variación en su potencia de salida.

Esto seguido de un 21,8% que vino de parques eólicos, además de otro 12,2% proporcionado por centrales hidráulicas. Y por último las centrales solares fotovoltaicas proporcionaron un 6,1%. Todo esto suma a aproximadamente un 95% de la generación eléctrica en 2020 suministrada por 5 tecnologías diferentes de generación.⁹ De todas estas centrales las termoeléctricas o térmicas son las que abastecieron casi un tercio de la demanda de energía eléctrica en España.

⁷ Nota de prensa de Red Eléctrica de España sobre el avance de 2020:

<https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2021/03/2020-energia-mas-verde-gracias>

⁸ <https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>

⁹ <https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion>

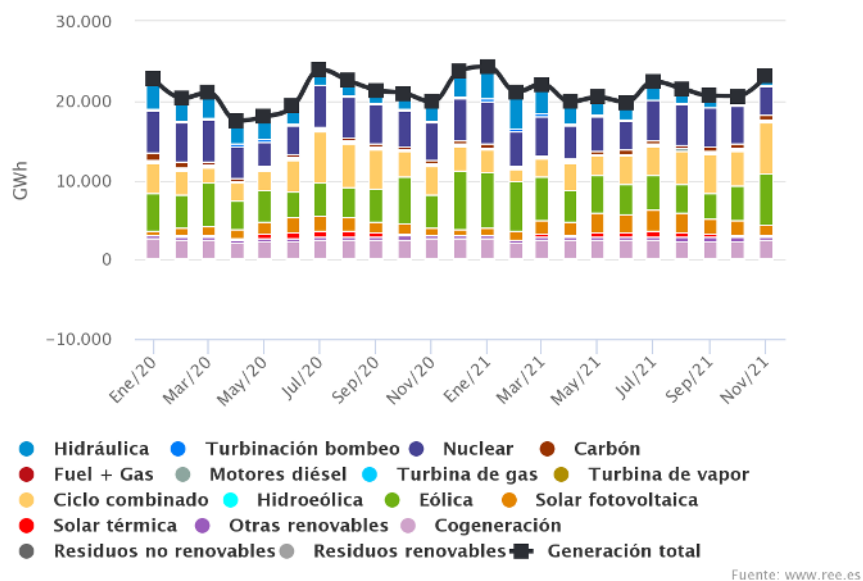


Figura 5: Gráfico enseñando la generación nacional por tecnología (fuente: www.ree.es)

Para que el lector se aclare de cómo se diferencian las principales fuentes de generación eléctrica mediante gas natural y fisión nuclear se resumen a continuación (en su forma más simplificada).

Centrales termoeléctricas de ciclo combinado

- Una planta de energía de ciclo combinado es un conjunto de motores térmicos que trabajan en conjunto a partir de la misma fuente de calor, convirtiéndola en energía mecánica. En tierra, cuando se usa para generar electricidad, el tipo más común se llama planta de turbina de gas de ciclo combinado (*Combined Cycle Gas Turbine*, CCGT). El mismo principio también se utiliza para la propulsión marina, donde se denomina planta combinada de gas y vapor (*Combined Gas And Steam*, COGAS). La combinación de dos o más ciclos termodinámicos mejora la eficiencia general, lo que reduce los costos de combustible.
- El principio es que después de completar su ciclo en el primer motor, el fluido de trabajo (el escape) todavía está lo suficientemente caliente como para que un segundo motor térmico posterior pueda extraer energía del calor en el escape. Por lo general, el calor pasa a través de un intercambiador de calor para que los dos motores puedan usar diferentes fluidos de trabajo.

Centrales termoeléctricas de cogeneración

- La cogeneración es un uso más eficiente de combustible o calor, porque el calor que de otro modo se desperdiciaría en la generación de electricidad se destina a algún uso productivo. Las plantas combinadas de calor y energía

(*Combined Heat and Power*, CHP) recuperan energía térmica que de otro modo se desperdiciaría para calefacción. Esto también se denomina calefacción urbana combinada de calor y electricidad. Las pequeñas plantas de cogeneración son un ejemplo de energía descentralizada (Ya que son muchas y esparcidas por el territorio).

- El suministro de calor a alta temperatura impulsa primero un generador de turbina de gas o vapor. El calor residual de baja temperatura resultante se utiliza luego para calentar el agua o el espacio. A escalas más pequeñas (típicamente por debajo de 1 MW), se puede usar un motor de gas o un motor diesel.

Centrales de fisión nuclear

- Una central nuclear es una central térmica en la que la fuente de calor es un reactor nuclear. Como es típico en las centrales térmicas, el calor se utiliza para generar vapor que impulsa una turbina de vapor conectada a un generador que produce electricidad.
- Las plantas nucleares se utilizan con mucha frecuencia como centrales de respaldo, ya que sus costos de operación, mantenimiento y combustible se encuentran en el extremo inferior del espectro de costos. Es decir, cuesta poco de mantener y operar.
- Sin embargo, la construcción de una central nuclear suele durar de cinco a diez años, lo que puede generar importantes costos financieros, dependiendo de cómo se financien las inversiones iniciales. La cantidad de años que se tarde en construir una central suele depender de la experiencia del país en cuestión sobre el tema. Francia las construye de 4 a 5 años, por ejemplo.
- Las plantas de energía nuclear tienen una huella de carbono comparable a la de las energías renovables como los parques solares y los parques eólicos, y mucho más baja que la de los combustibles fósiles como el gas natural y el lignito. A pesar de algunas catástrofes espectaculares, las centrales nucleares son el modo más seguro de generación de electricidad.
- En 2018, la Agencia Internacional de Energía Atómica informó que había 450 reactores de energía nuclear en funcionamiento en 30 países de todo el mundo.

2.1.2.2. Dependencia extranjera

Teniendo en cuenta que una porción significativa de la generación eléctrica depende de fuentes primarias como el gas natural, derivados del petróleo y el uranio, es natural preguntarse dónde en España se extrae esta materia. La respuesta es

simple: la importamos. De hecho en 2018, según Eurostat¹⁰, España importó un 73,45 % de la energía primaria consumida, rozando tres cuartos del total. El consumo nacional en el año 2018 fue de unos 132 123 ktep¹¹. La principal fuente de energía primaria fue el petróleo, con casi el 50 % del total. Los combustibles fósiles cubrieron más del 77 % y la nuclear más del 12 %. Por último, las energías renovables cubrieron el 11 % de la energía consumida.

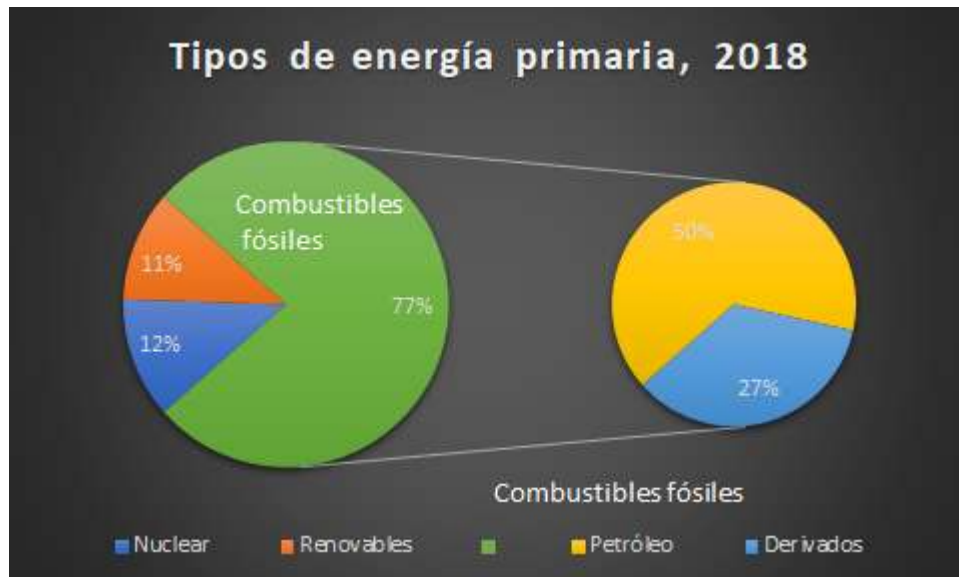


Figura 6: Gráfico mostrando los datos de energía primaria consumida en España el año 2018

Los datos como los citados indican que España no podría sostenerse si no fuera por estos países exportadores de fuentes primarias. Esto es una señal de que cualquier avance que se haga para que España pueda autosostenerse en un futuro es uno que no solo tiene el bienestar del planeta en su mira, sino que también tiene presente la liberación económica y social que podría causar.

Está claro que no toda la materia prima que importamos va hacia el sector eléctrico, solo el gas natural y algunos derivados del petróleo, como el gasóleo y el fueloil. Pero eso solo quiere decir que esencialmente todas las materias primas que se utilizan en España para operar centrales de gas natural y nucleares son importadas, y las consecuencias de este hecho ya se ven reflejadas en la inestabilidad de los precios de la luz en los últimos meses del año 2021. El 7 de octubre de 2021 se vió un récord histórico en cuanto al precio de la luz, 288,53 €/MWh¹², el segundo máximo histórico se alcanzó el 29 de noviembre a 274,56 €/MW con un 'pool' que

¹⁰ Energy imports dependency annually until 2019 (nrg_ind_id): https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_id/default/table?lang=en

¹¹ ktep = kilotoneladas (mil toneladas o mil millones de kilogramos) equivalentes de petróleo

¹² Un MWh son un millón de vatios hora (unidad de energía)

encadenó su decimotercer día consecutivo por encima de la cota de los 200 €/MWh. Cifras históricas (en el peor sentido de la palabra) que deben este crecimiento a la dependencia energética española. Ejemplos:

Si se encarece el gas natural porque hay baja producción o alta demanda el precio subirá, si Argelia corta el mayor de sus gasoductos que suministra miles de millones de metros cúbicos de gas a España el precio subirá¹³, etc.

En conclusión, este es un problema que encuentra su solución en el incremento de potencia instalada de energías renovables y almacenamiento eléctrico. Para dar más credibilidad a esta conclusión provisional aquí hay un gráfico que representa esta inestabilidad:

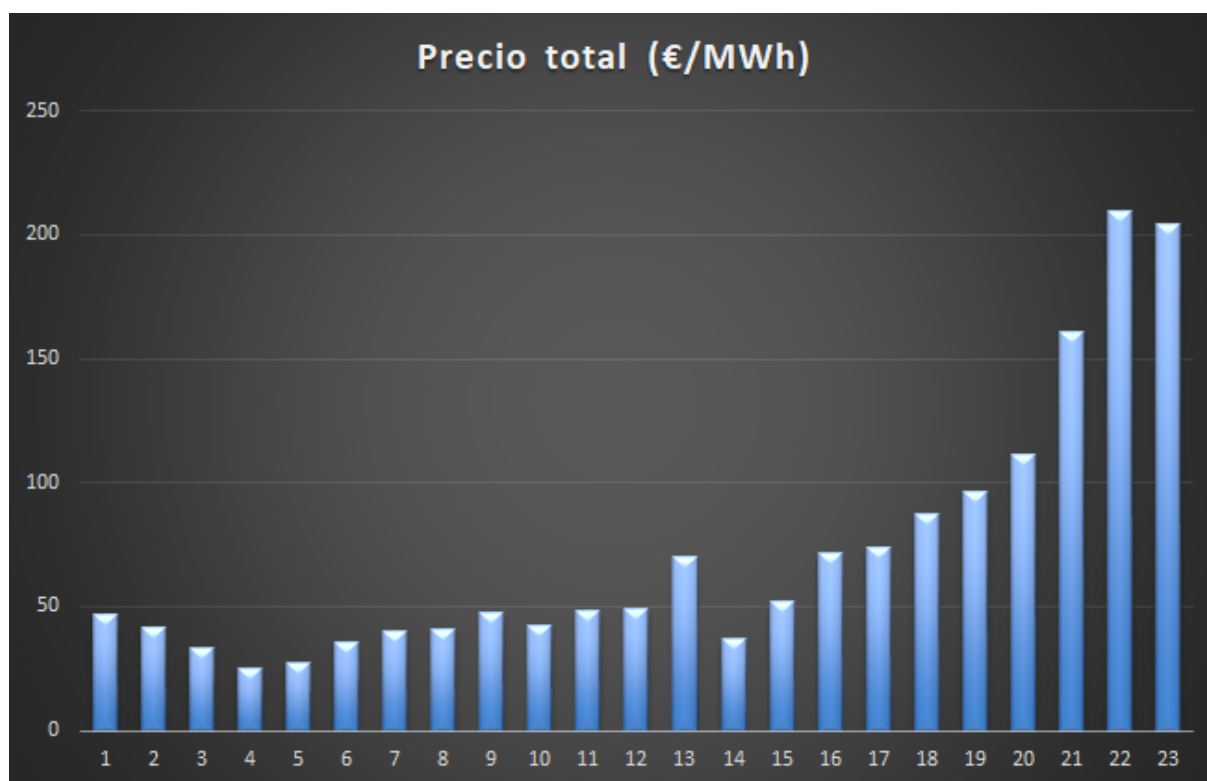


Figura 7: Gráfico que muestra el precio de la luz mensualmente de Enero 2020 a Noviembre 2021

Mostrados estos datos y consecuencias es evidente que el actual sistema eléctrico falla. Esta irregularidad en los precios revela el problema en confiar la mayoría de la producción eléctrica española a centrales eléctricas de gas natural.

Concluyendo, la principal causa de la inestabilidad de nuestro mercado eléctrico proviene de nuestra alta dependencia extranjera en cuanto a energía eléctrica se refiere.

¹³Argelia corta gasoducto:

<https://actualidad.rt.com/actualidad/408928-argelia-cortar-mayor-gasoducto-espana>

2.1.3. El debate nuclear

El principal objetivo de este trabajo de investigación es llegar a una visión de cómo será la red eléctrica del futuro, especialmente en España. Actualmente en el gobierno español hay un consenso general en cuanto a la dirección de las renovables y su papel en el sector eléctrico, es decir, las renovables serán el principal método de suministro eléctrico para la nación.

Esto es evidente en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)¹⁴, donde también planean instalar almacenamiento eléctrico para soportar las formas de generación eléctrica renovable no gestionable (principalmente eólica y solar fotovoltaica). No se tiene muy claro cómo llevarán a cabo esta hazaña pero si mencionan aumentar la capacidad de centrales hidroeléctricas de bombeo reversible (que guardan energía mediante una diferencia de altura entre dos reservorios de agua).

La razón por la cual se dedica una sección a la cuestión nuclear aún sabiendo que España tiene pensado llevar a cabo el cierre de los reactores nucleares actuales de forma transitoria a lo largo del periodo 2027-2035 es por las siguientes razones:

1. Las nucleares son una opción muy atractiva (sobre todo ahora) para España a largo plazo, tanto económicamente, como ambientalmente.
2. Es dudoso si España podrá cerrar las centrales nucleares sin poner en peligro el seguro y fiable funcionamiento del sistema eléctrico.

En primer lugar es necesario aclarar ciertos mitos alrededor del tema de las centrales nucleares. El primero está relacionado al coste de las nucleares y sobre si a las eléctricas les interesa prolongar la vida útil de estas centrales (además con todo el esquema impositivo actual que es bastante gravoso para las nucleares).

El aspecto de mayor interés en esta conversación es la vida útil de los reactores nucleares que actualmente están en funcionamiento en España. La vida útil es diferente de la vida de diseño (los famosos 40 años), que es el número de años para asegurar que la inversión es rentable, que funcionará con seguridad y que cumplirá con todos los estándares internacionales. Es una fecha mínima de funcionamiento, no se puede diseñar una central nuclear para funcionar 15 años porque entonces no saldrían las cuentas.

Como referencia, el país que marca los estándares internacionales y es el referente normativo y tecnológico de España es Estados Unidos, de hecho 6 de nuestros 7 reactores provienen de ese país. Allí, todos los reactores tienen licencia para mínimo 60 años y al final de 2020 tenían 94 reactores.¹⁵ Son los mismos estándares que los nuestros y es el referente mundial en ese sentido. Nuestros reactores aún no han llegado a los 40 años, como muestra la tabla.

¹⁴ PNIEC: <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>

¹⁵ Del departamento de los EE.UU. *Energy Information Administration* (eia): <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/us-nuclear-industry.php>

El apagón nuclear

Central	Emplazamiento	Empresa propietaria	% de participación	Potencia eléctrica (MW)	Inicio operación comercial	Cierre definitivo de la planta
Almaraz I	Almaraz (Cáceres)	Iberdrola	53,0	 1.049,2	Sep. 1983	2027
		Endesa	36,0			
		Naturgy	11,0			
Almaraz II	Almaraz (Cáceres)	Iberdrola	53,0	 1.051,8	Jul. 1984	2028
		Endesa	36,0			
		Naturgy	11,0			
Ascó I	Ascó (Tarragona)	Endesa	100,0	 1.032,5	Dic. 1984	2029
Ascó II	Ascó (Tarragona)	Endesa	85,0	 1.027,2	Mar. 1986	2030
		Iberdrola	15,0			
Cofrentes	Cofrentes (Valencia)	Iberdrola	100,0	 1.092,0	Mar. 1985	2033
Vandellós II	Vandellós y L'Hospitalet del Infant (Tarragona)	Endesa	72,0	 1.087,1	Mar. 1988	2034
		Iberdrola	28,0			
Trillo	Trillo (Guadalajara)	Iberdrola	48,0	 1.066,0	Ago. 1988	2035
		Naturgy	34,5			
		EDP	15,5			
		Nuclenor	2,0			

Todas las centrales son de agua a presión (PWR), excepto Cofrentes que es de agua en ebullición (BWR).

Figura 8: del Periódico CincoDías, elaborado por A. Meraviglia

Un reciente informe¹⁶ de la Agencia Internacional de la Energía y de la Agencia de la Energía Nuclear intenta medir los precios de todas las tecnologías de producción eléctrica considerando todos los costes (directos e indirectos), y ha llegado a la conclusión de que la forma más barata de de generación eléctrica son las centrales nucleares operadas al final de su vida de diseño y más allá.

Todos los reactores españoles entran dentro de esa categoría (se encuentran al final de su vida de diseño). Y de hecho sería aún más barato operarlas si se extendiera su vida útil.

¹⁶ Informe de la IEA y NEA: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

A continuación mostramos un gráfico sacado del informe mencionado que compara el coste en dólares estadounidenses por millón de vatios hora (MWh)¹⁷ y el factor capacidad¹⁸ de una central nuclear (el promedio es de 92,5%¹⁹).

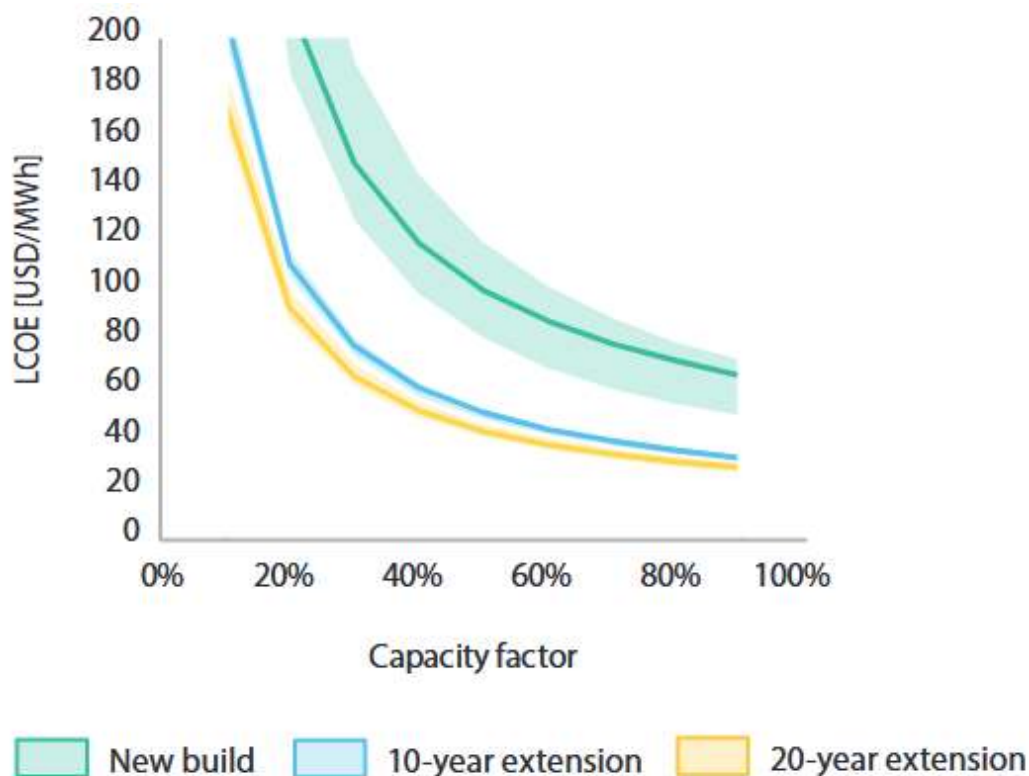


Figura 9: costes de nuevas nucleares y nucleares con una extensión de la vida de diseño

Como se puede observar a partir del gráfico la operación a largo plazo de los reactores nucleares es barata (las nucleares españolas se encuentran en unos 45-50€/MWh).

Suponiendo que el gobierno y el público general estuviera de acuerdo con la alta rentabilidad de la generación eléctrica a través de reactores operados a largo término, aún faltaría discutir el problema que más preocupa, la gestión de residuos radiactivos. En relación al tema es necesario saber que hoy en día cada central nuclear gestiona sus propios residuos, operan lo que se llama un Almacén Temporal Individualizado (ATI).

¹⁷ El Julio (J) es la unidad de energía que es igual a potencia por tiempo. Por tanto un Julio es equivalente al producto de la unidad de potencia (Vatios = W) por 1 segundo, que es igual a 1/3600 de una hora, por tanto 1 J = 1/3600 Wh. El prefijo 'M' es equivalente a 'un millón'. Por tanto 1 MWh es igual a 3.600.000 J = 3,6 GJ (G = mil millones) = 3, 6 mil millones de Julios.

¹⁸ El factor de capacidad es una medida de fiabilidad, un factor de capacidad de 50% significa que la planta genera electricidad, de media, el 50% del tiempo.

¹⁹ 'El factor de capacidad promedio de las centrales nucleares es 92,5%', fuente (Duke Energy): <https://nuclear.duke-energy.com/2021/05/18/capacity-factor-it-s-a-measure-of-reliability>

Para resolver este problema en 2009 España planteó el Almacén Temporal Centralizado (ATC), proyecto que pretendía almacenar en el propio país los residuos generados en el mismo. Actualmente la licitación del ATC se encuentra paralizada hasta que el Consejo de Seguridad Nuclear conceda los permisos y termine de analizar los informes, que indican que el emplazamiento elegido no era el adecuado. Por otra parte, el dinero para construir el ATC ya está disponible y fue pagado esencialmente por las mismas centrales nucleares, esto es por el cambio de la ley que ocurrió en 2006 y obliga a que todos los que generan residuos radiactivos deben pagar por su gestión.

Ya en 2022, más de una década después, está a punto de ser finalizado pero España sigue sin tener un ATC. Esto es por diferentes controversias, pero la razón principal es estrictamente política.



Figura 10: Ilustración del plan del ATC español

La ilustración anterior muestra el diseño general del almacén construido en Villar de Cañas (Cuenca).

En resumen, el problema del almacenamiento de residuos radiactivos no parece que será un obstáculo a la larga considerando las medidas que se tienen actualmente para asegurar y vigilar los ya mencionados residuos. Es decir, tenemos un plan y lo estamos ejecutando.

El siguiente problema relacionado con los residuos radiactivos tiene más que ver con el “peligro a la seguridad de los ciudadanos” que podrían causar. Para revisar este tema con el objetivo de dar la suficiente información para que el lector desinformado no haga críticas infundadas a la energía nuclear, a continuación se evaluará el peligro que supusieron los dos accidentes nucleares más conocidos y posteriormente se comparará la energía nuclear con la fósil y renovable, en concreto su “peligrosidad”.

Para empezar, es de cierto valor mencionar que llevamos desarrollando reactores nucleares desde 1951, y desde entonces han habido alrededor de 30 incidentes y accidentes desde que se registró el primer accidente en Chalk River, Canadá, en 1952. Principalmente, los tres accidentes más graves y mejor documentados se utilizaron para el desarrollo de la taxonomía del conocimiento sobre accidentes nucleares.²⁰

Se reportan diferentes cifras del número total de accidentes nucleares. Esta discrepancia se debe a los diferentes marcos que se utilizan para clasificar un evento nuclear como accidente.

No todos los eventos tienen consecuencias similares y existen marcos que recopilan criterios para clasificar los eventos como accidentes, incidentes, anomalías o desviaciones. Aquí nos referimos a una definición más amplia de accidente basada en el marco INES (Escala Internacional de Eventos Nucleares y Radiológicos). INES califica los eventos nucleares de 0 a 7 según varios criterios como la cantidad de material radiactivo liberado, los niveles de exposición, el número de muertes y lesiones. Los eventos clasificados con 4-7 se definen como accidentes, 2-3 como incidentes, 1 como anomalía. Hasta ahora, solo dos accidentes tienen una calificación de 7: Fukushima y Chernóbil. Ha habido alrededor de 30 eventos clasificados como 2 o más.

En la siguiente página mostramos una tabla de excel proporcionada por IAEA que puede iluminar a los lectores en cuanto a la severidad y frecuencia de accidentes e incidentes en centrales nucleares, sabiendo que hay más de 400 reactores nucleares operativos en el mundo.

La industria nuclear mundial ha experimentado tres accidentes nucleares importantes, que han influido fuertemente en la industria, cada uno con diferentes daños internos en el núcleo del reactor, diferentes niveles de liberación radiactiva al medio ambiente y diferentes acciones tomadas para hacer frente a la emergencia: el accidente de *Three Mile Island* (1979), el accidente de Chernóbil (1986) y el accidente de Fukushima Daiichi (2011).

Chernóbil fue sin duda el peor accidente nuclear de la historia por varias razones: la tecnología del reactor era vieja y estaba mal preparada para emergencias, y la respuesta del gobierno fue lenta y más preocupada por la imagen pública que por el control de daños.²¹

²⁰ IAEA Nuclear Energy Series, Nuclear Accident Knowledge Taxonomy, 2016
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1730_web.pdf

²¹ Nuclear Energy Agency, Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts, 2002)
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_13598

Year	Incident	INES level	Country
2011	Fukushima	5	Japan
2011	Onagawa		Japan
2006	Fleurus	4	Belgium
2006	Forsmark	2	Sweden
2006	Erwin		US
2005	Sellafield	3	UK
2005	Atucha	2	Argentina
2005	Braidwood		US
2003	Paks	3	Hungary
1999	Tokaimura	4	Japan
1999	Yanangio	3	Peru
1999	Ikitelli	3	Turkey
1999	Ishikawa	2	Japan
1993	Tomsk	4	Russia
1993	Cadarache	2	France
1989	Vandellos	3	Spain
1989	Greifswald		Germany
1986	Chernobyl	7	Ukraine (USSR)
1986	Hamm-Uentrop		Germany
1981	Tsuraga	2	Japan
1980	Saint Laurent des Eaux	4	France
1979	Three Mile Island	5	US
1977	Jaslovské Bohunice	4	Czechoslovakia
1969	Lucens		Switzerland
1967	Chapelcross		UK
1966	Monroe		US
1964	Charlestown		US
1959	Santa Susana Field Laborat		US
1958	Chalk River		Canada
1958	Vinča		Yugoslavia
1957	Kyshtym	6	Russia
1957	Windscale Pile	5	UK
1952	Chalk River	5	Canada

Figura 11: Tabla de accidentes e incidentes a lo largo de los años

Si bien la organización de defensa civil de la URSS instó en tomar medidas rápidas y decisivas para informar a la población del accidente y sacar a la gente de peligro, otras instituciones soviéticas, como el Partido Comunista y la KGB, temían la

amenaza del accidente a su legitimidad más que sus implicaciones para la salud pública.²² Aún así, solo 31 personas murieron directamente en el accidente.

Esta cifra proviene de la Agencia de Energía Nuclear, en específico de su asesoramiento de los impactos tanto radiactivos como de salud del desastre ya citado en la página 20. Esta cita describe sus conclusiones:

“Los efectos agudos en la salud ocurrieron entre el personal de la planta y las personas que intervinieron en la fase de emergencia para combatir incendios, brindar asistencia médica y operaciones de limpieza inmediata. Un total de 31 personas murieron como consecuencia del accidente, y unas 140 personas sufrieron diversos grados de enfermedad por radiación y problemas de salud agudos relacionados con la radiación. Ningún miembro del público en general sufrió este tipo de efectos ”

Cuando tratamos de averiguar el número total de muertes indirectas (causadas por exposición a largo plazo de elementos radiactivos) las cosas se complican mucho más porque te sumerges en la controversia de cómo se hicieron estas estimaciones y que modelos seguían.

La estimación más pesimista proviene de un estudio encargado por el Partido Verde Europeo y proyecta hasta 60.000 muertes prematuras para el año 2065. La mayoría de los estudios científicos arrojan cifras mucho más bajas que este. La OMS ha estimado que en total el número de muertos a largo plazo será de alrededor de 4000, mientras que el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas concluyó que incluso esta cifra podría ser demasiado alta. En este instante es lógico que el lector se sienta perdido, ¿cómo es posible que haya estimaciones tan diferentes?

Hay muchos factores diferentes que entran en los modelos que estiman el número de cánceres fatales. Sin embargo, el factor principal que hace que los números difieran es la extensión del área expuesta a la radiación.

Éste es el factor principal que causa la diferencia entre los estudios. Algunos estudios solo toman en cuenta los países cercanos donde poblaciones más pequeñas estuvieron expuestas a dosis más altas de radiación. Mientras que otros expanden el efecto a toda Europa y afirman que las dosis bajas también pueden aumentar la probabilidad de cáncer. Este último soporte se basa en el método “lineal sin umbral” o *Linear No Threshold model* (LNT), que asume que no existe una dosis segura de radiación y que incluso dosis más bajas son peligrosas. Aunque muchos órganos asesores todavía utilizan este modelo, científicamente ha sido muy debatido. El siguiente gráfico muestra los diferentes modelos de riesgo de exposición a radiación en comparación con LNT:

²² Geist E., Political Fallout: The Failure of Emergency Management at Chernobyl', 2015.
<https://www.jstor.org/stable/10.5612/slavicreview.74.1.104?seq=1>

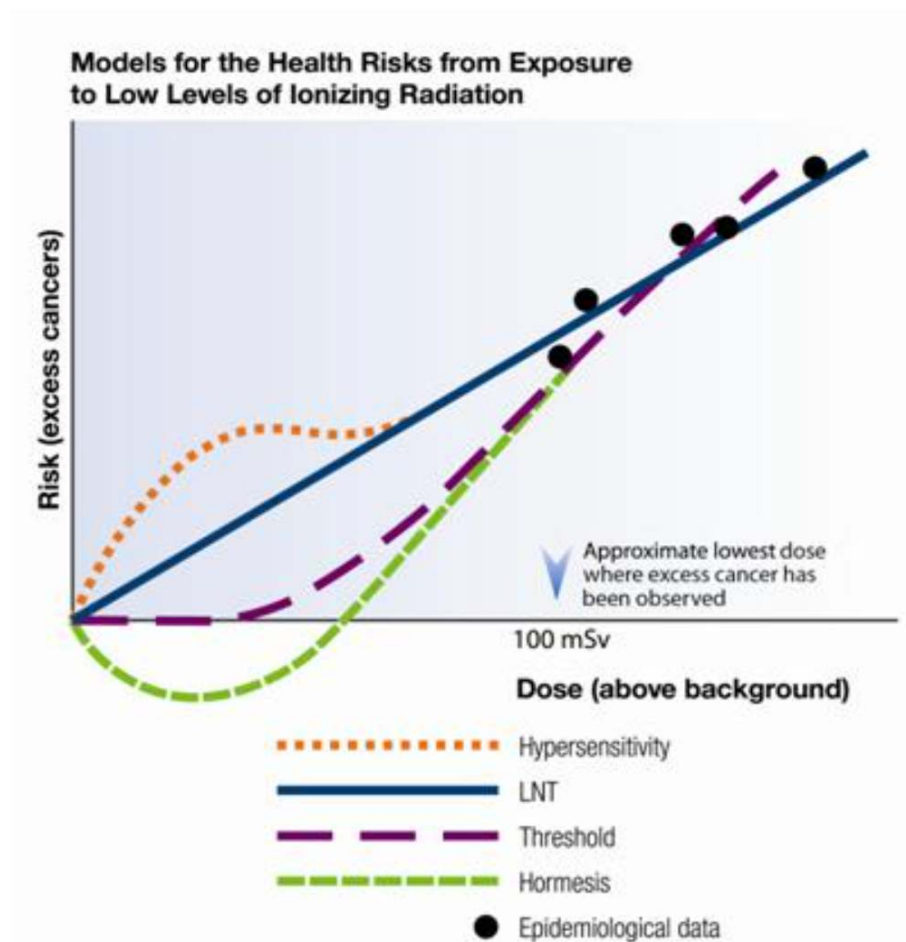


Figura 12: Modelo LNT comparado con otros tres modelos y datos epidemiológicos

Según el estudio: "El modelo de hipersensibilidad sugiere un mayor riesgo a dosis más bajas. El modelo LNT es la línea recta que se extrapola a cero, lo que significa que el riesgo de cáncer aumentará al aumentar la dosis. El modelo de umbral implica que por debajo de una determinada dosis, no hay riesgo y por último el modelo de hormesis sugiere que las dosis bajas de radiación pueden incluso ser protectoras y beneficiosas".

Las evaluaciones anteriores, incluida la estimación de la OMS de 4.000 muertes, aplica el enfoque de modelado: modelo lineal sin umbral (LNT). Según este modelo, una mayor exposición incluso a dosis muy bajas aumenta la mortalidad. Sin embargo, el aumento de la radiación para la mayoría de las poblaciones expuestas fue a niveles comparables a la radiación de fondo natural: hasta la fecha no hay evidencia clara observable de que esto haya aumentado la incidencia de cánceres.

Esto no se aplica a poblaciones con altos niveles de exposición aguda donde se observó claramente un aumento de la incidencia.

Otras causas que pueden efectuar en diferentes número de víctimas son los efectos hereditarios, aunque algunos investigadores señalan que aún es demasiado pronto para decidir sobre los números, ya que podrían producirse efectos en las próximas generaciones, por ejemplo, en los hijos y nietos de las poblaciones expuestas en ese entonces. También está la falta de confianza estadística, ya que no es trivial determinar qué proporción de las muertes relacionadas con el cáncer son atribuibles a la radiación del accidente y cuáles se habrían producido sin el accidente. Por último también es obligatorio indicar que las primeras evaluaciones probablemente sobreestimaron la dosis a las poblaciones expuestas. Esto fue informado en el informe a la Asamblea General sobre los efectos en la salud debido al accidente nuclear de Chernobyl, cita del mismo informe:

"Las primeras evaluaciones de la dosis a las poblaciones expuestas basadas en las mediciones disponibles en ese momento tendían a utilizar suposiciones cautelosas sobre las contramedidas aplicadas y los parámetros ambientales y dosímetros involucrados. Como consecuencia, las dosis se sobreestimaron en general".

Es decir, lo más seguro es que no han habido más de 4.000 víctimas a causa de este desastre nuclear, que hay mucha probabilidad de que no vuelva a ocurrir jamás un fallo de esta magnitud.

El segundo gran accidente nuclear fue el de Fukushima Daiichi en 2011. Fukushima no solo operó con una tecnología mucho mejor que era menos peligrosa en primer lugar, sino que se habían implementado medidas de seguridad mucho mejores y la respuesta oficial fue rápida y decisiva. Un estudio²³ que comparó los dos accidentes llegó a esta misma conclusión, y es que las campañas de seguimiento posteriores a ambos accidentes revelan que el impacto ambiental del accidente de Chernobyl fue mucho mayor que el del de Fukushima. Tanto las áreas altamente contaminadas como las áreas evacuadas son más pequeñas alrededor de Fukushima y los efectos en la salud proyectados en Japón son significativamente menores que después del accidente de Chernobyl. Esto se debe principalmente al hecho de que las campañas de seguridad alimentaria y las evacuaciones funcionaron de manera rápida y eficiente después del accidente de Fukushima. Las autoridades japonesas gestionaron la evacuación de la población de las zonas potencialmente afectadas de forma extraordinariamente rápida y eficaz.

Un total de 573 muertes han sido certificadas como "relacionadas con desastres" por 13 municipios afectados por la crisis en la paralizada planta de energía nuclear

²³ Steinhäuser G. et al., Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts, 2014.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971301173X>

Fukushima No. 1, según una encuesta de Yomiuri Shimbun. Un certificado de defunción relacionado con un desastre se emite cuando una muerte no es causada directamente por una tragedia, sino por la fatiga o el agravamiento de una enfermedad crónica debido al desastre.²⁴

Por tanto, el número actual de muertos es de 573. La principal diferencia aquí es que estas muertes no fueron consecuencia de la radiación. Fueron muertes indirectas por el estrés de la evacuación de las áreas alrededor de los reactores, y ocurrieron casi en su totalidad en poblaciones mayores.

El accidente nuclear de Fukushima fue provocado por el terremoto y el tsunami precedentes. Un gran número de personas en un radio de 20 km de la planta tuvieron que ser evacuadas en una atmósfera de pánico solo unas pocas horas después del terremoto. Un proceso de evacuación bastante mal organizado puso especialmente en riesgo a los ancianos, lo que como consecuencia se reflejó en el mayor número de muertes entre esta parte de la población. En general, el 65% de las muertes relacionadas con desastres ocurrieron entre personas mayores de 60 años. Las condiciones de la vida temporal han empeorado los efectos en las personas mayores ya institucionalizadas. Además, los efectos a largo plazo de la reubicación a gran escala introdujeron más problemas de salud pública. En total, más de 150.000 personas fueron reubicadas después del accidente. Sin embargo, algunos expertos sugirieron que no habría sido necesario trasladar a tantas personas.

Las estimaciones de las posibles muertes a largo plazo por radiación varían ampliamente: desde ninguna hasta aproximadamente 1000.

Este estudio, por ejemplo, estima un número de muertos del orden de 1.000:

Fuente: Frank N. von Hippel, Las consecuencias radiológicas y psicológicas del accidente de Fukushima Daiichi, 2011.

<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0096340211421588>

Cita: "El área en Japón contaminada con cesio-137, a los mismos niveles que causaron la evacuación alrededor de Chernobyl, también es aproximadamente una décima parte del tamaño. Es probable que el número estimado de muertes por cáncer resultantes en el área de Fukushima debido a la contaminación debido a más de 1 curie por kilómetro cuadrado aumenta en consecuencia, del orden de 1000".

Este estudio de 2012 da 1.000 como límite superior, pero ve el número más cercano a 130.

²⁴ Yomiuri Shimbun, Daily Yomiuri Online, 2012.
<https://www.nrc.gov/docs/ML1234/ML12340A564.pdf>

Fuente: Hoeve y Jacobson, Efectos en la salud mundial del accidente nuclear de Fukushima Daiichi, 2012.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ee/c2ee22019a#!divAbstract>

Cita: "Estimamos 130 (15–1100) muertes relacionadas con el cáncer y 180 (24–1800) morbilidades relacionadas con el cáncer que incorporan incertidumbres asociadas con los modelos de exposición-dosis y dosis-respuesta utilizados en el estudio. "

Un año después, se publicó otro estudio que considera que la cantidad de muertes futuras es más probable que se acerque a las 1.000, el rango superior del estudio anterior.

Fuente: Beyea J., Lymanb E. y von Hippel F.N, Contabilización de las dosis a largo plazo en "los efectos en la salud mundial del accidente nuclear de Fukushima Daiichi", 2013.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ee/c2ee24183h/unauth#!divAbstract>

Cita: "En general, el resultado neto de ajustar los números de Ten Hoeve y Jacobson para tener en cuenta la dosis a largo plazo de radiocésio es incierto, pero la estimación de rango medio para el número de muertes futuras probablemente esté más cerca de 1000 que de 125. "

Entonces, la mayoría de las estimaciones pesimistas no excederán las 1,000 muertes en el futuro. Solo un estudio arrojó una estimación más alta. Un artículo de investigación independiente, no revisado por pares, informó sobre unos 3.000 cánceres fatales en el futuro. El autor también participó en el informe sobre las secuelas del accidente de Chernobyl que fue criticado por algunos investigadores por sus elevadas estimaciones sobre muertes a largo plazo.

Fuente: Ian Fairlie, Evaluación de los efectos a largo plazo en la salud de la lluvia radiactiva de Fukushima, 2013.

<https://www.ianfairlie.org/news/assessing-long-term-health-effects-from-fukushimas-radioactive-fallout/>

Finalmente en 2018, sólo se había confirmado una muerte entre los trabajadores como resultado de cáncer de pulmón inducido por radiación. El incidente fue anunciado por el mismo Japón y reportado por la BBC.

En conclusión, solo hubo una muerte confirmada por radiación de todo el accidente. Y se estima que a largo plazo morirán cerca de 1.000 personas.

El segundo y más importante tema en relación a este trabajo de investigación abarca la proporción de víctimas causadas por diferentes tecnologías de generación

eléctrica tanto en el tiempo como la comparativa de estas tecnologías (en cuanto a mortalidad).

La primera comparación con la energía nuclear son las renovables. Dentro de estas, la solar, eólica y geotérmica solo causan muertes en el proceso de construcción y mantenimiento²⁵, además de ser una parte minúscula de la generación total de energía. El próximo es un gráfico elaborado por Our World in Data que muestra el consumo global primario de energía por fuente:

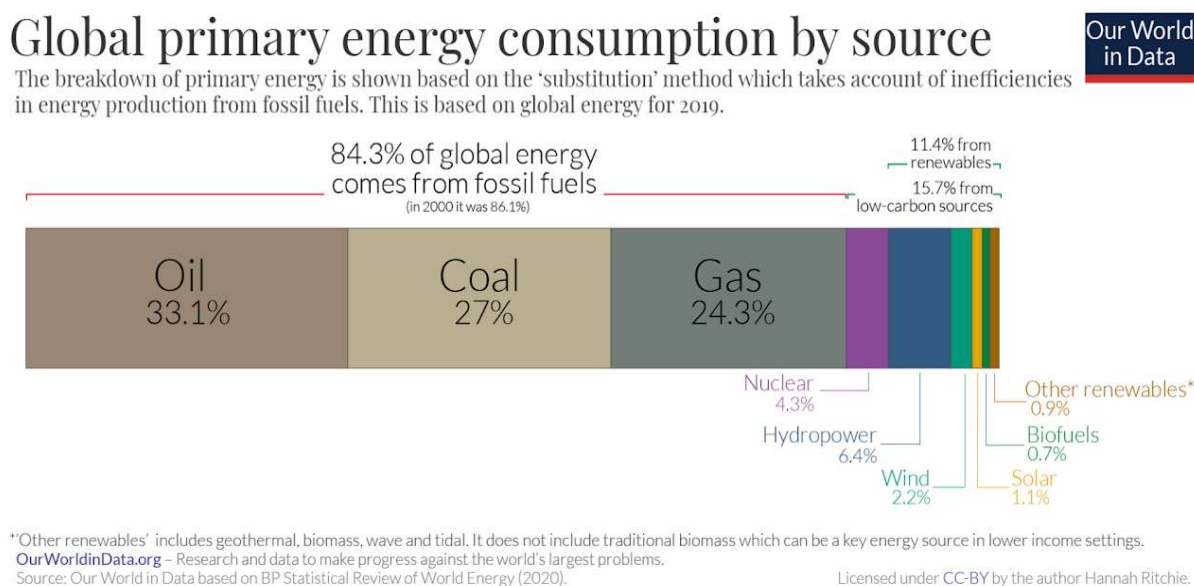


Figura 13: Porcentaje de consumo energético por fuente

A partir del gráfico anterior, se puede observar que menos del 5% del consumo energético global proviene de estas fuentes.

Por otro lado, la energía hidráulica proporciona más del 6% y también es la más mortal de todas las renovables, causando en las últimas cinco décadas cientos de miles de muertes.²⁶

Un accidente se destaca claramente: la falla de la presa hidroeléctrica de Banqiao en 1975 en China, que tiene sorprendentes similitudes con Chernóbil: tecnología antigua, diseño deficiente y mala gestión por parte de gobiernos autoritarios preocupados por las apariencias. En pocas palabras, un tifón masivo provocó inundaciones intensas que destruyeron la presa y, posteriormente, una serie de presas más pequeñas en una reacción en cadena que desencadenó una inundación

²⁵ Sovacool B.K. et al., Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems, 2016.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615009877>

²⁶ La anterior fuente también proporciona este dato, el informe por Sovacool B. K et al.

de más de 15 mil millones de metros cúbicos de agua en total. “Olas de un kilómetro de ancho, tan altas como edificios, devastaron miles de kilómetros cuadrados de campo e innumerables comunidades”. Con todo, se estima que el número de muertos por este único accidente y sus consecuencias directas oscila entre 85.000 y 240.000 víctimas.

En el informe por Sovacool B.K. y et. al. sobre el tema (ubicado en el pie de página) menciona lo siguiente:

“Hay varias estimaciones sobre el número total de muertos del accidente y no es posible encontrar una cifra sólida. Dado que el proceso de evacuación no fue del todo satisfactorio, muchas personas sufrieron hambrunas y epidemias después del accidente. Debido a esto, no fue posible especificar el número atribuido únicamente al accidente en sí.”

Pero todas estas muertes causadas por la energía nuclear y renovable son en realidad insignificantes en comparación con la verdadera fuente de energía asesina, los combustibles fósiles. La fuente de energía y electricidad más utilizada.

Cuando quemamos combustibles fósiles para calentar agua y hacer girar turbinas o para causar mini explosiones para mover automóviles con motores de combustión interna, se liberan a la atmósfera gases como ozono, dióxido de azufre, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno.²⁷

La inhalación de estos gases interrumpe la función pulmonar, lo que agrava enfermedades crónicas como el asma y la bronquitis y provoca una amplia gama de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Pero aún más peligrosa es la contaminación por partículas finas que causa la quema de combustibles fósiles: una mezcla de gotas sólidas y líquidas de sustancias venenosas, tan pequeñas como 2.5 micrómetros de diámetro. Fácilmente encuentran su camino hasta lo más profundo de los pulmones y aumentan el riesgo de enfermedades mortales como cáncer de pulmón, derrames cerebrales y enfermedades cardíacas.²⁸

La contaminación del aire relacionada con los combustibles fósiles es la principal causa de muertes relacionadas con el medio ambiente en el mundo.²⁹

Según la OMS³⁰, representa el 29% de todos los casos de cáncer de pulmón, el 17% de las muertes por infección aguda de las vías respiratorias inferiores, el 24% por accidente cerebrovascular, el 25% por cardiopatía isquémica y el 43% por

²⁷ Ambient air pollution: Health impacts, WHO
<https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>

²⁸ WHO, 2018.
[https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

²⁹ WHO, Preventing disease through healthy environments, 2016.
https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204585/9789241565196_eng.pdf?sequence=1

³⁰ Misma fuente que la nota número 28

enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Con todo, la contaminación del aire exterior se suma a la muerte de 4 millones de personas cada año.

En conjunto, se estima que la contaminación del aire por combustibles fósiles ha causado la muerte de alrededor de 100 millones de personas en los últimos 50 años.

Pero esta conclusión no es completamente justa por parte de los combustibles fósiles ya que también proporcionan más del 80% de la energía mundial, por lo que tiene sentido que causen la mayoría de las muertes.

Para resolver este problema de comparación justa entre fuentes de energía se ideó la unidad de muertes por unidad de energía, o muertes por TWh (un billón de vatios hora). 1 TWh es aproximadamente el consumo anual de 27.000 ciudadanos de la Unión Europea.

Para producir esa cantidad de energía durante un año, el carbón causa 25 muertes, el petróleo 18 y el gas natural 3. La energía renovable causa una muerte cada pocas décadas. ¿Y la nuclear? En el peor de los casos, la energía nuclear causaría una muerte cada 14 años.³¹

De hecho, sorprendentemente, un estudio³² encontró que la energía nuclear en realidad salvó dos millones de vidas entre 1971 y 2009 al desplazar los combustibles fósiles del mix energético global.

Los números y datos todos indican a la misma conclusión, aún utilizando los datos más pesimistas y problemáticos, la energía nuclear se encuentra entre las fuentes más seguras de generación. En una era donde encontramos dificultades al ralentizar el cambio climático, la energía nuclear es una opción de bajas emisiones que nos podría ayudar a no empeorar la situación de nuestro planeta.

Además que la energía nuclear es una tecnología de generación eléctrica de respaldo, no es variable como las renovables no gestionables, lo cual nos da seguridad de cara al futuro, a una red más barata, segura y limpia.

Como opinión personal de los autores de este trabajo de investigación, preferimos que se guarde temporalmente material radiactivo en el subsuelo a inhalar gases tóxicos y promover la aceleración del cambio climático.

³¹ OWID, What are the safest sources of energy?, 2020.
<https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>

³² Kharecha, P.A., and J.E. Hansen, Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power, 2013.
<https://pubs.giss.nasa.gov/abs/kh05000e.html>

2.2. Disrupción

Antes de comenzar sería interesante intentar responder de manera intuitiva una simple pregunta ¿cuándo se llegará a ser 100% verde en generación eléctrica? O dicho de otra manera, ¿cuándo llegaremos a ser un país de 0% emisiones netas de CO2 en generación eléctrica?

En un principio, esta pregunta sería extremadamente fácil de responder. España misma tiene el objetivo de llegar a ser un país de 0% emisiones netas en 2050.

Según el ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico: “España ha adquirido el compromiso de limitar o de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, tanto en el ámbito de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, su Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, como en el de la Unión Europea.” Y también según el mismo ministerio: “la propuesta de la Comisión de marzo de 2020 de la Ley del clima Europea se establece el marco para alcanzar la neutralidad climática de la Unión Europea en 2050.”

Por tanto esa sería la respuesta. Fácil y sencillo, ¿verdad? Pues no tan rápido. El problema con esta respuesta es que no toma en cuenta la respuesta del mercado en general. Da por sentado que el estado llegará a esa meta cuando se lo proponga. Ya que el estado sabrá más sobre este tema, al fin y al cabo es el ministerio para la “transición ecológica”.

Para dar a entender al lector cómo se podría llegar a una transición completa antes de esa fecha (de una a dos décadas antes) es necesario dar una pequeña introducción al crecimiento exponencial. El lector se la puede saltar si ya está familiarizado con el crecimiento exponencial y logarítmico.

Para empezar, cuando se suele hablar de crecimiento exponencial es de uso común utilizar dinero. Es algo que todo el mundo conoce y que nos debería de como mínimo dar un poco de interés saber cómo funciona. En específico se suele utilizar como ejemplo la inflación. La inflación, para el que no sepa, es el proceso que devalúa una moneda a lo largo del tiempo. Las causas no nos importan, porque no estamos haciendo una investigación de procesos económicos, sino de mercados. Un ejemplo para entender cómo funciona es este: Si un día con 1 € eres capaz de comprar un producto, pero la tasa de inflación en tu país es del 100% por día, el siguiente día necesitarás $(1+100\%)*(1\text{ €}) = 2\text{ €}$ para comprar el mismo producto. Es decir, la moneda ha perdido el 50% de su valor de un día para otro. La tasa anual de inflación en España es mucho más baja, con una media de aproximadamente el 2 %. De tal manera que cada año una cierta cantidad de dinero pierde un 2 % de valor (asumiendo que el dinero no está invertido ni ahorrado si no que guardado en metálico).

El ejercicio mental propuesto es este: asumiendo que un país tiene una tasa de inflación estable del 5,3% anual, ¿qué podrás comprar con 1.000€ en 20 años? Es decir, si guardas el dinero debajo de un colchón o en una caja fuerte, y no lo tocas en 40 años, ¿cuál será su nuevo valor? Para aquellos que no estén acostumbrados a las maravillas (o en este caso, terrores) del crecimiento exponencial les sorprenderá saber que ese dinero se habrá devaluado un 67%. Es decir, un tercio del valor original. Ahora con los 1.000€ que guardaste hace casi solo 20 años solo podrás comprar productos que en esa época costaban unos 330 €. ¿Y qué pasa si esperamos unos 10 añitos más? Esos 1.000 € iniciales solo podrían comprar productos que hace 30 años costaban 190 €. Es decir, con una tasa anual de inflación del 5,3 %, que inicialmente podría parecer un número pequeño ya que son poco más de cinco centésimas de crecimiento por año, se convierte en un desplome del valor de cualquier moneda en poco tiempo.

Este crecimiento exponencial tiene otro nombre, que es crecimiento logarítmico. Se podrá ver la relevancia de este término cuando hablemos de gráficas en el próximo apartado.

2.2.1. Introducción

Antes de comenzar es relevante mencionar que en este y próximos apartados se observarán datos de Estados Unidos ya que es el país donde diferentes procesos y efectos son bastante más fáciles de ver. Además de tener muchos datos.

Esto no debería de sorprender al lector ya que se mencionó en la introducción a este trabajo que España está considerablemente atrasado como país en la adopción de diferentes tecnologías con respecto a otros países. Es decir, en los gráficos que mostramos se podría imaginar España como estando de 3 a 5 años atrasado.

Otra nota relevante y a tener en cuenta es que cuando se mencione la disrupción de un sector llegando en 2030 nos referimos a la década de los 2030, aunque más cercano al inicio de la década que al final.

Otra nota relevante sería tener en cuenta que el dólar estadounidense que aparece en estos gráficos es aproximadamente un 90% del valor de un euro.

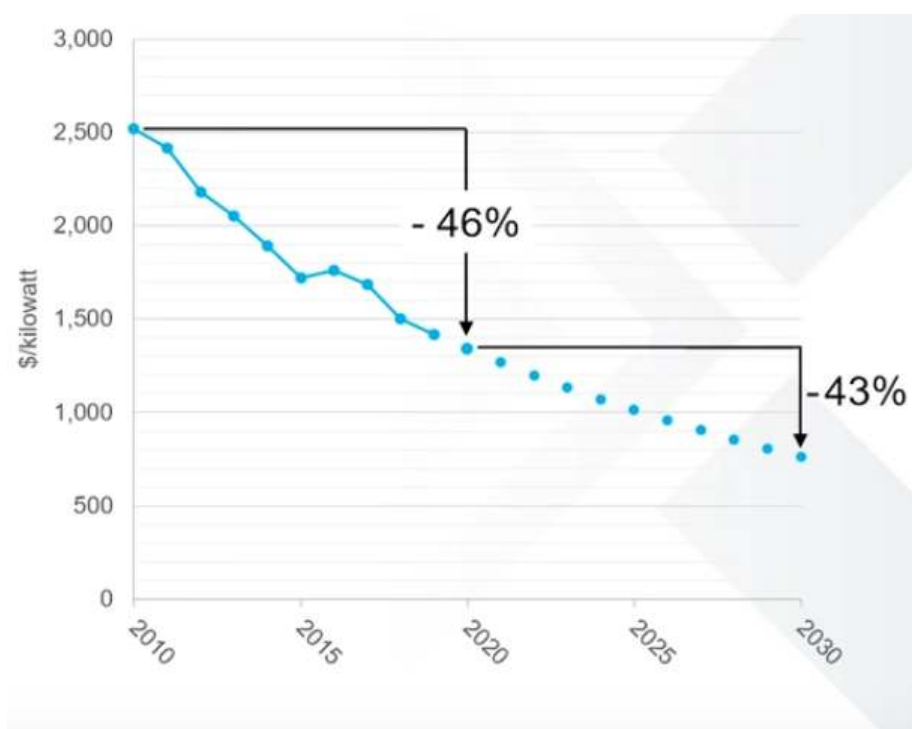
Para empezar, el resumen más claro y conciso del tema es que estamos en la cúspide de la disrupción más profunda del sector energético en más de un siglo. En esta sección analizamos la viabilidad de un sistema energético de construcción compuesto exclusivamente por un sistema de energía solar FV (fotovoltaica), eólica y baterías. Creemos que solo se necesitan estas tres tecnologías (aunque la energía nuclear sin duda sería útil).

Al igual que otros a lo largo de la historia, esta disrupción es el resultado de la convergencia de varias tecnologías clave. El costo de la energía solar, eólica y de baterías ha ido mejorando sin cesar durante varias décadas y en poco tiempo las centrales eléctricas tradicionales no serán capaces de competir en costos. Esto hace que la disrupción sea inevitable, sólo debido a las fuerzas económicas.

La disrupción no sucederá en todas partes exactamente al mismo tiempo, pero para aquellas regiones que elijan liderar la disrupción, un sistema 100% solar, eólico y de baterías es posible tan pronto como en 2030 (España puede quedarse atrás en comparación). Las tecnologías convencionales de carbón, gas y otros activos de generación eléctrica quedarán varados por la interrupción. Por tanto, ninguna nueva inversión en estas tecnologías es racional a partir de este momento, al menos en España. En general, las disrupciones tecnológicas en el coste de estas son la fuerza impulsora fundamental detrás de su adopción. Solo desde 2010, el costo de la generación de electricidad eólica se ha reducido en un 46% en los Estados Unidos. Eso es un promedio de casi el 6% anual. Es razonable que esta tecnología siga mejorando, ya que no parece haber ningún factor limitante más que el tamaño y la cadena de suministro, que muestra signos de recuperación. Por eso proyectamos una mejora del 5,5% anual en la próxima década (de nuevo, España puede retrasarse un poco). El siguiente gráfico muestra el costo de la energía eólica por kilowatio en los últimos 10 años en los EE. UU. y nuestra proyección para los próximos 10 años.

¿Cómo es que podemos predecir lo que pasará en la próxima década mirando solo el gráfico?

La respuesta es que en realidad hay otro gráfico que enseña mejor cómo podemos llegar a predecir esto. Primero de todo, el crecimiento exponencial es difícil de ver en

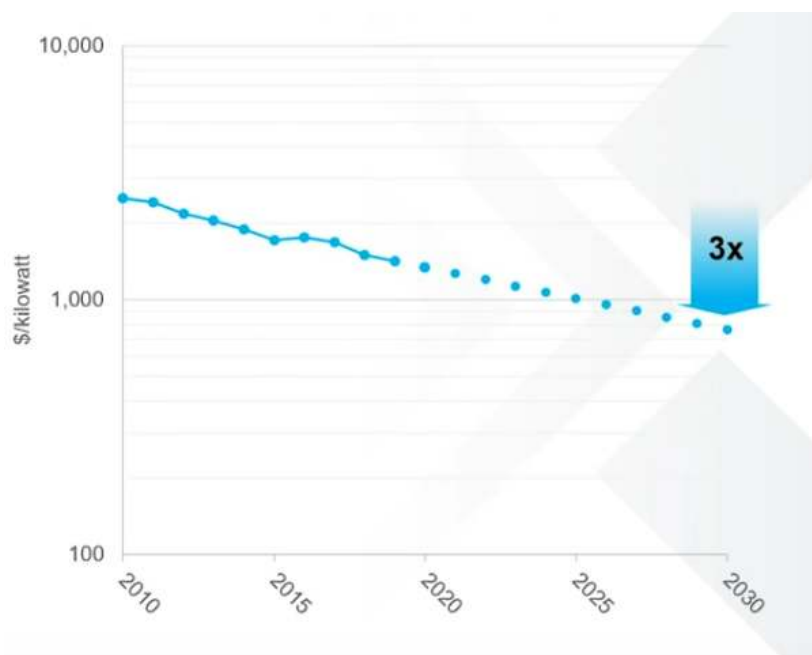


este gráfico, ya que la métrica del gráfico crece de manera unitaria. Es decir, después de 1 \$/MW viene 1,5 \$/MW y luego 2 \$/MW. Es decir, va creciendo de manera que suma a la unidad anterior, hasta llegar a 3. El problema es el siguiente, que seguro que hasta el lector lo puede ver si es presentado de esta manera:

$$0,5 + 0,5 + 0,5 = 0,5 \times 4$$

$$0,5 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,5 = 0,5^4$$

Es decir, la primera operación viene bien para describir incrementos fijos, que cambian a un ritmo de crecimiento determinado (en este caso por unidad de tiempo crece en 0,5 unidades). Pero, ¿qué ocurre cuando el ritmo de crecimiento no es constante? Es decir, cuando el ritmo de crecimiento es exponencial. Pues se utilizan gráficos logarítmicos, donde en vez de enseñar datos cada 500 \$/kW, la unidad va creciendo a medida que subes. Es decir. Primero de 0 a 100, luego de 100 a 1.000 y después de 1.000 a 10.000. El siguiente gráfico es el mismo que el anterior pero ajustado a este nuevo requerimiento:



Figuras 14 y 15:\$/kW con respecto a tiempo de la generación eléctrica eólica (fuente: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2018³³)

Ahora el lector podrá ver cómo de fácil es predecir los siguientes 10 años, solo se ha de seguir la línea. Claro que es bastante más complicado ya que no está asegurado que los aerogeneradores sigan abaratándose al ritmo de los últimos 10 años. Hay varios factores que nos hacen creer que aún hay varios aspectos que mejorar y se podría aprovechar mucho más la tecnología, tanto por parte de la construcción de los mismo aerogeneradores como de cadena de suministro. En los últimos 10 años

³³ Berkeley Lab & Bolinger, M. Wind Technologies Market Report:
https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2020_wind_energy_technology_data_update.xlsx

se ha abaratado un promedio de un 6% anualmente, nosotros predecimos en la próxima década un 5,5% anualmente, para un total de mejora de 3 veces en cuanto al precio de la energía eólica a lo largo de 2 décadas. (no hemos encontrado datos fiables de esto para España, solo hemos encontrado de Estados Unidos debido a una investigación por parte del laboratorio de la universidad de Berkeley)

Antes de seguir es importante hacer una incisión sobre cómo va España en este tema. Primero de todo, es esperanzador saber que en 2021, según REE, “las energías renovables podría lograr su mejor registro este año con una producción cercana al 46,6% de toda la electricidad generada en el país, un 9,8% más que el año pasado, según las previsiones a cierre de año”.³⁴

Aún lo dicho anteriormente, admitimos que España está en mejor puesto para estar a la par de los países que lideren en esta disrupción, como se puede ver en el ranking de países más atractivos para invertir en transición energética, España quedó en la 5ª posición, según la edición del Climatescope que, desde hace 10 años publica la compañía de investigación BloombergNEF. “De esta manera, España avanza tres puestos en un ranking que este año lidera Países Bajos, con una puntuación de 2,88 puntos sobre 5, seguido de Dinamarca (2,86) y España, con 2,64 puntos.”³⁵

Como otro añadido, España también espera que encabeze el ‘boom’ de producción solar fotovoltaica. Por ejemplo, Wood Mackenzie³⁶ espera que para 2030, más de 124 GW de gas, carbón y capacidad nuclear sean desplazados en todo el continente, y la mayoría de los estados de la UE buscan aumentar el uso de energía solar. Con Alemania y España a la cabeza, la firma de investigación ve que la tecnología solar fotovoltaica (PV) generará el 20% de toda la energía en Europa para 2050. Es probable que la instalación de energía solar fotovoltaica experimente una tasa de crecimiento anual compuesta del 10% hasta el final de la década.

El siguiente gráfico muestra varios países a lo largo de las siguientes décadas elaborado por Wood Mackenzie. Nosotros también pensamos que el crecimiento de las solares, tanto en abaratamiento de costos como en producción será del 10% anualmente hasta 2030:

³⁴ Las renovables alcanzan en 2021 su mejor registro de producción, con una cuota del 46,6%:
<https://elperiodicodelaenergia.com/las-renovables-alcanzan-en-2021-su-mejor-registro-de-produccion-con-una-cuota-del-466/>

³⁵ España, tercer país más atractivo para invertir en la transición energética:
<https://elperiodicodelaenergia.com/espana-tercer-pais-mas-atractivo-del-mundo-para-invertir-en-transicion-energetica/>

³⁶Wood Mackenzie, también conocido como WoodMac, es un grupo global de consultoría e investigación en energía, productos químicos, energías renovables, metales y minería que proporciona datos, análisis escritos y asesoramiento de consultoría.

Penetration of solar PV generation in Europe to 2050

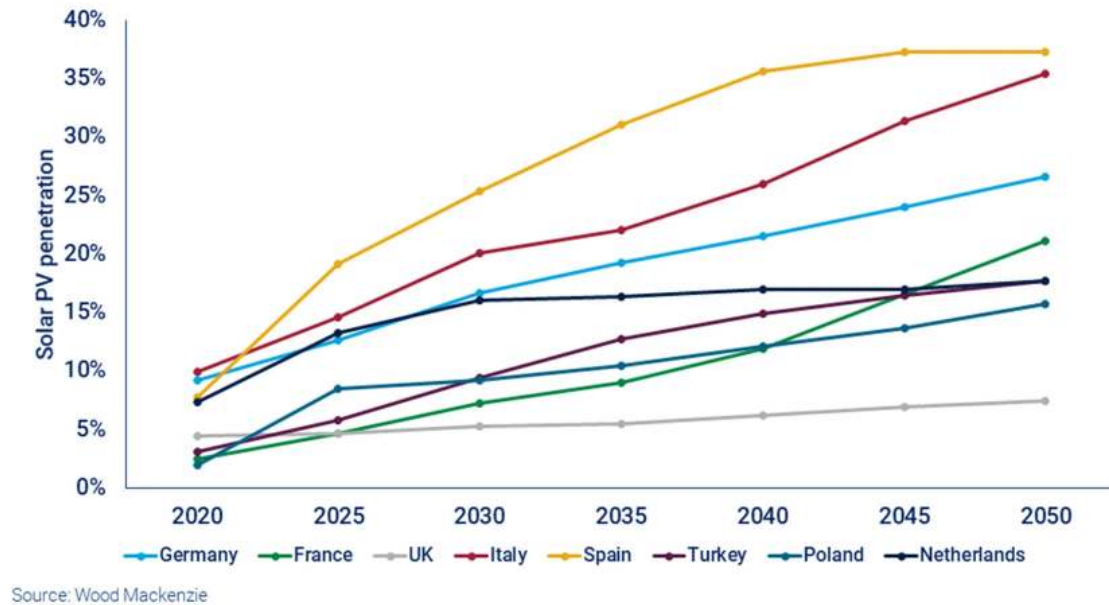
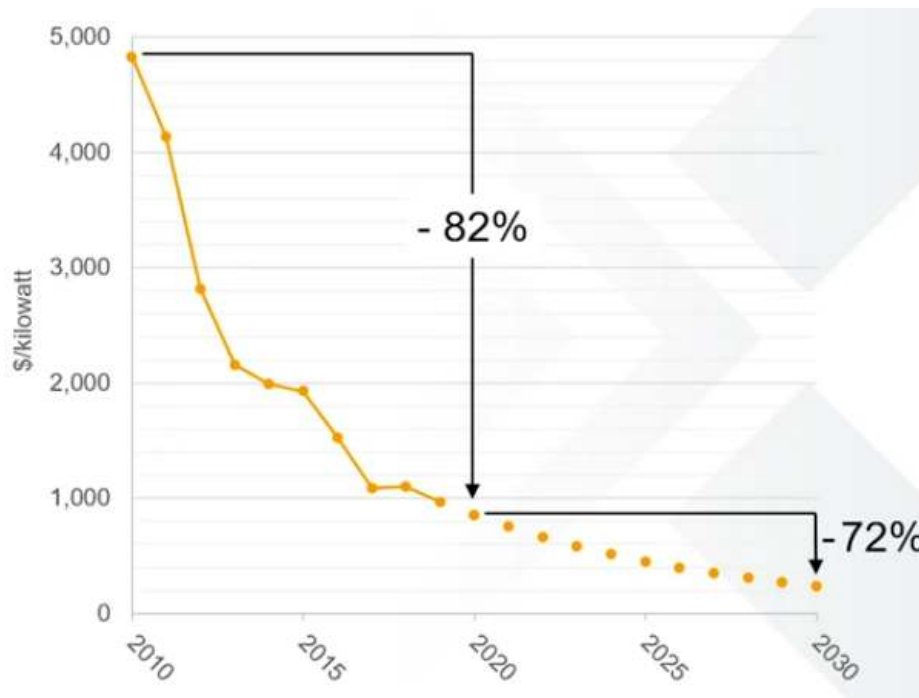
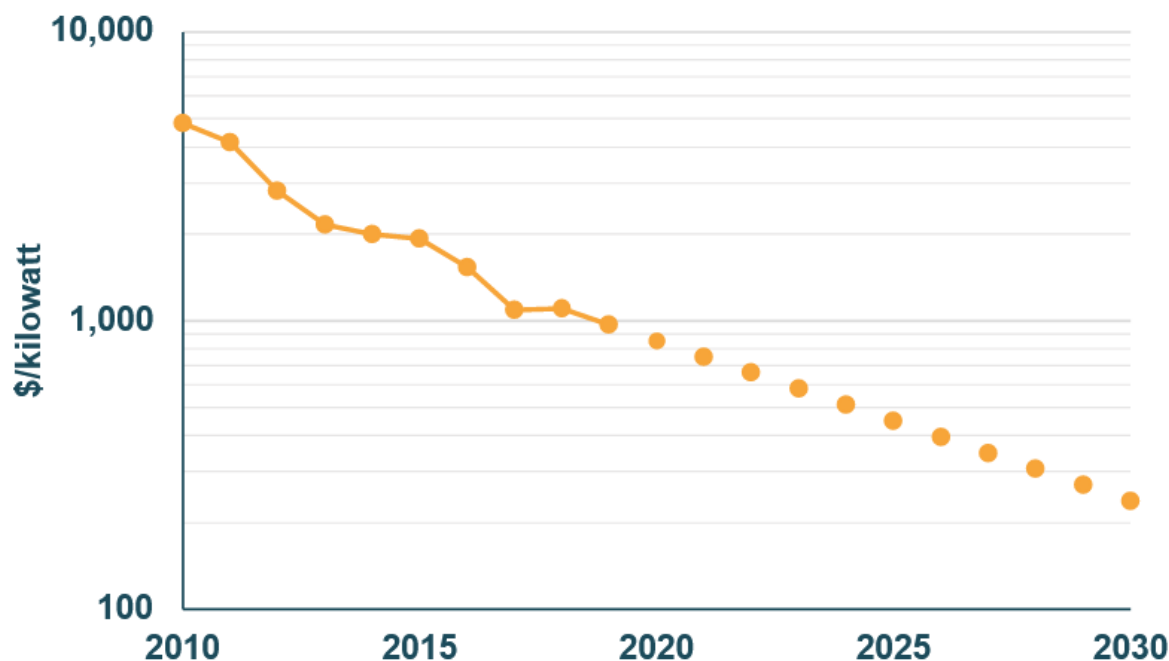


Figura 16: Gráfico sobre la penetración de generación eléctrica solar elaborado por Wood Mackenzie

Los siguientes dos gráficos muestran datos similares solo que son de EE. UU. El primero es un gráfico no logarítmico que enseña el precio de la tecnología de generación eléctrica solar FV a lo largo de tiempo, y el segundo es la misma información pero presentada de manera logarítmica:



En los últimos 10 años el coste de generación solar FV ha caído un promedio de 16% anualmente, el anterior y siguiente gráfico logarítmico se han hecho con un crecimiento anual de 12% en la próxima década. Es decir, en dos décadas se habrá abaratado por un factor de 20 esta tecnología.

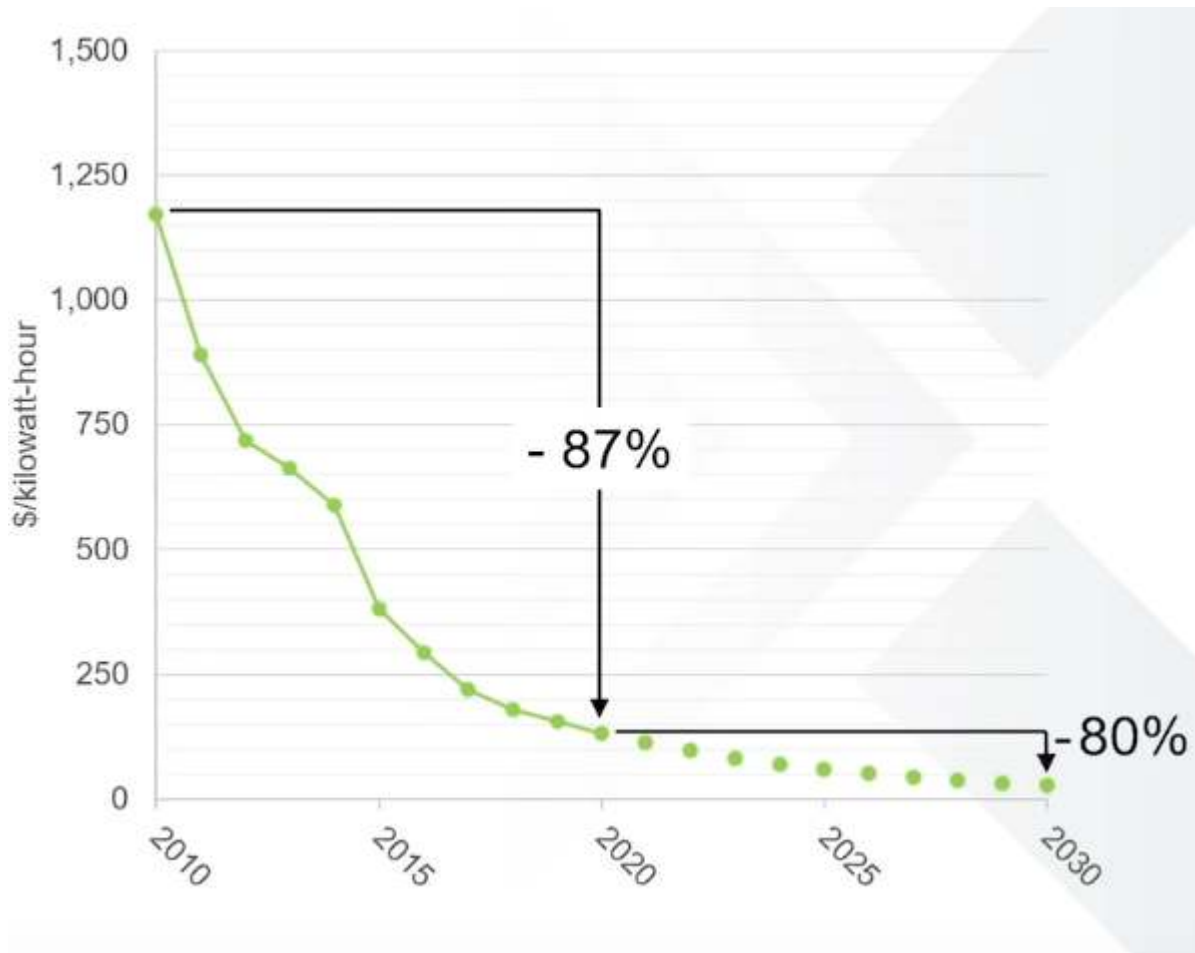


Figuras 17 y 18: Gráficas normal y logarítmica del coste de generación eléctrica solar FV respecto al tiempo (fuente: NREL, 2018³⁷)

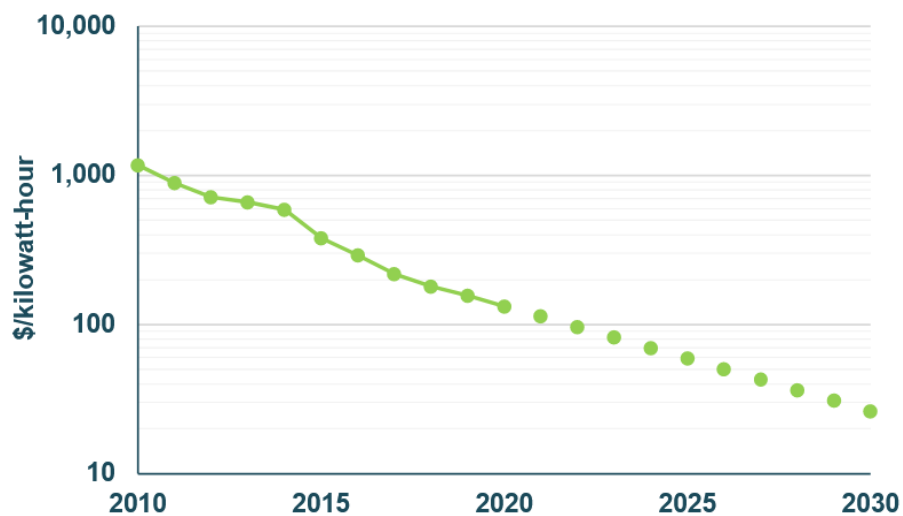
La última tecnología por visitar serían las baterías. De estas estamos menos seguros de su futuro ritmo de crecimiento ya que avanza tan rápido que es difícil estimar si en la próxima década su ritmo de crecimiento será mayor o menor. Para comprobar que este es el caso solo hace falta mirar la cantidad de laboratorios, compañías e investigadores independientes avanzando la tecnología.

Por ejemplo, Tesla, una compañía fabricante de coches eléctricos publicó a finales de 2020 los resultados de años de investigación que dieron lugar a una batería (llamada 4680) 5 veces más energética y con 6 veces la potencia de las baterías 2170 generalmente utilizadas para muchas aplicaciones, incluyendo coches eléctricos. En general es 20% más eficiente (hablaremos de esta batería en próximas secciones). Es decir, un fabricante de coches eléctricos ha producido una batería 20% mejor a cualquier otra en el mercado para baterías de coches eléctricos con tan solo 2 años de investigación. Creo que el lector puede entender que esta es una tecnología que crece a ritmo exponencial (y seguirá creciendo la próxima década).

³⁷Fu, Ran, Feldman, D. & Margolis, R. U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72399.pdf>



El anterior gráfico es el más impresionante de todos, en los últimos 10 años la tecnología de baterías se ha desplomado en un promedio de 20% anualmente, nosotros prevemos un 15% anual en la próxima década. Es decir, 45 veces más barato en solo dos décadas. El siguiente gráfico logarítmico enseña mejor nuestra previsión



Figuras 19 y 20: \$/kWh de baterías frente a tiempo

Para los últimos dos gráficos hemos utilizado las siguientes 3 fuentes:

1. US EIA. U.S. Battery Storage Market Trends. Battery Source: US EIA Battery Storage Market - <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>
2. BNEF. Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019 - <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>
3. Holland, M. Powering The EV Revolution — Battery Packs Now At \$156/kWh, 13% Lower Than 2018, Finds BNEF. CleanTechnica. - <https://cleantechnica.com/2019/12/04/powering-the-ev-revolution-battery-pack-s-now-at-156-kwh-13-lower-than-2018-finds-bnef/>

Hay más fuentes no mencionadas que podrá encontrar en la sección de fuentes consultadas.

En resumen, los costes de las tecnologías están bajando exponencialmente y no parece que pararan pronto. Como resultado su adopción en el mercado global por encima de las tecnologías tradicionales será inevitable. Pero esta conclusión no es muy científica. No podemos decir que los costes bajarán sin mencionar por qué. El siguiente apartado lo dedicamos exclusivamente a este tema.

2.2.2. La naturaleza de la disrupción, la curva en S

El análisis convencional casi siempre subestima las mejoras de costos durante la disrupción. Los costos mejoran a medida que la oferta y la demanda del mercado se expanden y la industria aprende de su experiencia, y el análisis convencional a menudo hace pronósticos lineales para el crecimiento de mercado. En realidad, la disrupción siempre sigue una curva en S, la primera fase de la cual es exponencial.

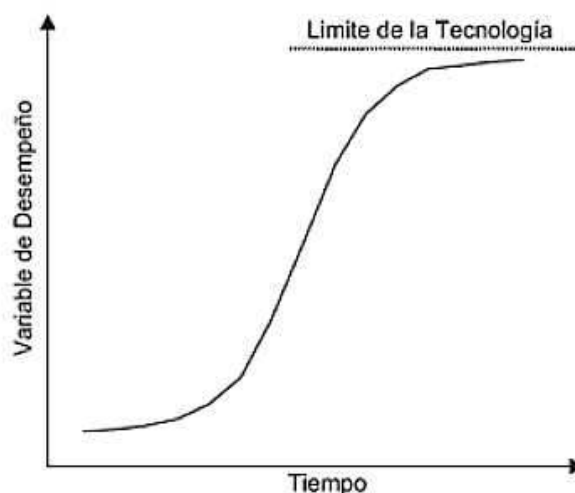


Figura 21: Representación de curva en s

Y esto es lo que estamos viendo ahora, el mercado global para cada una de estas tres tecnologías muestra una curva exponencial maravillosamente consistente. Entonces, ¿por qué las interrupciones siguen una curva en S?

La respuesta es que se debe a que están impulsados por ciclos de retroalimentación causal. Para cualquier nueva tecnología, la caída de los costos aumenta la demanda, lo que atrae más inversiones en la producción, lo que a su vez expande la oferta, y la expansión de la oferta reduce aún más los costos. Al mismo tiempo, la creciente demanda también desencadena una mayor inversión en infraestructura y apoyo gubernamental, lo que también aumenta la oferta. A medida que se amplía la oferta, la tecnología en sí mejora. El público lo acepta más y surgen efectos de red en torno a las principales marcas y plataformas, todo lo cual impulsa el crecimiento de la demanda aún más.

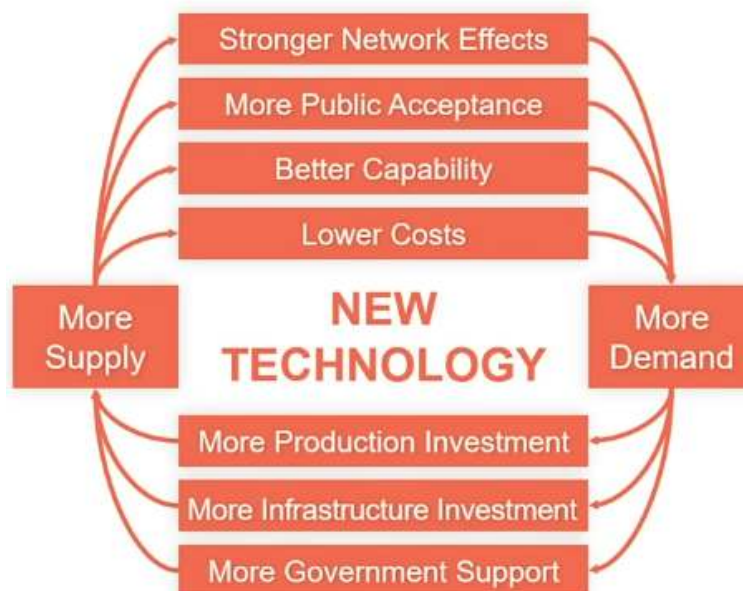


Figura 22: Representación de la retroalimentación causal de nuevas tecnologías elaborado por FinMasters

Entonces, todo el proceso se caracteriza por una aceleración en la que cada ciclo de retroalimentación amplifica a los demás en un ciclo virtuoso y, al mismo tiempo, la creciente demanda de lo nuevo reduce la demanda de lo antiguo.

Los ingresos de la vieja tecnología disminuyen, lo que provoca una reducción de la oferta. Una oferta menor significa pérdida de economías de escala y, por lo tanto, aumentan los costos. A costos más altos, que se traducen en precios más altos, la demanda cae. Menos demanda también significa menos ganancias, menos inversión en producción e infraestructura, menos apoyo del gobierno, todo lo cual hace que la

oferta se contraiga aún más. Y eso, a su vez, reduce la aceptación pública y debilita los efectos de red. Entonces, para los afectados, el proceso también es acelerado en el sentido que cada factor cataliza a los demás, pero en este caso, es un círculo vicioso de declive, y una menor demanda de lo antiguo impulsa aún más la demanda de lo nuevo.

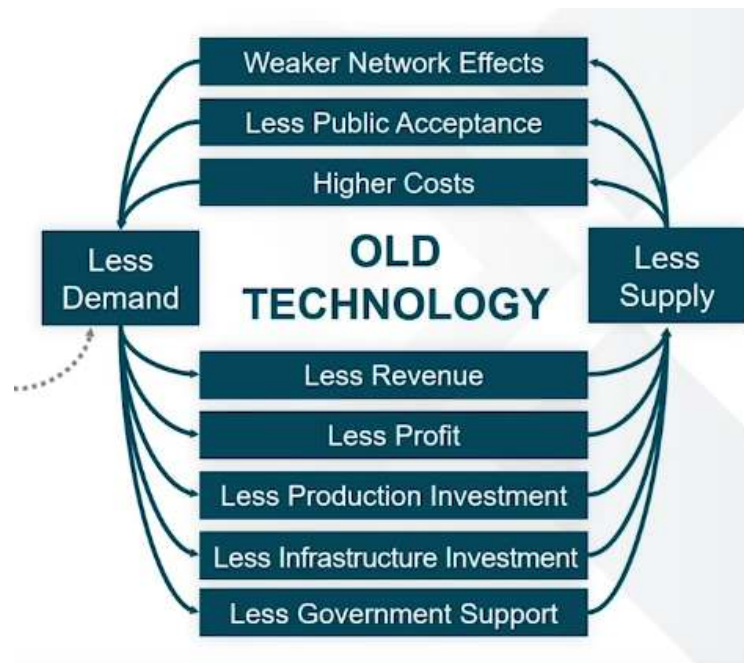


Figura 23: Representación de la retroalimentación causal de viejas tecnologías elaborado por FinMasters

Por lo general, la relación entre la nueva tecnología y la antigua es inversa. El aumento de demanda en una cause la disminución de la demanda de la otra tecnología, que constriñe su oferta y por tanto su demanda en un proceso de características exponenciales.

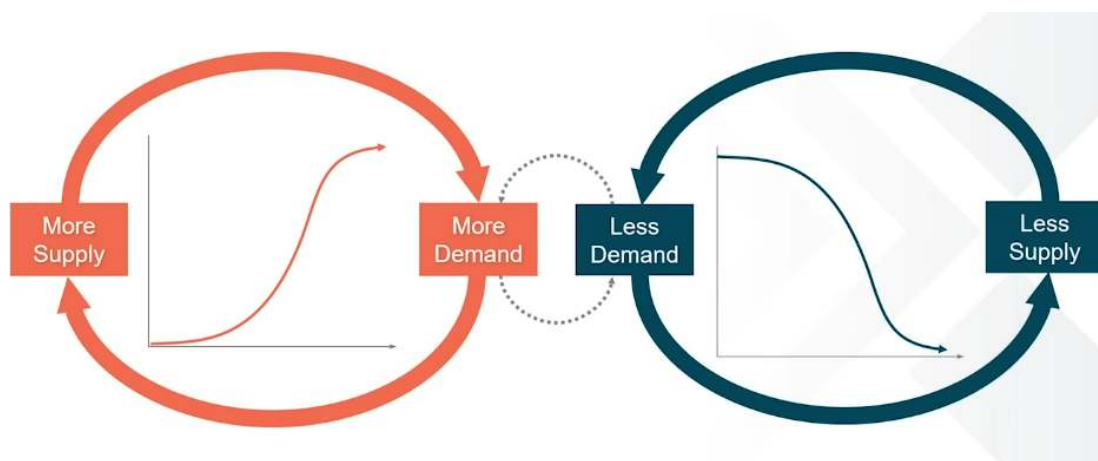


Figura 24: Relación entre nuevas y viejas tecnologías, elaborado por FinMasters

Esto en realidad no debería de sorprender a nadie con cierto conocimiento de la reciente historia. Hemos visto este patrón una y otra vez para tecnologías de todo tipo a lo largo de la historia y, en cada caso, el resultado no es una transición lenta e incremental, sino más bien una transformación rápida y total del mercado que tiene lugar durante unas dos décadas.

Unos ejemplos de lo anterior dicho son la bombilla y la vela, el tren y el ferrocarril, la televisión RGB y los antiguos televisores de tubo de rayos catódicos y más recientemente el streaming de series y películas en vez de reproducir estas en CDs o DVDs.

Ahora bien, debido a que la transición es lenta en los primeros años, casi siempre toma por sorpresa a los analistas y observadores convencionales cuando la disrupción comienza. Tenemos numerosas razones para esperar que esta disrupción de la energía por la generación eléctrica solar, eólica y de baterías siga exactamente el mismo patrón histórico. La historia de la tecnología nos muestra que la fase de crecimiento exponencial tiende a continuar hasta que la nueva tecnología comprende aproximadamente el 75% del tamaño final del mercado global. Ahora que la mayoría de las disrupciones hacen que sus mercados se expandan, esto significa que las nuevas tecnologías a menudo crecen mucho más allá del tamaño del sistema anterior.

Entonces, la razón por la que podemos estar tan seguros de que los costos de la energía solar, eólica y de baterías seguirán cayendo durante la década de 2020, es porque los mercados globales para estas tecnologías continuarán creciendo exponencialmente en la próxima década.

2.2.3. Las viejas tecnologías y la curva en X

Los pronósticos convencionales se equivocan en cuanto a modelar tecnologías disruptivas. Los principales pronósticos de la industria han hecho proyecciones lineales simples para el crecimiento de la energía solar, año tras año, durante 20 años.

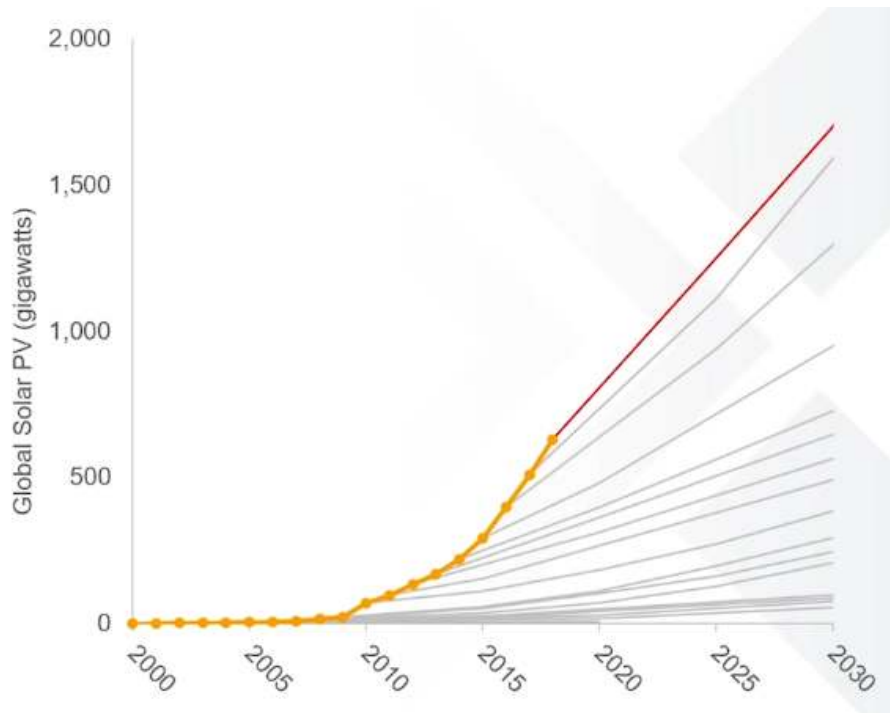


Figura 25: Pronósticos de la industria en gris, crecimiento de la potencia instalada de generación solar fotovoltaica en naranja y último pronóstico lineal en rojo.

Al mismo tiempo que la interrupción crea un nuevo sistema, también borra el sistema antiguo. Y esto no es teórico, ya empezó con el carbón en Estados Unidos. Año tras año, estos mismos pronósticos de la industria han estado tratando desesperadamente de salvar al carbón del colapso con optimismo. Pero el carbón en los Estados Unidos se ha visto afectado primero por el fracking y ahora por la energía solar y eólica.

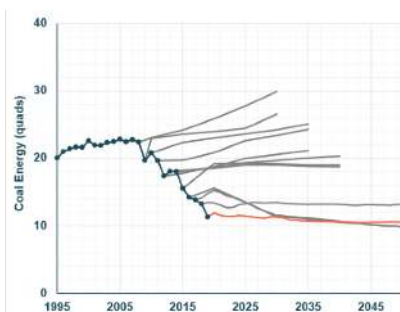


Figura 26: Pronósticos de analistas del carbón en EEUU

La figura muestra la energía producida por el carbón en EE. UU. en azul, los pronósticos de los expertos en gris y el último pronóstico lineal en rojo.

El uso de carbón alcanzó su punto máximo en los Estados Unidos en 2008 y ahora está trazando una trayectoria de disrupción hacia el colapso. Los pronósticos convencionales de la

Administración de Información de Energía de EE. UU. No comprenden la disrupción y han realizado proyecciones lineales para la recuperación o estabilización de la energía del carbón cada año durante más de una década, y la última proyección para 2020 continúa con el mismo patrón erróneo.

La energía solar y eólica por sí mismas son ahora la forma más barata de generar electricidad y estos son solo promedios globales. En lugares soleados como California, ya es más barato construir una nueva planta solar hoy que seguir operando una planta de carbón, gas o nuclear, y para el 2030 no será ningún desafío.

Entonces, nuevamente, no nos enfrentamos a una transición energética lenta, nos enfrentamos a una transformación energética rápida y total y ya ha comenzado.

En esta interrupción, como en muchas otras anteriores, el nuevo sistema crecerá siguiendo una curva en S mientras que el antiguo sistema colapsa simultáneamente. Esto forma lo que llamamos una curva X de disrupción.

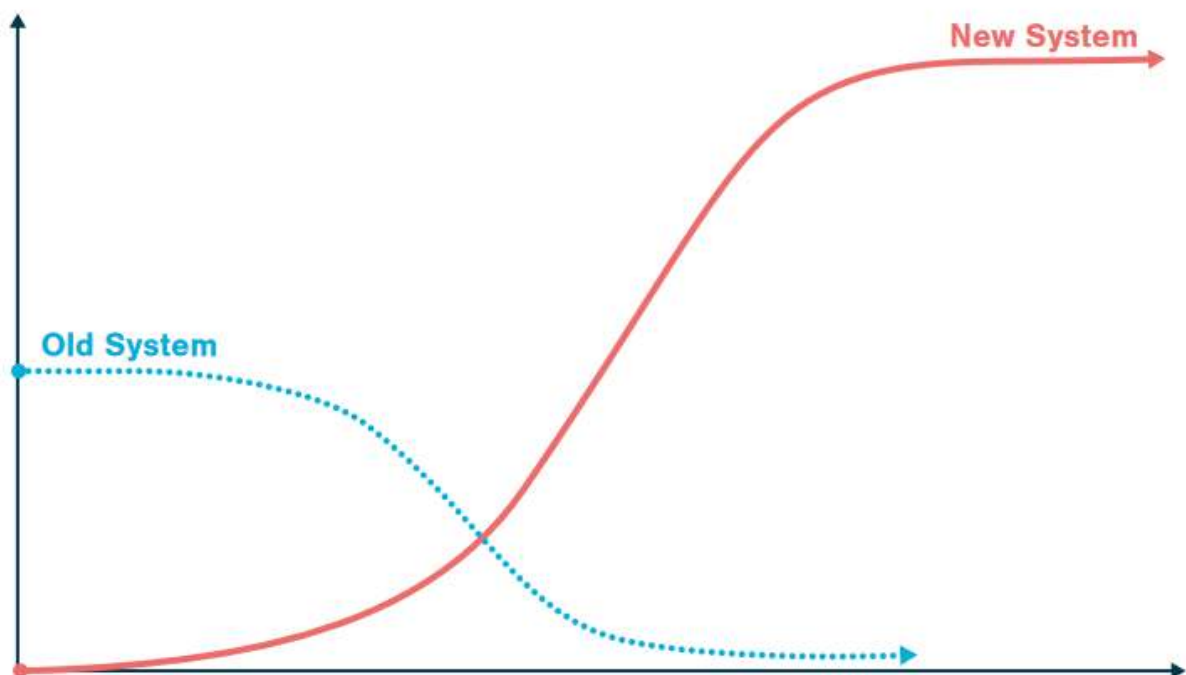


Figura 27: La curva en X de la disrupción, tanto de la nueva como de la vieja tecnología

La característica curva en X de la disrupción que resulta de la superposición de las curvas S de crecimiento y colapso es una característica constante de las disrupciones que vemos a lo largo de la historia. El mismo patrón ahora se aplica a la disrupción limpia de la energía por sistemas de generación eléctrica solar, eólica y de baterías (SEB) que se desarrollarán en el transcurso de la década de 2020.

2.2.4. La curva en U de la energía limpia

Hasta hace poco, la mayoría de los análisis convencionales simplemente asumían que satisfacer todas nuestras necesidades de electricidad con un sistema 100% SEB (de generación solar, eólica y de baterías) es simplemente imposible, al menos económicamente, si no también físicamente.

Sin embargo, debido a que el costo tanto de la energía solar fotovoltaica como de las baterías ha disminuido más del 80% desde 2010 y continuará cayendo durante la década de 2020, esta postura de línea dura se ha suavizado en los últimos años.

No obstante, la mayoría de los análisis convencionales hasta la fecha todavía se han basado en suposiciones pesimistas sobre la construcción de cantidades suficientemente grandes de capacidad de SEB para satisfacer el 100% de la demanda de electricidad durante todo el año.

En realidad, es rentable construir grandes cantidades de capacidad solar y eólica porque esa capacidad de generación compensa los requisitos de almacenamiento de energía y, al hacerlo, el sistema resultante producirá naturalmente un enorme excedente de energía limpia a un costo marginal casi nulo.

Es decir, cuando la demanda sea menor que la suma de las energías generadas y almacenadas se tendrá un excedente cuyo coste es el de la operación de las baterías (que a su vez no es un coste relativamente alto). El excedente es siempre la energía acumulada dentro de las baterías porque la energía que suministran los paneles solares será siempre igual a la energía demandada por la región.

Un aspecto clave de nuestro análisis es que la capacidad de generación y almacenamiento se puede intercambiar entre sí dentro del espacio de posibles sistemas 100% SEB de acuerdo con la función de costo convexa en forma de U que llamamos la curva en U de energía limpia.

Además, la curva en U de energía limpia no es perfectamente simétrica, sino que tiende a inclinarse hacia una mayor capacidad de generación. Las cosas se complican aún más por el hecho de que los costos de la energía solar fotovoltaica, la energía eólica terrestre y las baterías de iones de litio están disminuyendo a diferentes velocidades.

Aunque un pequeño puñado de otros investigadores también ha comenzado a reconocer el potencial de intercambiar capacidad de generación y almacenamiento para identificar opciones rentables de SWB, las implicaciones completas aún no se reconocen en gran medida entre los responsables de la formulación de políticas, los inversores y el público en general.

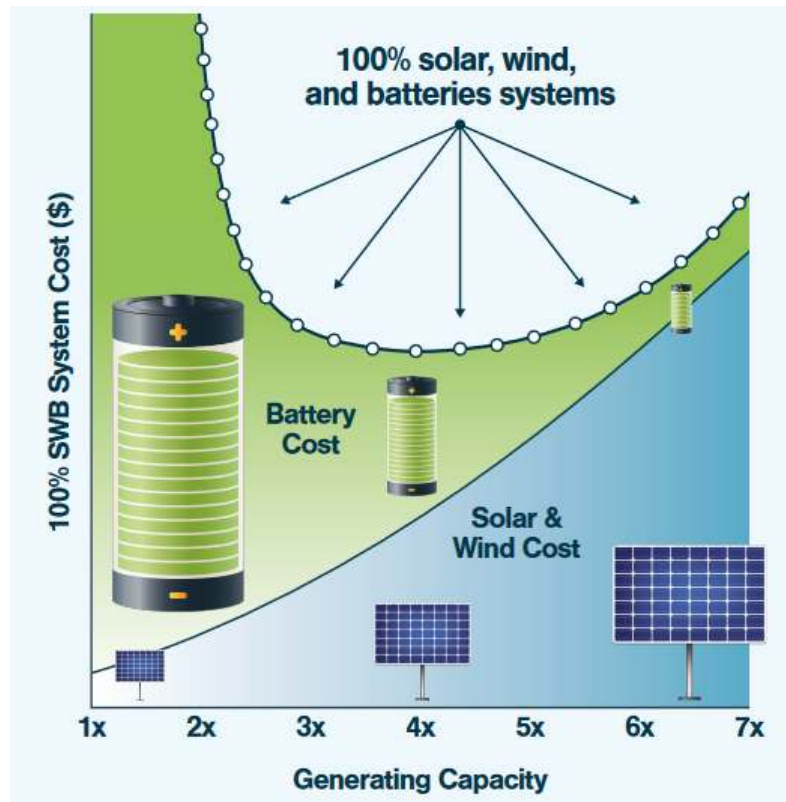


Figura 28: Gráfico que muestra la capacidad de generación frente al costo de un sistema 100% SEB

Los largos períodos de días nublados de invierno cuando la luz solar disponible es mínima representan el mayor desafío para los sistemas SWB. Por un lado, un sistema 100% SWB podría satisfacer la demanda al tener una gran cantidad de capacidad de generación de energía solar y eólica combinada con una capacidad de almacenamiento de energía de batería comparativamente modesta.

La energía solar y eólica aún podrían satisfacer la demanda durante el día, incluso con escaso sol invernal, mientras que al mismo tiempo se cargan las baterías para que se pueda seguir suministrando electricidad durante toda la noche (sistema que se puede ver reflejado a la derecha de la Figura 27).

Por otro lado, un sistema 100% SWB podría satisfacer la demanda al tener una cantidad comparativamente pequeña de energía solar fotovoltaica y capacidad de generación eólica combinada con una batería extremadamente grande y costosa capaz de almacenar semanas de demanda de electricidad promedio por hora. La batería se puede cargar por adelantado durante los períodos más soleados y ventosos, y luego se puede utilizar día tras día durante las épocas de invierno nublado. Esto también sería caro (arriba a la izquierda de la Figura 27).

Para minimizar el gasto de capital (*capital expenditures*, o capex) general del sistema, se debe identificar un equilibrio óptimo entre los dos. Muy importante, esta

relación de compensación no es lineal. Más bien, la relación de compensación del costo de capital entre la capacidad de generación y almacenamiento se caracteriza por una curva convexa (en forma de U).

En un gráfico 2D no es posible visualizar simultáneamente tanto la capacidad de generación como la capacidad de la batería en sus propios ejes, por lo que uno de los dos debe seleccionarse como eje horizontal. Un patrón de curva en U surge independientemente de cuál se seleccione, pero la capacidad de generación es la opción más sensata para la visualización porque también nos permite ver el rendimiento desproporcionado de inversiones adicionales en “superpotencia” (Figura 28).

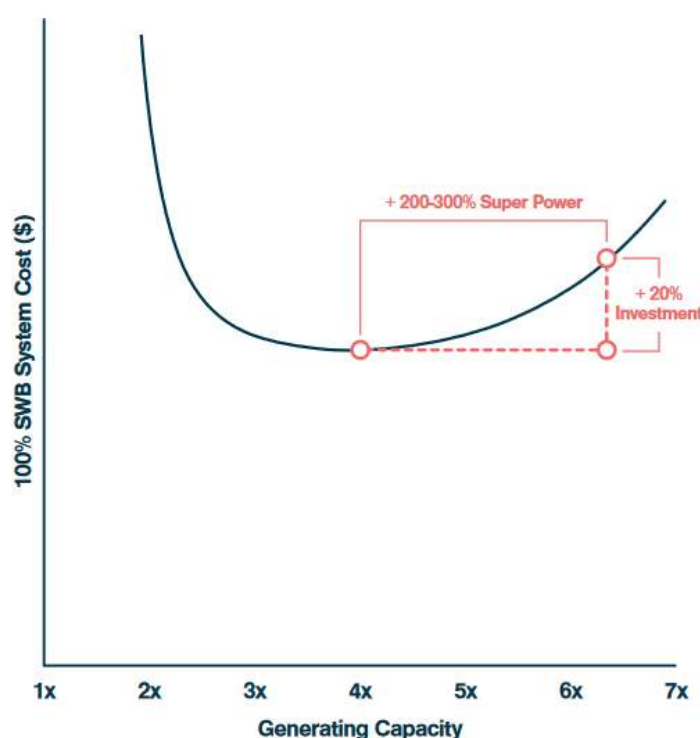


Figura 29: Ilustración del fenómeno denominado “superpotencia”

Como se puede observar en el gráfico, un incremento del 20% en inversión para mejorar la potencia instalada resulta en un incremento de 200 a 300% en capacidad de generación. Es decir, como el ritmo de cambio del gráfico es menor a medida que se aumenta la capacidad (a la derecha del punto mínimo) el resultado es que con una cantidad relativamente pequeña de inversión se obtienen mayores resultados. Esto se puede equiparar a subir una rampa muy poco empinada, en cuanto a altura te habrás elevado 5 metros, pero has recorrido 500 m.

A su vez, es importante mencionar que la forma precisa de la curva en U de energía limpia difiere sustancialmente de una región geográfica a otra debido a la variación en la disponibilidad de recursos eólicos y de luz solar.

2.2.5. Conclusión

La disrupción del sector energético por sistemas eléctricos 100% solares, eólicos y de baterías (SEB) es inevitable y ya ha comenzado porque estas tecnologías ahora son competitivas en costos con los operadores tradicionales de carbón, gas natural y energía nuclear.

Las mejoras de costos en el sistema SEB han sido consistentes y predecibles durante más de dos décadas. Además, para las baterías y las solares fotovoltaicas, estas mejoras han sido espectaculares.

La combinación de mejoras incrementales en la tecnología subyacente junto con el escalado de la fabricación crea una fuerte correlación entre el costo unitario y el volumen de producción, como es común en tecnologías de muchos tipos. Es decir, a mayor producción, menos cuesta producir un solo ítem. Efecto que recibe el nombre de economías de escala.

Por lo tanto, la energía solar fotovoltaica, la energía eólica terrestre y las baterías de iones de litio están trazando su propia curva de experiencia. El crecimiento continuo de la adopción de estas tecnologías continuará en todo el mundo desde ahora hasta al menos 2030, y seguiremos viendo que los costos mejorarán como consecuencia de lo ya dicho.

2.2.6. La electroquímica, el almacenamiento de la energía eléctrica

2.2.6.1. Batería de iones de litio

Una batería de iones de litio o una batería de iones de litio es un tipo de batería recargable en la que los iones de litio se mueven desde el electrodo negativo a través de un electrolito hasta el electrodo positivo durante la descarga y viceversa durante la carga. Las baterías de iones de litio utilizan un compuesto de litio intercalado como material en el electrodo positivo y normalmente grafito en el electrodo negativo. Las celdas se pueden fabricar para priorizar la energía o la densidad de potencia.

Akira Yoshino desarrolló un prototipo de batería de iones de litio en 1985, basado en investigaciones anteriores de John Goodenough, M. Stanley Whittingham, Rachid Yazami y Koichi Mizushima durante las décadas de 1970 y 1980, y luego la batería comercial de iones de litio fue desarrollada por un equipo de Sony y Asahi Kasei liderado por Yoshio Nishi en 1991. Las baterías de iones de litio se utilizan comúnmente para la electrónica portátil y los vehículos eléctricos y su popularidad está aumentando para aplicaciones militares y aeroespaciales.

Las áreas de investigación para las baterías de iones de litio incluyen extender la vida útil, aumentar la densidad de energía, mejorar la seguridad, reducir los costos y

aumentar la velocidad de carga, entre otras. Se han realizado investigaciones en el área de los electrolitos no inflamables como una vía hacia una mayor seguridad basada en la inflamabilidad y volatilidad de los disolventes orgánicos utilizados en el electrolito típico. Las estrategias incluyen baterías acuosas de iones de litio, electrolitos sólidos cerámicos, electrolitos poliméricos, líquidos iónicos y sistemas muy fluorados.

Todo esto se resume de varias maneras. La primera es darse cuenta de que esta batería es la más probable a ser utilizada como almacenamiento de energía eléctrica a corto plazo. Es decir, aquellas plantas que quieran hacer uso de esta tecnología se verán obligadas a utilizar baterías de iones de litio.

La segunda es observar que utilizar el almacenamiento de energía para hacer frente a la intermitencia de la energía eólica y solar, el talón de Aquiles de las energías renovables, había tenido un costo prohibitivo durante mucho tiempo. Pero el costo de la combinación de energía solar más el almacenamiento ha bajado lo suficiente en los últimos años (debido en gran parte a la caída del costo de las baterías de iones de litio) para que sea competitivo con la energía fósil.

Actualmente el mayor vendedor de estos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica es Tesla, más específicamente su división Tesla Energy.



Figura 30: Instalación de Megapacks en Hawaii

El Tesla Megapack es un producto de almacenamiento de energía estacionario de batería de iones de litio recargable a gran escala, diseñado para su uso en

estaciones de energía de almacenamiento de batería, fabricado por Tesla Energy, la subsidiaria de energía limpia de Tesla, Inc.

Lanzado en 2019, cada Megapack puede almacenar hasta 3 megavatios-hora (MWh) de electricidad. Cada Megapack es un contenedor diseñado para ser implementado por empresas de servicios públicos, los Megapacks se pueden utilizar para almacenar energía generada por fuentes de energía renovables intermitentes, como la solar y la eólica. La energía almacenada puede ser utilizada por la red según sea necesario, por ejemplo, durante los períodos de máxima demanda de electricidad.

Tesla Energy también ofrece dispositivos de almacenamiento de energía de batería más pequeños: Powerwall, diseñado para uso doméstico, y Powerpack, destinado a empresas o proyectos de servicios públicos de energía más pequeños.



Figura 31: Página de tesla.com para realizar un pedido de Megapacks

Actualmente cada Megapack se vende por poco más de 1.000.000 €, este precio no debe extrañar ya que los Megapacks están diseñados para utilizarse en el almacenamiento de energía a gran escala. Tesla ha declarado que las empresas de servicios públicos podrían utilizar Megapacks para reemplazar las plantas de energía pico (plantas de carbón y gas principalmente) que generan energía extra durante los períodos de máxima demanda. Los megapacks están diseñados para almacenar energía que luego se puede usar durante períodos de demanda excedente, en lugar de que una planta de energía pico tenga que generar la energía en tiempo real utilizando carbón o gas natural. Se ha demostrado que el almacenamiento de baterías en la red puede ayudar a reducir las emisiones de dióxido de carbono de las centrales eléctricas y los costos unitarios de producción de energía.³⁸

³⁸ Krawczyk, Piotr; Śliwińska, Anna (2020-03-16). ["Eco-Efficiency Assessment of the Application of Large-Scale Rechargeable Batteries in a Coal-Fired Power Plant"](#).

Las empresas de servicios públicos continúan utilizando Tesla Powerpacks para cumplir con los requisitos de almacenamiento de energía de la red a menor escala. Por ejemplo, un despliegue de Powerpacks de 25 MW / 52 MWh comenzó a probarse en noviembre de 2019 en el parque eólico Lake Bonney en Australia del Sur.³⁹

Las soluciones de almacenamiento de baterías a gran escala, como Megapack, se están volviendo más viables económicamente para que las implementen las empresas de servicios públicos debido a la disminución del precio de la tecnología de baterías de iones de litio. La demanda de almacenamiento de energía también está aumentando en algunas jurisdicciones debido a la transición hacia fuentes de energía renovables.⁴⁰ Debido a que las fuentes de energía solar y eólica son más intermitentes que el carbón, el gas natural o la energía nuclear, la energía eléctrica se puede almacenar para satisfacer la demanda en los períodos pico.

Otras soluciones de almacenamiento de energía, como el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo reversible, continúan dominando el mercado. En 2019, el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo reversible representaba el 96% de la capacidad mundial de almacenamiento de energía.⁴¹ Los sistemas de almacenamiento hidroeléctrico por bombeo tienen una vida útil relativamente larga en comparación con el almacenamiento en batería.

Las soluciones de almacenamiento de baterías, como Megapack, se pueden utilizar en situaciones en las que se requiere un despliegue rápido, porque los proyectos hidroeléctricos de bombeo normalmente tardan más en completarse en comparación con las baterías (años en vez de meses). Tesla ha utilizado anteriormente la implementación rápida como un punto de venta de sus productos de almacenamiento de baterías a escala de servicios públicos.⁴²

En conclusión, el almacenamiento de energía eléctrica generada por plantas eléctricas ya es viable y se lleva haciendo comercialmente desde hace años (Tesla comenzó hace 3 años, en 2019). Pero, ¿es la mejor opción a largo plazo?

Esta cuestión se evaluará en la próxima sección, donde se exploran diferentes maneras de almacenar energía eléctrica.

³⁹ Parkinson, Giles (2019-11-05). ["Lake Bonney battery charges up for first time in South Australia"](#)

⁴⁰ Stevens, Pippa (2019-12-30). ["The battery decade: How energy storage could revolutionize industries in the next 10 years"](#).

⁴¹ ["U.S. Grid Energy Storage Factsheet | Center for Sustainable Systems"](#). *css.umich.edu*. Retrieved 2020-04-16.

⁴² ["Introducing Megapack: Utility-Scale Energy Storage"](#). *www.tesla.com*. 2019-07-29.

2.2.6.2. Batería de metal líquido

Actualmente, si se utilizaran como método de almacenamiento de energía eléctrica baterías de iones de litio se estarían asumiendo riesgos que otras tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica se ahorraría.

Un ejemplo de estos problemas es el riesgo de estas baterías convencionales a quemarse. Bajo presión son fácilmente inflamables.

Como ejemplo para enseñar esta cualidad de las baterías de iones de litio se puede ver cómo, en medio de un test de sus Megapacks, uno de estos comenzó a quemarse y expandirse en los contiguos Megapacks. Por suerte, nadie salió herido, pero está claro que este tipo de riesgos se han de mitigar, ya sea por una mejora de la tecnología misma o por un reemplazo de ésta por una tecnología más adecuada a la tarea (almacenar energía eléctrica de una planta eléctrica).



Figura 32: Megapacks ardiendo en Australia (fuente: 7 NEWS)

Un posible reemplazo a las baterías de iones de litio son las llamadas baterías de metal líquido (más específicamente la desarrollada por Ambri)

Pero no todo son malas noticias, ya que en la actualidad las baterías de iones de litio son nuestra mejor opción en este momento. Han demostrado su valía en la reserva de energía de Hornsdale en Australia. Se encargó principalmente como un servicio de respuesta de frecuencia rápida.⁴³

⁴³Estudio del impacto de la reserva de Hornsdale:

<https://www.aurecongroup.com/markets/energy/hornsdale-power-reserve-impact-study>

Esto significa que puede actuar como carga cuando la frecuencia de la red es demasiado alta o como fuente de energía cuando la frecuencia de la red es demasiado baja.

Nuestras redes están diseñadas para funcionar a una frecuencia de corriente alterna (50 veces por segundo). Si la red se desvía de esa frecuencia, puede causar todo tipo de problemas que generalmente resultan en la activación de medidas de protección para proteger la infraestructura y, en última instancia, cortar la energía a sus usuarios. Un apagón.

Australia del Sur estaba luchando con estos apagones. En 2016, tornados arrasaron el sur de Australia y dañaron algunas líneas eléctricas. Esto provocó que el voltaje y la frecuencia se desviaran de su línea base que a su vez causó que los aerogeneradores dispararan sus medidas de protección y bajaran la producción. Este fue un problema enorme porque ese día el 50% de la energía de Australia Meridional provino de la energía eólica (una tecnología mal preparada para este tipo de situaciones).⁴⁴

Para hacer frente a la repentina disminución de la salida del viento, el interconector a Victoria intentó aumentar su transferencia de energía, pero se apagó rápidamente.

La red eléctrica hizo el equivalente tecnológico de un humano desmayándose al ver una gota de sangre. Una reacción en cadena de pánico que dejó a 850.000 personas sin electricidad.

En respuesta, el regulador de energía australiano está tratando de demandar a las empresas eólicas que habían aprobado por no hacer un trabajo para el cual no estaban diseñadas.

La opinión personal de los autores es que ellos mismos se lo buscaron. Australia del Sur había construido mucha más energía eólica de la que su red podía manejar de manera fiable. Carecía de interconexiones necesarias con las redes vecinas e instalaciones de almacenamiento de energía como bombas hidráulicas, baterías o simplemente plantas de reserva de energía de gas natural.

Era una red mal planificada, la inestabilidad era inevitable. Afortunadamente, estamos aprendiendo de estos errores, pero a medida que crezcan las energías renovables, el desafío de prevenir apagones como este solo aumentará. No solo necesitaremos una respuesta de frecuencia rápida, sino que también necesitaremos un cambio de carga (load shifting). Que es cuando hay suficiente espacio de

⁴⁴Explicación de lo que ocurrió en Australia:

<https://www.theguardian.com/australia-news/2016/sep/29/south-australia-blackout-explained-renewables-not-to-blame>

almacenamiento para cargar baterías cuando las energías renovables están disponibles y descargarlas cuando no lo están.

Las baterías de iones de litio son las más baratas que tenemos en este momento, pero cuando se trata de eso. No fueron diseñados para este trabajo. Están diseñadas para ser livianas y densas en energía para dispositivos electrónicos portátiles, pero para una batería estacionaria, esos son rasgos bastante inútiles.

Las baterías de iones de litio son la opción más barata disponible porque su adopción en el mercado global ha permitido que las economías de escala reduzcan su precio. Pero, ¿y si hubiera un nuevo tipo de batería, diseñada para su tarea específica?

Ambri, una empresa fundada por el profesor del MIT Sadoway, ha estado desarrollando lo que ellos llaman una batería de metal líquido, diseñada para ser una batería estacionaria capaz de manejar una respuesta de alta frecuencia y muchos, muchos ciclos.

¿Entonces, cómo funciona?

La idea comenzó de manera simple, Sadoway tenía décadas de experiencia en el refinado por electrólisis de metales como el hierro y el aluminio. Ese proceso requiere mucha energía para refinar el metal. Entonces, ¿por qué no intentar hacer que ese proceso sea reversible y permitir que la reacción inversa devuelva la electricidad?

Este es el concepto básico de las baterías de metal líquido, se funden y separan metales en una reacción perfectamente reversible. No necesitan ser livianos y además pueden ser baratos y duraderos.

Y después de un largo período de investigación, Ambri (la compañía de Sadoway) aterrizó en una química celular de calcio y antimonio.

Estos materiales se colocan juntos en una celda aislada de cerámica. Cuando se aplica una corriente, los materiales comienzan a calentarse. Eventualmente, los materiales se volverán líquidos y se separarán naturalmente como resultado de sus diferencias de densidad. El electrodo positivo más pesado se hunde hasta el fondo con un electrolito de densidad neutra (piense en ello como una barrera) que lo separa del electrodo negativo de menor densidad en la parte superior. Esto hace que la construcción de la celda sea muy simple, a diferencia de las baterías de iones de litio.

Este es el estado cargado, ahora cuando se aplica una carga se experimenta la corriente eléctrica opuesta. Esto hace que el electrodo de calcio se rompa en un catión de calcio y 2 electrones.

El catión viaja a través del puente electrolítico y se combina con el antimonio y los electrones que ya han viajado por el circuito externo para formar una nueva aleación. Esto continúa sucediendo hasta que el electrodo de calcio se consume por completo. Ahora solo tenemos la nueva aleación mixta y el electrolito. Este es el estado descargado.

Para volver al estado de carga simplemente aplicamos la corriente opuesta y se produce la reacción inversa que crea una batería nueva (podrían ser cargadas con energía eólica o solar).

Esto trae otra ventaja. Las baterías de iones de litio se degradan con el tiempo. A medida que se cargan y descargan, ocurren reacciones químicas que dañan los electrodos y reducen su capacidad para mantener la carga, y muchas de las formas en que necesitamos una batería de cambio de carga para operar son las formas exactas que aceleran esta degradación con el tiempo. De hecho, llevar una batería de iones de litio de carga completa a cero es particularmente dañino

La batería de metal líquido no tiene ningún problema con las aplicaciones a largo plazo. Podría descargarse por completo a diario durante más de 20 años sin una caída apreciable de la calidad.

Sin embargo, mantener los electrodos de calcio y antimonio tan calientes que se derritan tiene sus desventajas. Por un lado, se perderá energía al calentar los materiales hasta la temperatura operativa. Según Ambri, la eficiencia de esta batería ronda el 80%. Es decir, pierde el 20% de la energía suministrada a diferentes procesos.

Tampoco hay problema de incendios, ya que toda la celda está diseñada para operar a temperaturas superiores a 500 °C.

Con todo lo dicho, parece que las baterías de iones de litio también podrían verse afectadas esta década por otra disrupción tecnológica. Ya sea por esta tecnología de Ambri, o por muchas otras prometedoras. Tendremos que esperar y ver.

2.3. La revolución del autoconsumo

Durante las últimas dos o tres décadas, el sector energético en todo el mundo ha sido testigo de una transformación dramática en términos de sus combustibles de entrada, aumentos drásticos en la eficiencia y la introducción de energías renovables en el mix de recursos. Sin embargo, una cosa no ha cambiado mucho: las centrales

eléctricas centralizadas siguen proporcionando la mayor parte de la electricidad en la mayoría de los países industrializados. Al mismo tiempo, esta centralización ha provocado muchas insuficiencias en la red eléctrica: se pierde una gran cantidad de energía durante la transmisión, la confiabilidad no siempre está garantizada y los combustibles tradicionales como el carbón, la energía nuclear y el gas han caído en descrédito por sus efectos negativos en el clima.

En esencia, la generación de electricidad centralizada convencional carece de variabilidad para adaptarse a los desafíos planteados por los cambios recientes en nuestros modos de consumo de energía. En un informe de 2015, la Agencia Internacional de Energía (AIE) subraya este punto de vista: “para dar cabida a una alta proporción de energías renovables variables, el sistema eléctrico deberá estar equipado con la flexibilidad necesaria para mantener la fiabilidad del suministro eléctrico”. Existe un enfoque alternativo para la generación de electricidad que está equipado para satisfacer las demandas y desarrollos futuros, pero subdesarrollado en las economías desarrolladas: energía distribuida (o energía descentralizada). Esta sección propone cinco razones por las que esta tecnología no sólo es relevante para desarrollar nueva infraestructura en economías emergentes, sino también para modernizar y expandir nuestros propios sistemas energéticos.

2.3.1. Los servicios públicos centralizados están desactualizados, la energía distribuida es el futuro

La idea de producir electricidad en centrales eléctricas a gran escala surgió en el siglo XX. Originalmente, la electricidad era producida por pequeñas plantas combinadas de calor y energía (*Combined Heat and Power*, CHP) en áreas urbanas. A medida que aumentó la demanda de electricidad, resultó más barato producir electricidad de manera centralizada en áreas remotas mientras se invirtió en redes de transmisión y distribución ('red'), para entregar electricidad a hogares y consumidores, a pesar de las altas pérdidas de energía debido a la transformación y transmisión, sin ni siquiera mencionar el uso ineficiente de electricidad por parte del consumidor que conduce a la pérdida de calor.

No obstante, la producción centralizada de electricidad siguió siendo un sistema rentable durante décadas, hasta finales del siglo XX. El mantenimiento y la construcción de la red se volvieron costosos y la mayoría de los cortes de energía se originaron en la red. La transmisión y la distribución constituyen hoy en día un factor de coste importante en la fórmula para el suministro de electricidad. Además de eso, los combustibles fósiles son un recurso escaso. El modelo tradicional de generación eléctrica centralizada se vuelve cada vez más difícil de justificar. En contraste, se encuentra el concepto de energía distribuida que se presenta en varias formas: plantas de cogeneración a escala de ciudad o microgeneradores y generadores fuera de la red para hogares individuales, que producen electricidad donde se

consume. Si bien las redes grandes producen fallas e ineficiencias, la energía descentralizada y las redes más pequeñas parecen ser una alternativa más confiable y barata.

2.3.2. La producción de electricidad descentralizada es más eficiente

Los servicios de generación de electricidad de hoy son ineficientes en su mayor parte. Si bien la industria del carbón promete tasas de eficiencia cada vez más altas, las empresas de servicios de carbón actuales promedian entre el 38 y el 45 %. Las plantas más recientes y eficientes no se están implementando con la suficiente rapidez para reemplazar las viejas e ineficientes. Además, considere la enorme pérdida de energía: del 62 al 55 % de la energía simplemente se ventila en forma de calor.

La electricidad generada a partir de servicios públicos descentralizados más pequeños es mucho más eficiente, especialmente cuando se reutiliza el calor residual. Las instalaciones de cogeneración, que producen deliberadamente tanto electricidad como calor, ya se utilizan en algunos casos y pueden recuperar aproximadamente el 80 % de la energía de entrada utilizando el calor que resulta de la producción de electricidad. Este ha sido un proceso conocido durante siglos, pero necesita más mejoras tecnológicas y apoyo político para volver a convertirse en un medio popular de producción de electricidad.

2.3.3. La generación distribuida es flexible y proporciona resiliencia

Tradicionalmente, la generación de electricidad centralizada siempre ha estado conectada a toda una industria de extracción de combustibles fósiles y fabricación de servicios públicos, lo que resulta en sectores altamente interdependientes, que hacen del sector energético un conglomerado inflexible de intereses corporativos y sindicalistas. Especialmente los proyectos de infraestructura más grandes, como una nueva planta de energía nuclear o de carbón, pueden requerir hasta 3500 trabajadores en el pico del período de construcción (entre 400 y 700 durante todo el año) y representan una parte importante de la economía local. Esto explica en parte por qué no solo las empresas de servicios públicos, sino también los trabajadores que emplean y los que se benefician indirectamente de esta actividad económica, presionan activamente a sus gobiernos para que apoyen la industria de los combustibles fósiles y la instalación de servicios públicos centralizados masivos.

Sin embargo, la confianza en la generación eléctrica central se basa en premisas engañosas: a largo plazo, el carbón o el petróleo no pueden desempeñar un papel importante en la generación eléctrica debido a su escasez y altos costos ambientales. Salvar puestos de trabajo en una industria antigua e invertir en la tecnología de ayer desinvierte las inversiones en tecnologías futuras y soluciones

mucho más flexibles para la producción de energía. Mientras que las centrales eléctricas masivas tienen que permanecer conectadas a la red durante la mayor parte de su vida útil, los generadores de energía distribuida se pueden utilizar de manera más flexible y proporcionar electricidad cuando y donde se necesite; si las circunstancias cambian, las empresas de servicios públicos descentralizados ofrecen mucha mayor flexibilidad para adaptarse. Esto tiene grandes beneficios para la resiliencia general de la red: un estudio encontró que los sistemas de generación distribuida son capaces de “proporcionar energía a instalaciones críticas durante tiempos de interrupciones y cortes de energía a gran escala”.

2.3.4. Una arquitectura de red descentralizada para un sistema eléctrico respetuoso con el medio ambiente

Para combatir el cambio climático de manera efectiva, la AIE promueve el uso de energías renovables para la producción de electricidad como una solución importante. Además de ser igualmente confiables, las energías renovables tienen dos ventajas en comparación con los combustibles fósiles tradicionales: son flexibles y de uso variable. A medida que las plantas nucleares y las centrales eléctricas de combustibles fósiles comiencen a eliminarse, dejarán espacio para recursos sostenibles como la energía solar, la energía eólica y los biocombustibles (y el gas como recurso de transición).

Aunque tanto la energía eólica como la solar se utilizan para la generación de energía centralizada (por ejemplo, parques eólicos marinos o solares), tienen un gran potencial para emplearse como fuente distribuida en cualquier país. Una arquitectura de red inteligente de estructuras de red de tamaño micro, mini y mediano combinadas e interconectadas permite la coexistencia de muchas empresas de generación de electricidad diferentes.

De cara al futuro, a medida que las viejas plantas de energía se vuelvan obsoletas, este sistema permitiría que la generación de electricidad volviera a caer en manos de los consumidores, que también se convertirían en productores (o prosumidores).

2.3.5. ¡La energía distribuida vale la pena!

En resumen, la energía distribuida es más eficiente que la generación centralizada y proporciona la arquitectura adecuada para el cambio a suministros de energía renovable en el futuro. Además, considere el valor económico de tiempos de entrega más cortos, transportabilidad y baja o nula volatilidad del precio del combustible junto con los beneficios de menores costos y pérdidas de la red, mejor gestión de fallas y soporte reactivo. Desde el punto de vista económico, no hay razón para no invertir en medios descentralizados de generación de electricidad.

El mensaje es claro. La producción de electricidad centralizada es tecnología del pasado. La formulación de políticas en el sector de la energía debe tener esto en

cuenta y tomar una decisión informada para un futuro de la electricidad más eficiente, más confiable, más limpio y económicamente eficiente. Los consumidores y el medio ambiente lo agradecerán.

2.4. Conclusión

La conclusión de este trabajo de investigación es clara para cualquier lector que haya aguantado hasta esta sección, la red eléctrica (tanto la europea como la española) está sufriendo una disrupción por tres diferentes tecnologías disruptivas que se armonizan entre ellas para formar un sistema eléctrico barato, fiable y limpio.

Estas tres tecnologías son: los paneles solares fotovoltaicos, los aerogeneradores operados en tierra firme y las baterías (ya sean de iones de litio o cualquier otro tipo).

Esta disrupción, como muchas otras a lo largo de la historia, experimentará una primera fase de carácter exponencial (estamos más o menos en la primera mitad de esta fase, acercándonos más a la mitad que al principio) y una segunda fase que se desacelera y finalmente se estanca, haciendo mejoras mínimas a las tecnologías ya mencionadas.

Además, la disrupción del antiguo sistema dará lugar a un nuevo sistema de mayor magnitud, es decir el sector eléctrico que quedará después de haber finalizado la disrupción será considerablemente mayor al actual.

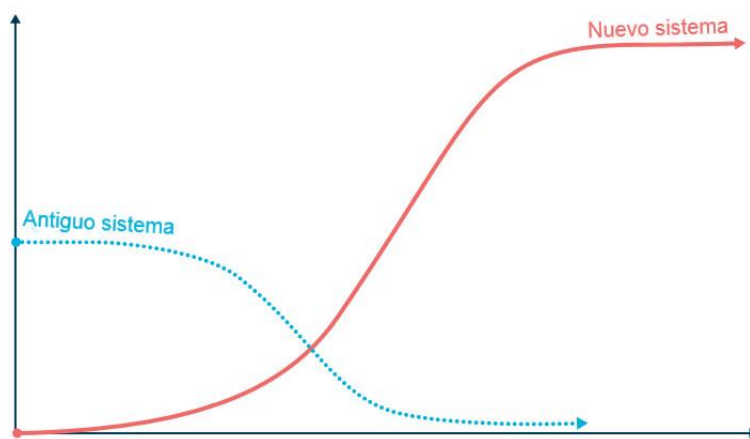


Figura 33: Curva en X de la disrupción, en el eje x se le asigna el tiempo y al eje y el porcentaje de presencia en el mercado al que pertenece la tecnología

Este comportamiento puede ser visualizado como una curva que traza una S (la tecnología disruptiva) y otra que traza una Z (la tecnología que es reemplazada) denominada en general como curva en X

Con seguridad no se puede saber nada en esta vida pero sí que se pueden averiguar tendencias y extrapolarlas, sabiendo claro está cuáles son las asunciones iniciales y cuánto peso tienen en el resultado final, además de tener en cuenta cómo de correctas pueden ser estas asunciones. Como por ejemplo asumir que las baterías seguirán cayendo de precio a un ritmo anual 5% menor del observado en la última década, asunción cuyo razonamiento ya ha sido expuesto en la sección de “Disrupción”

Para finalizar, no duele mencionar que el grueso del argumento en este trabajo de investigación se encuentra en la sección titulada “Disrupción”, que aunque solo comprime un 20% de lo presentado en este trabajo, se encarga de explorar la mayoría de conceptos que dan lugar a nuestra tesis.

3. Descubrimiento de la Energía Nuclear

Antes de empezar a explicar nuestra parte práctica, nos gustaría dar un poco de contexto histórico, nos gustaría explicar quién y cómo se descubrió la energía nuclear.

Todo se remonta a la época de los alquimistas, los alquimistas siempre trataban de convertir una cosa en otra, a lo que conocemos como transmutación, en concreto buscaban la transformación de plomo en oro, ahora todos sabemos que esto es imposible, pero gracias a ellos, en el siglo XVIII, perfeccionaron muchos aparatos y técnicas de laboratorio que más adelante serían muy útiles para el descubrimiento de la energía nuclear. Un gran acontecimiento histórico fue el descubrimiento del

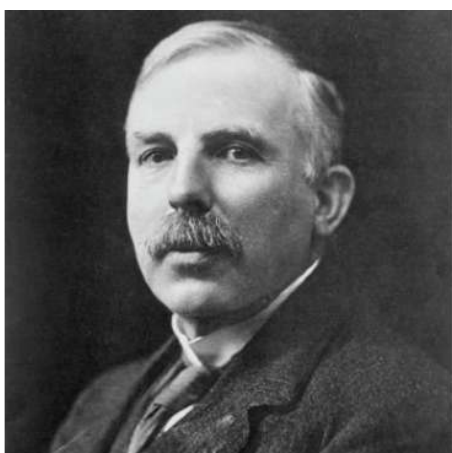


Figura 34: Ernest Rutherford

núcleo de los átomos que fue descubierto en 1911 por Ernest Rutherford, Rutherford afirmaba que la materia era casi toda vacío, concentraban toda su energía en el centro al que llamó núcleo y además dijo que ese núcleo debe tener una carga positiva neutralizada por los electrones que se movían por alrededor. En 1919 Rutherford fue el primero en lograr convertir nitrógeno en oxígeno mediante el bombardeo con partículas alfa. A comienzos de los años 30 del siglo XX las investigaciones sobre radiactividad y el núcleo de los átomos generaban mucha incertidumbre y curiosidad entre físicos y químicos. En estos

años, Enrico Fermi utilizó los neutrones como proyectil idóneo para bombardear núcleos atómicos, él trataba de que el núcleo pudiera absorber el neutrón, dando lugar a un elemento más pesado y volviéndose radiactivo en muchas ocasiones, él pensaba obtener átomos más grandes que el uranio, pero entonces llegaron Otto Hahn y Lise Meitner lo cuales se encontraban trabajando en Berlín, ellos estaban estudiando la interacción de neutrones con núcleos de uranio, y cuando produjeron la reacción nuclear, para su sorpresa, encontraron también bario, Meitner indicó que eso probaba que el núcleo se había partido en dos. Después de este acontecimiento Hahn y Meitner también descubrieron que ese proceso, podía tener lugar en cadena y este desprendía una gran cantidad de energía. Así fue como en diciembre de 1938, hace exactamente 84 años, habían descubierto la energía nuclear.



Figura 35: Otto Hahn y Lise Meitner

3.1. Reacción nuclear

Antes de empezar debemos mencionar que este apartado es un apartado extra.

Una reacción nuclear es una reacción química en la cual interaccionan los núcleos de diferentes átomos o partículas elementales. Gracias a estas reacciones nucleares, podemos obtener grandes cantidades de energía que luego podemos emplear en diferentes cosas, como por ejemplo generar electricidad. Existen dos tipos de reacciones nucleares, reacciones de fisión o reacciones de fusión.

Las reacciones más utilizadas por el hombre son las reacciones de fisión las cuales son una reacción en la cual un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, esto produce un gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neutrones, estos neutrones, pueden ocasionar más fisiones al interaccionar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones y así sucesivamente. Este efecto se conoce con el nombre de reacción en cadena. En una pequeña fracción de segundo, el número de núcleos que se han fisionado libera una energía un millón de veces mayor que la obtenida al quemar un bloque de carbón o explotar un bloque de dinamita de la misma masa. Debido a la rapidez que tiene lugar una reacción nuclear, la energía se desprende mucho más rápidamente que en una reacción química, lo cual la hace peligrosa e inestable, por ello debe estar muy bien controlada, por ello los procesos de una reacción nuclear de fisión se llevan a cabo en las centrales nucleares las cuales son instalaciones industriales compuestas por cuatro partes principales, primero encontramos el reactor nuclear el cual es un dispositivo donde se produce la reacción nuclear en cadena controlada, en segundo lugar encontramos el generador de vapor en el cual la energía química pasa a ser energía térmica, después encontramos la turbina de vapor que mueve un generador, de esta manera producimos electricidad y por último tenemos el condensador que trata de enfriar el vapor producido una vez pasa por las turbinas, de esa manera podemos realizar un proceso de reciclaje, al enfriar el gas, lo volvemos líquido, de esta manera podemos volver a utilizar esto para volver a producir gas y por tanto electricidad.



Figura Extra 1: Central Nuclear



Figura Extra 2: Gráfico GWh de la centrales nucleares españolas e industrias de carbón

Actualmente en España existe un total de siete centrales nucleares las cuales constituyen el parque nuclear español, estas son: Almaraz I (Cáceres), Almaraz II (Cáceres), Ascó I (Tarragona), Ascó II (Tarragona), Cofrentes (Valencia), Vandellós II (Tarragona) y Trillo (Guadalajara). El parque nuclear español produce una potencia bruta conjunta de 7.398,7 MWe (7.117 MWe netos), esto ocupa el 6,5% de la potencia eléctrica del país.

En cuanto a las reacciones de fusión, son las más comunes, ya que son las reacciones producidas por las estrellas, son reacciones en las que dos núcleos muy ligeros se unen para formar un núcleo estable más pesado, con una masa ligeramente inferior a la suma de las masas de los núcleos iniciales. Este defecto de masa da lugar a un gran desprendimiento de energía. Para que tenga lugar la fusión, los núcleos cargados positivamente deben aproximarse venciendo las fuerzas electrostáticas de repulsión.

Una de las reacciones más típicas de fusión nuclear consiste en la combinación de dos isótopos del hidrógeno, deuterio y tritio, para formar un átomo de helio más un neutrón.

Por ello, nosotros hemos querido reproducir esta reacción fusionando átomos de aire, ya que realizar este tipo de reacciones puede resultar altamente peligroso, esto lo haremos mediante un fusor el cual es un dispositivo que utiliza un campo eléctrico para calentar iones a condiciones de fusión nuclear, en concreto intentaremos replicar el fusor Farmsworth-Hirsch-Meeks, que surgió a partir de experimentos con varios tipos de tubos de vacío, utilizados para el desarrollo de la televisión.

4. El Fusor *Aaries*

4.1. Materiales necesarios para su construcción

El fusor es un dispositivo que utiliza un campo eléctrico para calentar iones a condiciones de fusión nuclear, induce un voltaje entre dos jaulas metálicas, dentro de un vacío, por lo tanto los materiales a escoger, deben ser materiales aislantes para la cámara y en el caso de la jaula totalmente al contrario, para su estructura también son necesarios materiales aislantes y es preciso disponer de un buen y amplio armazón, de esta manera se pueden organizar los elementos que mencionaremos más adelante. Para su construcción también es necesario contar con un tipo de herramientas bastante sencillo o para hacerlo más entendible, que todo el mundo podría tener en casa, solo hay un par de herramientas utilizadas las cuales son más especiales. Las herramientas utilizadas son el destornillador, un taladro, soldador, un conjunto de llaves allen, un pie de rey para tomar medidas de forma más precisa, un metro, un cutter, distintos tipos de alicates y una lima.

4.2. Materiales básicos para la construcción del fusor

Para construir un fusor es necesaria la inclusión de estos tres elementos, una bomba de vacío, esta crea el vacío necesario dentro de la cámara, genera una diferencia de presión medida en relación a la presión atmosférica. La bomba de vacío escogida ha sido la BACOENG 4.2 CFM de Doble Etapa, hemos escogido esta bomba de vacío en concreto porque es de dos etapas, una bomba de una etapa consiste en una cámara incorporada en la bomba que separa el aceite del gas bombeado para evitar la contaminación, en cambio una bomba de



Figura 36: Bomba de vacío



Figura 37: VariAC

vacío de dos etapas, tienen una etapa de bajo vacío y una de alto vacío acopladas en un solo conjunto, lo cual la hace ideal para la construcción de nuestro fusor.

El siguiente objeto indispensable para la construcción del fusor es un VariAC. El VariAC es un autotransformador y es un tipo especializado de transformador eléctrico que consta de un devanado⁴⁵. El devanado actúa como lado primario y secundario del transformador. El tipo ordinario de transformador tiene

⁴⁵ Devanar: Enrollar un hilo, un alambre o algo semejante alrededor de un eje formando un ovillo.

dos bobinas y no está conectado eléctricamente. El VariAC escogido ha sido el VARIAC de salida variable CA 4 Amp 0-250V (TDGC2-1KVA), este VariAC nos permite aumentar su voltaje de 0 voltios a 250 voltios, lo cual lo hace perfecto para un fusor, ya que la reacción de fusión se suele producir en VariACs convencionales a los 110 voltios.

El último objeto indispensable para la construcción de un fusor es un transformador, ya que el transformador se utiliza para transferir energía eléctrica de corriente alterna, este nos permite aumentar o disminuir el voltaje manteniendo la potencia. Este transformador tiene la funcionalidad de multiplicar el voltaje suministrado por el VariAC ya que son necesarios 10 mil kilovoltios para producir la fusión. El transformador utilizado ha sido un transformador de microondas, los transformadores de microondas son ideales para la construcción de un fusor ya que con él podemos conseguir esos 10 mil kilovoltios necesarios para conseguir la reacción de fusión.



Figura 38: MOT

4.3. Materiales para la construcción de la cámara

Dentro de la cámara es donde se producirá la reacción de fusión por lo tanto es imprescindible que la cámara esté bien sellada y que los materiales de dentro como la jaula sean conductores de la electricidad. Para la construcción de la jaula hemos utilizado varillas de cobre, el cobre es un material con una alta conductividad eléctrica lo cual lo hace perfecto para construir la jaula, ya que como hemos mencionado antes, el material de la jaula debe ser muy buen conductor de la electricidad, aparte también hemos escogido este material ya que es un material muy dúctil y maleable, esto nos ha permitido moldear las varillas muy fácilmente. Para la base hemos escogido una plancha de aluminio con barniz, de esta manera conseguimos una base muy vistosa y elegante aparte de funcional, la base es tierra por lo tanto no puede conducir la electricidad, el aluminio es un buen conductor de electricidad, pero al tener una capa de barniz por encima,



Figura 39: Cámara Fusor Aaries

conseguimos que esta plancha quede aislada de cualquier tipo de interacción con la electricidad. La parte situada en el centro es donde se producirá la reacción, esta especie de Chupa-Chups se empezará a iluminar, una vez iluminado sabremos que la reacción está completada, por lo tanto este conjunto también debe conducir la electricidad. Por ello hemos utilizado un tornillo de 20 centímetros de largo y en la punta una esfera hilada de aluminio, para aguantarlo hemos puesto un prensaestopas que no es conductor de la electricidad lo cual aísla la parte baja del conjunto. El exterior de la cámara está hecho de vidrio para una mayor visibilidad, de esta manera podemos aislar la reacción dentro de la cámara y presenciar la reacción. Por último hemos utilizado una goma y una plancha de madera la cual presiona hacia abajo la cámara de esta manera conseguimos un sellado perfecto, es decir, producimos un sellado perfecto.

4.4. Materiales para la construcción del armazón

El armazón parece la parte más fácil del proyecto, pero para nada lo es. El armazón de un fusor es como una coraza⁴⁶, el armazón protege a todo el fusor, por ello un buen armazón debe ser resistente a cualquier tipo de daño, ya sea por caída o por algún tipo de arañazo, también debe ser algo vistoso, algo que llame la atención, ya que el armazón es la parte exterior del fusor, es la parte que se muestra de cara al público.

Para la construcción de la estructura básico de nuestro armazón hemos utilizado madera MDF, este tipo de madera es fabricada mediante la compresión de fibras de madera, mezcladas con resinas de esta manera se consigue un material muy rígido, resistente y fácil de manipular, aparte de todo esto este material es muy económico y fácil de conseguir. Para las tapas, delantera y trasera, hemos utilizado el mismo material que en la base de la cámara, aluminio con una capa de barniz, este material aporta elegancia y lo hace más vistoso a la hora de una exposición.



Figura 40: Parte delantera Fusor Aaries

Para la sujeción de las láminas de aluminio con barniz, utilizamos bloques de madera, uno en cada esquina. Como se puede observar en la imagen, por dentro también hay diversas estructuras hechas con madera, estas estructuras están hechas para que los elementos interiores del fusor queden mejor organizados, en este caso vemos una



Figura 41: Fusor Aaries sin tapas

⁴⁶ Coraza: Parte de una armadura rígida que se coloca en el torso.

plataforma, esta plataforma sirve para elevar el VariAC, de esta manera podemos organizar su cableado mejor.



Figura 42: Asas y esquinas Fusor Aaries

Por último, nosotros buscábamos destacar en cuanto aspecto, por ello decidimos pintar de color negro la madera, pero con una pintura especial, una pintura hecha a base de pintura, cola blanca y serrín, lo cual aporta elegancia al fusor, por último pusimos unas cantoneras⁴⁷. También pensamos en su posible transporte, por ello disponemos de 2 asas para transportarlo y por último, nuestro fusor también dispone de cuatro patas, las cuales elevan el fusor del suelo y hacen que la parte baja del fusor no se dañe, por cualquier tipo de rozamiento con el suelo.

4.5. Materiales eléctricos

Para que el fusor funcione correctamente es necesario unir y encajar todos los elementos imprescindibles mencionados anteriormente, VariAC, transformador de microondas y bomba de vacío y eso lo hemos conseguido mediante una serie de elementos que iremos mencionando en este apartado.

Los primeros dos elementos son bastante sencillos de entender, el primero de ellos es un pantalla LCD⁴⁸, esta pantalla es utilizada como multímetro⁴⁹, con ella controlamos si todo va bien o por el contrario está ocurriendo algún tipo de fallo o problema. El segundo elemento eléctrico utilizado son 3 interruptores, con estos tres interruptores podremos encender y apagar los diferentes componentes del fusor. El rojo enciende el VariAC, el naranja el transformador de microondas y por último el blanco enciende todo el sistema, nosotros le hemos llamado interruptor general. Cabe destacar que nuestros interruptores disponen de un led del color del interruptor, de esta manera es más fácil trabajar con ellos ya que podemos saber si funcionan o no con solo mirar el led, si se enciende, todo va bien, si no hay que retocar algo del cableado, del cual hablaremos más adelante, en uno de los siguientes apartados, y explicaremos con detalle.



Figura 43: Multímetro e interruptores del Fusor Aaries

⁴⁷ Cantoneras: Pieza que se pone en las esquinas para reforzar o adornar algo.

⁴⁸ Pantalla LCD: "Liquid Crystal Display", que se utiliza para ver imágenes fijas y en movimiento.

⁴⁹ Multímetro: Instrumento de comprobación utilizado para medir dos o más valores eléctricos, principalmente tensión, corriente y resistencia.

En nuestro circuito disponemos también de 3 diodos conectados en paralelo, de esta manera controlamos la tensión, debido a que es muy alta y si hubiera alguna fuga o



Figura 44: Diodos en paralelo

fallo podría ser fatal para el fusor y para nosotros mismos estos diodos permiten el paso de corriente hacia una dirección y no al contrario. También hemos utilizado unos relés los cuales disipan la potencia que llega de una fuente externa, como puede ser un enchufe, hasta la potencia deseada o necesaria para el funcionamiento de cualquier otro componente, en nuestro caso los interruptores. Nuestros relés han sido escogidos a conciencia ya que muchos relés que miramos no eran aptos para el trabajo que debían hacer por eso nuestros relés son relés de coche o automóvil, son más potentes y eficientes.

Por último y no menos importante, todo el circuito está conectado con cables de 2,5 milímetros de diámetro, excepto los cables que van directos a la cámara que son de 5 milímetros. A estos cables le hemos puesto distintas terminales como anillas y fastons⁵⁰ para que todo quedara más hermético y seguro, aunque también se han utilizado diversas regletas⁵¹.



Figura 45: Cableado del Fusor Aaries

4.6. Proceso de fabricación y problemas

Después de idear cómo podría ser el fusor nos pusimos a construirlo. Empezamos por el armazón, lo cual pensamos que era la parte más fácil, pero fue todo lo contrario, ya que tuvimos una serie de problemas bastante graves que hicieron que perdiéramos de dos a tres días de trabajo, esos tres días los dedicamos a buscar posibles soluciones. El problema sucedió porque nos cortaron mal las maderas MDF, una vez empezamos a montar el armazón vimos que las piezas, anteriormente con las medidas calculadas, no encajaban, una era más pequeña que la otra. La solución final resultó en limar las piezas más largas hasta dejarlas todas iguales, una tarea un tanto laboriosa, pero nos ahorró bastante tiempo y dinero, ya que nosotros no queríamos comprar otra plancha de madera MDF.

Después de solucionar este primer problema, ahora si, empezamos el montaje del armazón, como ya anteriormente habíamos planificado, el exterior del fusor sería rectangular, ya que de esta manera nos sería más fácil de realizar. Las planchas de madera MDF fueron unidas por tornillos y cola blanca, con los tornillos conseguimos que todo se uniera, pero con la cola blanca conseguimos que todo quedara más

⁵⁰ Faston: Terminales de tipo plano que permiten la conexión eléctrica rápida..

⁵¹ Regleta: Dispositivo que permite conectar varios dispositivos eléctricos a un mismo enchufe.

hermético y seguro, de esta manera conseguimos también evitar posibles problemas en un futuro.

Después de armar la estructura principal del armazón, pusimos los bloques de madera en las 8 esquinas de la caja, como ya hemos comentado antes, estos sirven para que las planchas de aluminio con barniz puedan ser atornilladas. Estos bloques los pegamos únicamente con cola blanca, ya que los tornillos no eran eficaces en ese tipo de madera, cabe recalcar que la madera de los bloques no es la misma que la de todo el armazón, compramos un bloque de madera de más para hacer pruebas y al ponerle un tornillo vimos que se astillaba mucho, así que finalmente decidimos ponerlos solo con cola blanca y quedó muy fuerte y resistente.



Figura 46: Armazón Fusor Aaries



Figura 47: Agujeros para las asas

Una vez puestos los bloques de madera, nos pusimos a pensar sobre su posible transporte y como ya hemos comentado antes, le acabamos poniendo unas asas de altavoz, para ello tuvimos que hacerle dos agujeros de un tamaño considerable en los laterales del armazón. Una vez hechos con un taladro y una sierra, los limamos para no tener problemas con cualquier tipo de astilla. Cuando acabamos de pulir los agujeros,

debatimos si poner o no las asas ya, al final decidimos ponerlas más adelante.

Para dejar el armazón listo para el montaje de los componentes del fusor, pusimos unos soportes de madera MDF dentro del armazón para poder elevar y organizar mejor los componentes. Pintamos el armazón de color negro con una pintura especial basada en pintura, cola blanca y serrín, ya que si esperabamos a pintarlo mas adelante tendríamos que desmontar todos los componentes y después volver a montarlos, por ello decidimos pintarlo en ese momento, para evitar futuros retrasos mas adelante. También hicimos los agujeros necesarios en las láminas de aluminio con barniz, en el caso de la delantera, para la rueda del VariAC, los interruptores y la pantalla LCD, en el caso de la trasera, hicimos un agujero grande donde pusimos una rejilla para mejor ventilación del fusor y otro agujero más para la toma de corriente.



Figura 48: Parte trasera del Fusor Aaries

Después de la construcción del armazón empezamos a construir la cámara,



Figura 49: Cámara Fusor Aaries

nosotros sabíamos que la cámara era una de las partes más importantes del fusor, ya que debía quedar muy hermética y a la vez vistosa. Para producir la reacción de fusión, la cámara debe estar perfectamente sellada, por ello pusimos un aro de goma, hicimos varios agujeros para que todo quedara bien encajada, tanto la cámara en sí como el soporte superior. Este soporte está hecho por un cuadrado de madera MDF, sujetado por 4 tornillos sin fin, al apretar las tuercas de estos

tornillos, conseguimos que el cuadrado de madera empuje hacia abajo la cámara, de esta manera conseguimos un mejor sellado.

Para realizar la jaula o malla externa, tuvimos que modelar las varillas de cobre hasta dejarlas como nosotros queríamos y después soldar unas con otras, tuvimos algún que otro problema con la jaula ya que la tuvimos que repetir varias veces, debido a que esta no tenía el suficiente número de anillos o simplemente no estaba bien soldada.

Lo último de la cámara es el paso del cable hasta la jaula, el paso de la manguera de la bomba de vacío y la sujeción del elemento central donde se producirá la reacción. Para pasar el cable, primero lo saldamos a la jaula, después hicimos un pequeño agujero en la base y para mayor seguridad, sellamos todo con silicona. Para el paso de la manguera de la bomba, nosotros teníamos pensado cortar un trozo de la manguera y pegarla con silicona pero se nos ocurrió otra idea. La idea consistía en poner una pequeña válvula⁵² que uniera el exterior con el interior de la cámara, de esta manera podremos regular el flujo de aire, controlamos que el aire solo salga de la cámara para producir el vacío y también podremos montar y desmontar con facilidad la manguera de la bomba, el único inconveniente de hacer esto es que la manguera pasará por dentro de la caja del fusor por tanto debemos aislarla perfectamente para que no tocara con ningún componente eléctrico.

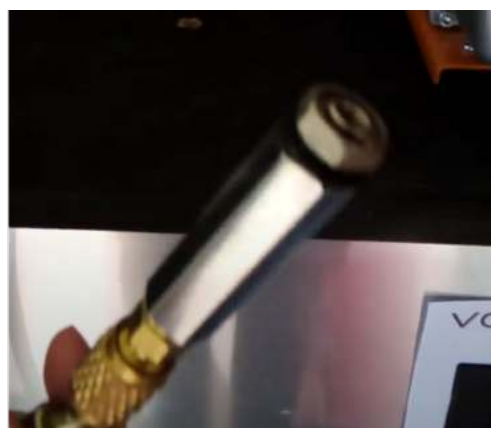


Figura 50: Válvula para vacío

Para el elemento central tratamos de unir un tornillo de cuello cuadrado con la espira de aluminio, para unir estas dos piezas utilizamos una tuerca con cabezal, esta parte fue la más laboriosa ya que no teníamos claro al principio de como unir estas dos piezas, pero finalmente encontramos esta solución, de esta manera habríamos

⁵² Válvula: Instrumento de regulación y control de fluido.

realizado el elemento central o como nos gusta llamarlo a nosotros el Chupa-Chups central, debido a su forma. Para finalizar con la cámara, unimos el Chupa-Chups central con la base, para ello utilizamos un prensaestopas para que se quedara estático y varias tuercas que las pondremos dentro y fuera de la cámara, de esta manera conseguimos una mayor sujeción de este elemento.



Figura 51: Cámara de Fusor Aaries

Al finalizar la cámara, nos pusimos a colocar los elementos esenciales en el interior de la caja del fusor, primero colocamos la bomba de vacío ya que iba atornillada a la parte superior de la caja y una de las cosas más fáciles. En segundo lugar atornillamos en el interior de la caja el transformador de microondas, también fue una de las cosas más fáciles, ya que no tuvimos que hacer ningún soporte especial, solo iba atornillado al interior de la caja. Por último el VariAC, para el VariAC fue un poco más complicado, aún teniendo un soporte y el agujero por donde sale el eje del rotor para cambiar el voltaje fue bastante complicado que el VariAC quedara estático, ya que el VariAC tiene una forma redondeada y para ello hacía falta, aparte de un soporte, atornillarlo de alguna manera, de esta manera conseguimos fijarlo. Optamos por ponerle una especie de eles o patas de aluminio que tenían unos agujeros para poder fijarlo con tornillos, fijamos estas dos piezas al suelo de la caja, al soporte del VariAC y al propio VariAC, así conseguimos fijar el VariAC y dejarlo estático.



Figura 52: Montaje del VariAC

Aparte de todo esto también pusimos la placa con números que venía con el VariAC, de esta forma también podremos controlar el voltaje de manera analógica, esto lo hicimos por si la pantalla LCD fallaba. Para darle un toque propio, le enganchamos unas pegatinas indicando el alto voltaje que se produciría en nuestro fusor, así como los nombres de todos los elementos exteriores, como la pantalla LCD o los diferentes interruptores, esto lo hicimos para darle nuestra esencia al fusor, para darle un toque de personalidad, en la siguiente página pueden observar el



Figura 53: Aarón y Elies montando el VariAC en el fusor Aaries

acabado.



Figura 54: Fusor Aaries acabado

Después de poner todo el cableado, que explicaremos en profundidad en el siguiente apartado, juntamos todos los elementos, caja, elementos esenciales y cámara y ya habíamos acabado el fusor, en la imagen de arriba pueden ver como quedó acabado.

4.7. Cableado

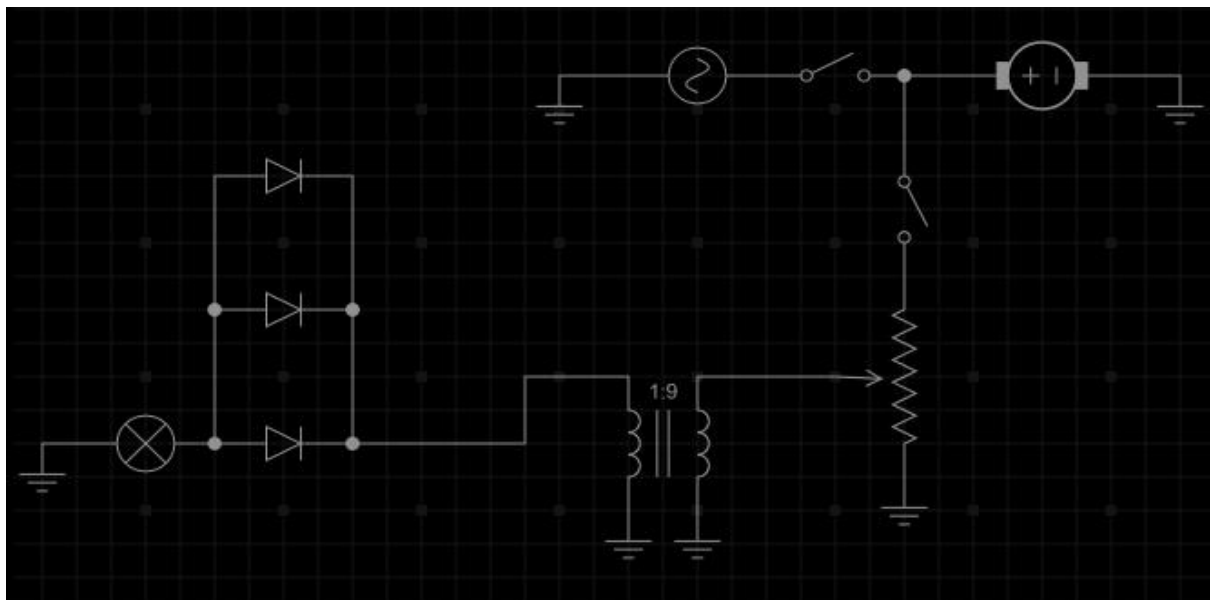


Figura 55: Esquema eléctrico del fusor Aaries

Para entender mejor estos esquemas es mejor explicar la teoría del cableado y el porqué de la conexión de todos estos elementos.

La rejilla interior tiene un potencial negativo con respecto a la rejilla exterior que está a potencial de tierra. Una corriente eléctrica puede cruzar esta diferencia de potencial ionizando las moléculas de aire restantes en la cámara formando una ruta conductora. Es este proceso se separan los electrones de sus átomos dejando un ión cargado positivamente. Una partícula cargada positivamente en un campo eléctrico se acelera hacia el terminal negativo, en nuestro caso la rejilla interior. La luz se crea cuando los electrones que han recibido energía de este proceso (excitación) pero no lo suficiente como para dejar que el átomo vuelva a caer a un orbital inferior (desexcitación) y libera su energía en forma de luz (estas transiciones se denominan saltos cuánticos).

Todos estos aspectos técnicos han sido conseguidos en parte gracias al consejo de Luca Bob, un físico británico, que se popularizó en redes sociales enseñando su proyecto con bobinas Tesla. Gracias a su presencia en redes sociales pudimos contactar con él para que nos resolviera ciertas dudas técnicas ya que Luca tenía experiencia previa construyendo un fusor de demostración iónica.

4.8. Pruebas

Para conseguir que el fusor funcionara correctamente tuvimos que realizar 3 pruebas, prueba de vacío, prueba del circuito de 12 voltios y prueba general.



Figura 56: Prueba de vacío del fusor Aaries

Para la prueba de vacío, encendimos la bomba de vacío y la dejamos 20 minutos encendida para que hiciera un vacío completo de la cámara. Una vez pasados los 20 minutos intentamos despegar la cámara de la base y era imposible, tuvimos que quitar la manguera de la bomba para que hubiera un orificio por donde entrara el aire, después de unos pocos segundos ya podíamos despegar con facilidad la cámara de la base, de esta manera conseguimos observar que el vacío que habíamos hecho era perfecto, dentro no quedaba ninguna partícula de aire.

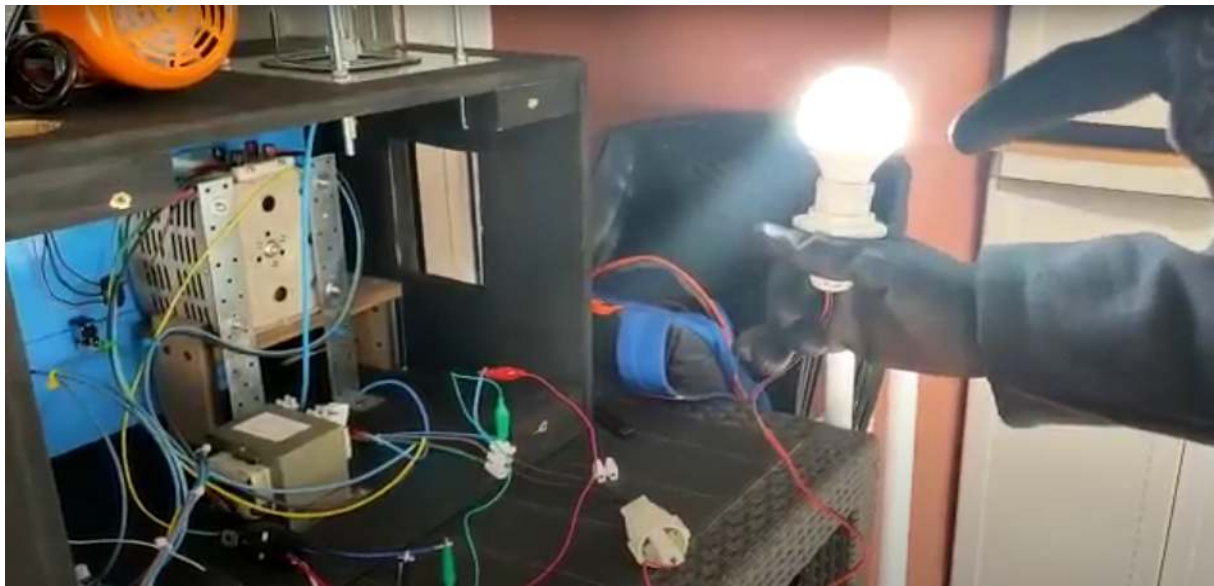


Figura 57: Prueba del circuito de 12V del fusor Aaries

En la prueba del circuito de 12 voltios pudimos comprobar que los relés y los interruptores funcionan a la perfección. Para poder realizar esta prueba conectamos un relé a un interruptor y en vez de conectarlos por ejemplo al VariAC, lo conectamos a una bombilla, si al encender el interruptor se encendía la bombilla, era un indicativo de que el circuito de 12 voltios estaba bien realizado, y así fue, esta prueba la realizamos con los 3 relés y los 3 interruptores.



Figura 58: Parte delantera del fusor Aaries

Por último realizamos la prueba general que como su propio nombre indica es la prueba de todo el fusor. Encendimos la bomba de vacío y la dejamos haciendo vacío 20 minutos, después encendimos el VariAC y empezamos a darle potencia, una vez encendimos todo y subimos el VariAC hasta 200 voltios, una vez hecho esto vimos como en la cámara se estaban creando arcos eléctricos, incluso pudimos observar una deformación en la malla externa, por lo tanto el fusor funciona correctamente.

4.9. Futuro nuclear

4.9.1. Introducción y corrección

¿Cuánta energía entra en un reactor de fusión y cuánta sale? Los científicos cuantifican esto con el factor de ganancia de energía, la relación entre lo que sale y lo que entra, generalmente denotado como Q . Si la ganancia de energía es mayor que 1, se ha generado energía neta. Mientras que el punto donde Q llega a 1 es el punto de equilibrio.

El récord de ganancia de energía se batió recientemente. Un experimento de la *National Ignition Facility* (NIF) informó que lograron obtener el 68% de la energía de entrada, por lo que $Q = 0,68$. El récord anterior era $Q = 0,67$ por el Joint European Torus (JET) en 1997.

La Instalación Nacional de Ignición (NIF) es una instalación de investigación de fusión nuclear que es operada de forma privada por Lawrence Livermore National Security LLC en nombre del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL) de propiedad pública. Se encuentra en Livermore, California, al este de San Francisco. El laboratorio emitió un comunicado de prensa el 17 de agosto de 2021, anunciando que su experimento del 8 de agosto de 2021 había alcanzado el "umbral de ignición por fusión".

La fusión con láser es un término informal para un tipo de fusión por confinamiento inercial. Mientras que la mayoría de los dispositivos de fusión experimentales del mundo inician la fusión a altas temperaturas, la fusión láser lo hace mediante una alta compresión. En el experimento de fusión láser NIF, la electricidad de la red se envía al conjunto de láseres más grande del mundo.

Cuando llega suficiente energía al combustible, se producen reacciones de fusión.



Figura 59: Hohlraum

Comenzando desde el exterior del hohlraum y entrando, la primera métrica para medir el experimento es el factor de ganancia Q mencionado anteriormente. Esta es la relación entre la energía producida por la reacción de fusión y la energía entregada a todo el objetivo hohlraum.

Esta es la que llegó a obtener el Q de 0,68. La figura anterior muestra el objetivo hohlraum del NIF.

Por otro lado, el experimento de fusión más destacado que se está construyendo actualmente es el ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, en español Reactor Termonuclear Experimental Internacional). Para operar el reactor de fusión ITER se necesitan 50 MW, y su objetivo en 2025 es realizar sus primeras corridas experimentales y eventualmente generar 500 MW de potencia, por lo que apuntan a conseguir una Q de 10.

Esto puede parecer esperanzador en un principio, pero es más engañoso de lo muchos divulgadores harán parecer. Recuerde que la fusión nuclear es el proceso por el cual el sol genera energía. El sol fuerza los núcleos atómicos a unirse mediante la fuerza gravitacional creada por su enorme masa. No es posible hacer esto en la tierra, así que se ha de encontrar otra manera.

La tecnología de fusión nuclear más utilizada actualmente es calentar el combustible en campos magnéticos intensos hasta que se convierte en plasma con la condición de que la temperatura que se debe alcanzar es de 150 millones de Kelvin.

La confusión que se encuentra en casi todos los escritos de divulgación científica sobre la fusión nuclear es que el factor de la energía que ingresa y sale del plasma se denomina Q_{plasma} , que a su vez no es la relación de la energía total del reactor, que podría llamarse Q_{total} . Si el objetivo es construir una central eléctrica, esa es la métrica con la que medimos la eficiencia de la central. Y aquí está el problema, los reactores de fusión requieren mucha energía para funcionar y la mayor parte de esa energía nunca va al plasma. Si el plasma está confinado dentro de un campo magnético en el vacío, se necesitan imanes gigantes. El mantenimiento y enfriamiento de estos imanes representan una parte significativa del consumo de energía del reactor.

El Q_{plasma} no tiene en cuenta que si se desea operar una planta eléctrica de fusión, el calor que genera el plasma aún debe convertirse en energía eléctrica. Y eso se puede hacer pero con una eficiencia limitada, siendo optimista, del 50%. Es decir, la mitad del calor generado se convertiría en electricidad. Como consecuencia, el Q_{total} es mucho más bajo que el Q_{plasma} .

Y, sin embargo, los escritores científicos y periodistas se equivocan en esto, toman la palabra de los investigadores sin investigación adicional. Y tampoco es que esto sea particularmente nuevo. La siguiente es una cita de un informe de 1988 del Comité de Evaluación de Opciones Científicas y Tecnológicas del Parlamento Europeo (STOA). Se les encomendó establecer criterios para la evaluación de la investigación

europea sobre la fusión. En 1988 ya advirtieron explícitamente de este mismo malentendido.

“El uso del término ‘punto de equilibrio’ para describir el presente programa para lograr un equilibrio energético en la reacción de plasma de hidrógeno-deuterio está abierto a malentendidos. EN NUESTRA OPINIÓN, SE DEBE UTILIZAR ‘PUNTO DE EQUILIBRIO’ COMO DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA CUANDO EXISTE UN PUNTO DE EQUILIBRIO EN EL SISTEMA EN SU TOTALIDAD. ES ESTE LOGRO EL QUE ABRIRÁ EL CAMINO PARA QUE LA ENERGÍA DE FUSIÓN SE UTILICE PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD”

6. Is Fusion Feasible?

We have sought to understand the present stage of technical progress. The use of the term 'Break-even' as defining the present programme to achieve an energy balance in the Hydrogen-Deuterium plasma reaction is open to misunderstanding. IN OUR VIEW 'BREAK-EVEN' SHOULD BE USED AS DESCRIPTIVE OF THE STAGE WHEN THERE IS AN ENERGY BREAK-EVEN IN THE SYSTEM AS A WHOLE. IT IS THIS ACHIEVEMENT WHICH WILL OPEN THE WAY FOR FUSION POWER TO BE USED FOR ELECTRICITY GENERATION. Scientific feasibility, as that term is currently used falls substantially short of 'break-even' in the sense that we have used it.

Figura 60: Pantallazo del párrafo en cuestión de la STOA

Y parece que los investigadores no hicieron caso, y para demostrar esta aseveración solo hace falta volver al principio de esta sección, donde se detallaba el logro del NIF en obtener un Q de 0,68. El problema es que este logro popularizado por varios periódicos y experto fue el Q_{plasma} , no el Q_{total} . Es decir, no se habló del rendimiento del reactor, si no de la eficiencia energética del plasma. Asumiendo un 50% de conversión de calor generado por el plasma a electricidad el Q total del experimento del NIF en realidad fue de 0,01. Es decir, por cada unidad de energía que sale del sistema del reactor, se ha debido de suministrar 100 unidades. Figura que se encuentra lejos del rendimiento de 70% que comunicaban.

En resumen, los medios de comunicación parecen no hacer un trabajo excepcional al investigar las afirmaciones de diferentes entes de investigación sobre la energía de fusión y por tanto no sorprende que estas mismas organizaciones se aprovechen publicando resultados que como mínimo son engañosos. Por eso mismo pedimos al lector que tenga cuidado al tratar este tema, tiene más truco del que parece y es más complejo de lo que necesita ser. Según las mismas palabras del comité STOA:

"In our view the correct scientific criterion must dominate the programme from the earliest stages. The danger of not doing this could be that the entire programme is dedicated to pursuing performance parameters which are simply not relevant to the eventual goal. The result of doing this could, in the very worst scenario be the enormous waste of resources on a program that is simply not scientifically feasible."

(3-12)

Figura 61: Cita del documento de 1988 de STOA

"En nuestra opinión, el criterio científico correcto debe dominar el programa desde sus primeras etapas. El peligro de no hacer esto podría ser que todo el programa esté dedicado a la búsqueda de parámetros de desempeño que simplemente no son relevantes para el objetivo final. El resultado de hacer esto podría, en el peor de los casos, ser el enorme desperdicio de recursos en un programa que simplemente no es científicamente factible. "

4.9.2. El equilibrio

Sabiendo que uno no se puede fiar de lo que se dice sin antes revisar detenidamente la información, ¿que se puede esperar realmente de esta tecnología? Es decir, ¿cuando se llegará al punto de equilibrio?

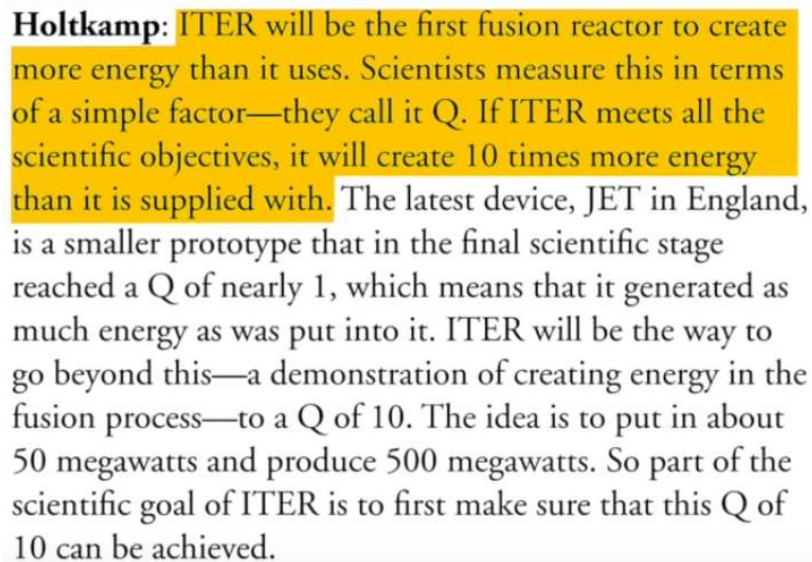
Pues analizemos el ITER, que actualmente es reconocido por la comunidad científica como el reactor experimental que tiene más posibilidades de conseguir su objetivo. Al principio hablamos de una potencia de entrada de 50 MW y un objetivo de potencia de salida de 500 MW. Aparentemente 10 veces más.

Como el lector se podía esperar esta cifra tiene truco. La potencia de entrada citada es la necesaria para generar el plasma. Ni la potencia para mantener el mismo plasma funcionando ni la potencia utilizada para operar el sistema ha sido dada en ninguno de los artículos que puede encontrar en fuentes consultadas, pero según el jefe del departamento de ingeniería eléctrica Ivone Benfatto⁵³, ITER producirá alrededor de 440 MW mientras funcione, que es una buena estimación de la potencia de entrada (que tampoco es del todo correcta, ya que 120MW se consumirá igualmente haya o no plasma en el reactor). Pero no importa, utilizando la cifra de 440 MW y el objetivo al que apunta ITER (500 MW) podríamos estimar el rendimiento real. Pero aún así no sería del todo real, ya que 500 MW es la potencia que genera el plasma que fusiona átomos dentro de la cámara. no la electricidad generada. Asumiendo una conversión del 50% (una cifra generosa y poco realista) se obtendría una potencia de salida de $500/2 = 250$ MW. por tanto el rendimiento

⁵³Hoja de especificaciones técnicas del reactor de fusión ITER:
<http://news.newenergytimes.net/iter-fusion-reactor-technical-references/>

total del proyecto ITER al que de verdad apuntan es de aproximadamente 60%. Lejos del 1000% que los medios de comunicación dicen que conseguirán.

A continuación podrá encontrar un pantallazo de una transcripción que detalla lo dicho en una entrevista por Holtkamp en 2006, que en aquel momento era el líder del proyecto ITER:



Holtkamp: ITER will be the first fusion reactor to create more energy than it uses. Scientists measure this in terms of a simple factor—they call it Q. If ITER meets all the scientific objectives, it will create 10 times more energy than it is supplied with. The latest device, JET in England, is a smaller prototype that in the final scientific stage reached a Q of nearly 1, which means that it generated as much energy as was put into it. ITER will be the way to go beyond this—a demonstration of creating energy in the fusion process—to a Q of 10. The idea is to put in about 50 megawatts and produce 500 megawatts. So part of the scientific goal of ITER is to first make sure that this Q of 10 can be achieved.

Figura 62: Cita del documento de 1988 de STOA

Cita del apartado resaltado en amarillo: “ITER será el primer reactor de fusión que creará más energía de la que consume. Los científicos miden esto a través de un simple factor, lo llaman Q. Si ITER logra todos los objetivos científicos propuestos, creará 10 veces más energía de la que se le suministra.”

Y así lo detalla la mayoría de artículos populares sobre el tema.

Como se ha mostrado, la poca fiabilidad de lo dicho por los oficiales que encabezan el proyecto considerado el más prometedor en la actualidad y el hecho de que el proyecto parece haberse vuelto en una carrera para mejorar el rendimiento del plasma en vez de centrarse en mejorar el rendimiento del sistema y en mejorar el reactor de manera iterativa para llegar a un reactor funcional (como ya advirtió STOA hace más de tres décadas) se puede llegar a la conclusión de que no veremos un reactor de fusión exitoso en el primer tercio de siglo. Como mínimo esperamos que a mediados de siglo la tecnología haya avanzado lo suficiente para concluir si de verdad es factible y viable recrear la fusión de manera que genere energía eléctrica neta en la Tierra.

Hasta entonces, la cosa no se ve muy bien.

4.10. Conclusión

Resumiendo lo dicho en los últimos apartados, actualmente la tecnología de fusión es una absoluta incógnita, a día de hoy sabemos muy poco sobre este tipo de tecnología, por ello no hemos podido evaluarla con seriedad en este trabajo, aunque podemos asegurar que si se llegara a construir una planta eléctrica operada por fusión, ésta afectaría de manera muy positiva a la red ya que como hemos mencionado anteriormente, en otros apartados, debido a su potencial, generaría mucha más potencia que cualquier tipo de planta eléctrica.

En todo caso, este estudio no podemos incluirlo dentro de la disrupción inicial, de la presente y próxima década, ya que esperamos que este tipo de centrales no aparezcan hasta dentro de 2 o más décadas, es decir a mitad de este siglo.

En general, una planta eléctrica operada por fusión es más segura que las operadas por fisión, por ello se está trabajando de forma muy acelerada para conseguir este tipo de centrales lo antes posible, ya que son más seguras y producen mucha más energía y potencia.

4.11. Motivación

Esta sección es más una extensión del resto de la parte práctica que solo existe para responder una pregunta, ¿cómo es que vuestra práctica no tiene que ver con algo más relacionado a la red, como sería por ejemplo programar un modelo de esta?

La respuesta es sencilla y más simple de lo que puede parecer a primera vista. La fusión tiene potencial para llevar a cabo una segunda disrupción de la red eléctrica, así es la magnitud de esta. Es decir, como puede inducir un cambio adicional a la red, se debe tratar por separado. Y para explorar este tema, que mejor manera de hacerlo con un modelo de demostración del primer aparato de fusión hecho, el Fusor Farnsworth (el nuestro es la variante Farnsworth-Hirsh-Meeks).

Farnsworth también era de la opinión que la fusión podría traer grandes cambios y mejores tiempos, un visionario al cual no nos gustaría llevarle la contraria.

Por tanto, siguiendo la visión de Farnsworth, hemos llevado a cabo una investigación por separado a nuestro objetivo principal para evaluar qué le deparará a la fusión nuclear en términos reales.

5. Fuentes consultadas

5.1. Webgrafía

5.1.1. Disrupción

Las fuentes están con sus respectivas referencias en los pies de página correspondientes. Principalmente he sacado información de fuentes reputables de las cuales podía confiar.

5.1.2. Fusor/Fusión

<https://fusor.net/>

<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear/como-se-realiza-una-reaccion-nuclear/>

<https://definicion.de/reaccion-nuclear/>

https://es.wikipedia.org/wiki/Central_nuclear#Sistema_de_refrigeraci%C3%B3n_en_una_central_nuclear

https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear

https://es.wikipedia.org/wiki/Generador_de_vapor

https://es.wikipedia.org/wiki/Fisi%C3%B3n_nuclear

<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/energia-nuclear-en-espana/>

<https://energia.gob.es/nuclear/Centrales/Espana/Paginas/CentralesEspana.aspx>

<https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/que-diferencia-hay-entre-fision-y-fusion-nuclear/>

[https://es.wikipedia.org/wiki/Fusor_\(dispositivo\)#:~:text=Un%20fusor%20es%20un%20dispositivo,a%20condiciones%20de%20fusi%C3%B3n%20nuclear.&text=Este%20es%20un%20tipo%20de,la%20investigaci%C3%B3n%20de%20la%20fusi%C3%B3n.](https://es.wikipedia.org/wiki/Fusor_(dispositivo)#:~:text=Un%20fusor%20es%20un%20dispositivo,a%20condiciones%20de%20fusi%C3%B3n%20nuclear.&text=Este%20es%20un%20tipo%20de,la%20investigaci%C3%B3n%20de%20la%20fusi%C3%B3n.)

https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear

https://es.wikipedia.org/wiki/Generador_de_vapor

https://es.wikipedia.org/wiki/Central_nuclear

5.2. Fotografías

Las fotografías, tablas, gráficos y demás imágenes han sido extraídas de Google o elaboradas por los mismos autores.

5.3. Bibliografía

Libro “Magnetismo y electricidad” por Purcell.

Libro “Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica”, Gomez Expósito, Antonio. McGraw-Hill.

6. Agradecimientos

José Antonio Sanchez.

Luca Bob.

Nuestras familias.

