

Trabajo Fin de Grado

Las reglas Sarewitz-Nelson como instrumento orientador de las políticas de innovación.

Una aplicación al caso de la superconducción, el hidrógeno y la geotermia.

Autor/es

Josue André Caicedo

Director/es

Isabel Almudí y Francisco Fatás Villafranca

Facultad de Economía y Empresa

2024

Tabla de contenido

1 INTRODUCCIÓN	5
2 MARCO TEORICO	8
I Atributos del proceso de innovación	8
1) <i>La innovación es una cuestión de experimentación empresarial que trata de resolver problemas para adaptarse al entorno.</i>	8
2) <i>La innovación necesita de distintos tipos de información.</i>	9
3) <i>La innovación está integrada en el proceso de mercado.</i>	10
4) <i>La innovación requiere de división y especialización en el conocimiento</i>	10
5) <i>Los factores que influyen en la innovación pueden agruparse en 4 categorías: Oportunidades percibidas, recursos disponibles, incentivos y capacidades para gestionar el proceso.</i>	10
II Los límites de la teoría de los fallos de mercado aplicados al fenómeno de la innovación	11
III Rendimientos crecientes, sistemas indirectos de producción de conocimientos y de innovación	15
IV Las reglas de Sarewitz-Nelson	18
1) <i>La regla de causa-efecto</i>	19
2) <i>La regla del estándar-técnico.</i>	19
3) <i>La regla de la experimentación iluminadora.</i>	19
3 APLICACIONES DE LAS REGLAS SAREWITZ-NELSON AL PROBLEMA DE LAS FUENTES DE ENERGÍA NO AGOTABLES: SUPERCONDUCTORES, HIDRÓGENO Y GEOTERMIA	20
I <i>Energía basada en superconductores</i>	21
II <i>Energía basada en el hidrogeno</i>	24
III <i>Energía geotérmica</i>	27
IV <i>Conclusiones:</i>	29
1) <i>Energía basada en superconductores</i>	29
2) <i>Energía basada en el hidrogeno</i>	30
3) <i>Energía Geotérmica.</i>	31
4 CONCLUSIONES	32

5 BIBLIOGRAFIA	34
6. WEBGRAFÍA.....	36

Title:**Sarewitz-Nelson Rules as a Guiding Instrument for Innovation Policies.****An Application to the Cases of Superconductivity, Hydrogen, and Geothermal
Energy****Resumen**

Este trabajo explica el marco teórico de las políticas de innovación actuales, basado en los modelos de neo-Schumpeter, y explica las reglas de Sarewitz-Nelson. Se muestra la aplicación de estas reglas en tres áreas de innovación: superconductores, hidrógeno y energía geotérmica. Los modelos de neo-Schumpeter destacan la importancia del emprendimiento y la destrucción creativa para el desarrollo económico, mientras que las reglas de Sarewitz-Nelson orientan la política de innovación hacia objetivos sociales y sostenibles. Aplicar estas reglas permite evaluar y guiar el desarrollo tecnológico en términos de eficiencia energética, potencial de energías limpias y optimización de fuentes renovables. En resumen, el estudio subraya la importancia de políticas de innovación bien informadas y orientadas hacia el futuro.

Palabras claves: Políticas de innovación, modelo de Schumpeter, reglas de Sarewitz-Nelson, superconductores, hidrogeno, energía geotérmica.

ABSTRACT

This work explains the theoretical framework of current innovation policies, based on Schumpeter's models, and explains the Sarewitz-Nelson rules. The application of these rules is shown in three areas of innovation: superconductors, hydrogen, and geothermal energy. Schumpeter models highlight the importance of entrepreneurship and creative destruction for economic development, while Sarewitz-Nelson rules guide innovation policy towards social and sustainable objectives. Applying these rules makes it possible to evaluate and guide technological development in terms of energy efficiency, clean energy potential and optimization of renewable sources. In summary, the study underlines the importance of well-informed and future-oriented innovation policies.

1 INTRODUCCIÓN

Desde finales de los años 60, las economías occidentales han asumido la innovación tecnológica como elemento fundamental para fomentar el crecimiento económico, el incremento en la productividad del factor trabajo y la mejora en la ventaja competitiva empresarial (ver por ejemplo Solow, 1956; Romer 1986, 1990; Grossman & Helpman, 1991 y Aghion & Howitt, 1992; 1998, desarrollados en el ámbito del crecimiento económico, y los trabajos de Porter (1990) aplicados al ámbito empresarial). Por ello, parece fundamental entender qué es la innovación tecnológica, en qué contextos se ve favorecida y qué agentes económicos la llevan a cabo. Desde el ámbito de la teoría neoclásica no se aborda la innovación tecnológica como fenómeno en sí mismo. Incluso en los modelos de crecimiento endógeno, la innovación se incorpora como variable stock, recogiendo en los distintos modelos: la inversión en I+D de las empresas, el desbordamiento de conocimiento que se produce entre sectores, la mejora en la calidad del capital humano, etc. Todos ellos factores relacionados con el proceso de innovación, pero que no abordan qué es en sí misma la innovación, cómo se produce y en qué contexto específico se desarrolla y difunde. Ha sido desde la teoría neo-Schumpeteriana (desde Nelson y Winter, 1982 hasta Dosi, 2023) desde donde se ha abordado los fundamentos de la innovación como un fenómeno fundamental estudiando las causas que la motivan, los contextos que la favorecen y difunden y los agentes que la desarrollan.

Pero ¿qué es la innovación? Como primera aproximación podemos tomar la definición del economista austriaco Joseph Schumpeter (1942) *“la innovación es la introducción de un bien (producto) nuevo para los consumidores o de mayor calidad que los anteriores, la introducción de nuevos métodos de producción para un sector de la industria, la apertura de nuevos mercados, el uso de nuevas fuentes de aprovisionamiento, o la introducción de nuevas formas de competir que lleven a una redefinición de la industria”*. Por otro lado, el economista Michel Porter (1990) en su obra *“The Competitive Advantage of Nations”* plantea lo siguiente: *“las empresas consiguen ventajas competitivas a través de la innovación. Su aproximación a la innovación se realiza en sentido amplio, incluyendo nuevas tecnologías y maneras de hacer las cosas”*. Vemos

como ambos autores coinciden en que la innovación es sustancial para el crecimiento tanto de las empresas individuales como de las economías en su conjunto.

Por otro lado, la innovación no se limita únicamente a la creación de productos novedosos, sino que también es la mejora continua en la calidad de productos ya existentes, así como la búsqueda de métodos de producción y calidad, buscando obtener una ventaja competitiva y a la vez prosperar en un entorno globalizado y en constante cambio (ver Dosi, 2023 y las referencias que se incluyen)

¿Por qué es importante la innovación para el crecimiento económico? Según Josep Schumpeter (1942) en su obra "Capitalismo, socialismo y democracia" argumenta que la innovación disruptiva, o la creación de nuevos productos, procesos y mercados, son fundamentales para el progreso económico a largo plazo. Paul Romer (1990) en su modelo de crecimiento endógeno, postulaba que el progreso tecnológico impulsado por la innovación es la fuerza motriz fundamental detrás del crecimiento económico sostenido, ya que la inversión en investigación y desarrollo (I+D) y la promoción de un entorno adecuado para la innovación son cruciales para estimular el crecimiento económico en el largo plazo. Michael Porter (1990), subrayó el papel central de la innovación en la creación de ventajas competitivas para la empresa y las naciones. En su obra "The Competitive Advantage of Nations" argumentó que las empresas que innovan continuamente tienen más posibilidades de sobrevivir y prosperar en entornos competitivos, mientras que las naciones que fomentan la innovación logran un crecimiento económico sostenido y una ventaja competitiva a nivel internacional.

En definitiva, la innovación es crucial para el crecimiento económico porque fomenta la creación de nuevos productos, procesos y mercados, así como también estimula el progreso tecnológico y la productividad, y promueve la competitividad y la ventaja comparativa de las empresas y naciones a nivel global.

Por otro lado, como demuestra la historia económica e industrial reciente, distintas innovaciones tecnológicas han desencadenado revoluciones industriales diferentes, que han alterado las estructuras sectoriales, sociales y territoriales produciendo cambios muy profundos en los niveles y formas de vida de los ciudadanos, el acceso a la educación, la distribución de la riqueza y la utilización de energía y recursos. Asimismo, en cada momento del tiempo, los problemas que son susceptibles de solución tecnológica son diversos y los recursos siempre son escasos. Lo que implica que cada sociedad tiene que

orientar sus esfuerzos innovadores, bien desde el estado, los hogares o las empresas, hacia la solución de problemas concretos (la escasez de energía, la conquista del espacio, la curación de enfermedades, la invención de nuevos materiales, nuevos medios de transporte y comunicación, etc. Pero ¿existe algún tipo de instrumento o metodología que nos permita dilucidar si, para un problema concreto que requiere de solución tecnológica, hay alguna trayectoria técnica que puede dar fruto a corto plazo? Si así fuera, se podrían orientar de manera más efectiva los recursos hacia aquellas trayectorias que tuvieran mayor probabilidad de éxito. Como veremos, las así llamadas reglas Sarewitz-Nelson son una metodología eficaz para dilucidar qué trayectoria tecnológica puede ser más exitosa a corto plazo en la solución de un problema tecnológico concreto. En nuestro caso, aplicaremos dichas reglas a distintas tecnologías que pretenden solucionar el problema del abastecimiento de energía, utilizando fuentes no agotables.

Como es bien sabido el problema del abastecimiento de energía basado en fuentes no agotables, es uno de los desafíos más importantes a los que se enfrenta nuestra sociedad en la actualidad. Aunque el uso de energía para producción y transporte ha sido un problema constante a lo largo de la historia, éste es especialmente relevante en nuestros días por diversos factores como son el agotamiento de los recursos no renovables como consecuencia de su sobreexplotación, el crecimiento de la población y de las regiones industrializadas; y el problema no resuelto de la intermitencia de las energías renovables. Lo que supone la necesidad de encontrar fuentes de energía alternativas no agotables, con alta eficiencia energética y que permitan garantizar el acceso a las mismas a nivel global.

Abordar estos desafíos requiere de colaboración de los distintos gobiernos, los distintos sectores industriales y de la sociedad en su conjunto, así como una combinación de políticas efectivas, innovación tecnológica y cambios en el comportamiento humano. Problemas todos ellos muy complejos y que exceden el alcance de este trabajo. Nos centraremos en analizar de manera qué es la innovación, qué son las reglas Sarewitz-Nelson (S-N) y cómo se aplican al problema del abastecimiento energético sobre la base de fuentes no agotables, para el caso concreto de la energía producida a partir de materiales superconductores, el hidrógeno y la energía geotérmica. Como veremos la aplicación de las reglas S-N nos permitirá dar recomendaciones generales acerca de por qué trayectoria tecnológica apostar en el corto plazo.

Para ello estructuramos el trabajo como sigue: En el segundo apartado explicamos el marco teórico en el cual se basan las políticas de innovación actuales, así como también

se explica qué son las reglas de Sarewitz-Nelson (S-N). En el tercer apartado analizamos por medio de las reglas de Sarewitz-Nelson, tres trayectorias tecnológicas que tratan de dar solución al problema de abastecimiento de energía a partir de fuentes no agotables: la energía basada en materiales superconductores, la energía generada a partir del hidrógeno y la energía geotérmica. En el cuarto apartado presentamos las conclusiones del análisis de las tres innovaciones seleccionadas. Por último, discutimos las conclusiones generales del trabajo.

2 MARCO TEORICO

En este apartado describimos brevemente los atributos principales del fenómeno de la innovación tecnológica desde la perspectiva de la teoría neo- Schumepeteriana. Hacemos especial énfasis en cómo la innovación es fundamentalmente la forma en la que las empresas se adaptan al entorno competitivo en el que se desenvuelven, tratando de resolver los problemas a los que se enfrentan mejor que sus rivales, en su intento por sobrevivir y prosperar.

I Atributos del proceso de innovación

- 1) La innovación es una cuestión de experimentación empresarial que trata de resolver problemas para adaptarse al entorno.*

La innovación desde esta perspectiva constituye la principal forma en la que una empresa puede adquirir ventaja competitiva en relación con sus rivales comerciales. Pero en este proceso de experimentación, los resultados pueden ser inciertos, ya que ninguna empresa puede saber de antemano las innovaciones de la competencia, incluso cuando todos los problemas técnicos estén resueltos, no se puede saber si los consumidores pagarán o comprarán una cantidad que justifique el desembolso de dicha innovación. El riesgo no es calculable, ya que las probabilidades no pueden calcularse para eventos futuros. Por esto existe una gran incertidumbre que hace que todas las innovaciones sean prácticas de variaciones ciegas y cuanto más se desvía la innovación de la senda marcada mayor es la incertidumbre, quizás el punto fundamental es que la innovación está sujeta a incertidumbre radical, consecuencias inesperadas de la experimentación y la inversión, basadas en conocimientos previos. Esto no supone que la innovación tenga un comportamiento irracional; suponemos que las empresas innovan aprovechando al

máximo sus oportunidades y recursos disponibles, sin embargo, tanto las oportunidades como los recursos no están siempre disponibles ni pueden especificarse de antemano. En consecuencia, la política de innovación debe estar sujeta a la misma incertidumbre y dudas en términos de sus efectos sobre el proceso de innovación, habrá consecuencias imprevistas de la política de innovación y gran dificultad para rastrear relaciones causa-efecto en la aplicación de dichas políticas.

2) *La innovación necesita de distintos tipos de información.*

Aunque muchas agencias proporcionan información valiosa, solo la empresa innovadora puede crear un plan y ejecutarlo. Ni las universidades, laboratorios gubernamentales, consultoras de conocimiento tienen la responsabilidad combinatoria final. En este ámbito la empresa con ánimo de lucro es única. El problema es que normalmente se necesita múltiples tipos de conocimiento para innovar y mucha de las fuentes de este conocimiento estarán fuera de la empresa, que debe ser capaz de extraer la información necesaria e integrarla en su propia estructura de conocimiento. (Gibbons et al., 1994)

En lo que respecta la innovación empresarial es necesario convertir el conocimiento particular individual en comprensión y acción global. Podemos concebir a la empresa como una red local de interacción en la que el conocimiento de los miembros individuales de la empresa se combina para lograr un conocimiento colectivo y un rendimiento conjunto. El crecimiento del conocimiento depende de las distintas interpretaciones de la información, las innovaciones, así como los avances científicos, se basan en el desacuerdo, en una lectura diferente de la información, siendo gran parte de ésta de dominio público. Por lo que el estado del conocimiento previo influye en lo que se "lee" y en lo que se "expresa" y, como estableció Rosenberg (1990), las empresas tienen que invertir en su propia comprensión si quieren aprovechar eficazmente la información disponible a nivel global. Por lo tanto, la información es un bien público, en el sentido de que puede utilizarse de forma indefinida, pero no es gratuita. Siempre se debe emplear la capacidad mental para convertirla hacia y desde el conocimiento privado (Cohendet y Meyer-Krahmer, 2001). En este punto encontramos una de las principales fuentes de existencia de variación en el proceso de innovación, variaciones sobre la información global que aparecen por la percepción distinta que tienen las mentes individuales sobre dicha información. La idiosincrasia, la individualidad y la imaginación son elementos indispensables en el proceso de innovación y la forma en que se formula la política de

innovación debe reconocer este hecho; de hecho, sin ellos el espíritu empresarial no daría lugar a soluciones diferentes ante problemas similares.

3) *La innovación está integrada en el proceso de mercado.*

La empresa no solo innova para generar ventajas competitivas, sino que los procesos de mercado también influyen en los resultados y la capacidad de innovación empresarial. La forma en la que los usuarios responden a las novedades y el acceso a los componentes necesarios para la innovación son determinantes en el proceso innovador. La prueba del éxito innovador no es que dicha innovación resuelva un determinado problema, sino que sea rentable *ex post*.

4) *La innovación requiere de división y especialización en el conocimiento*

Quizás la característica más obvia de las economías modernas es la naturaleza distribuida de la generación de conocimiento y la consiguiente distribución de los procesos de innovación resultantes entre múltiples organizaciones, mentes y tipos de conocimiento (Coombs et al., 2003). Como sistema, lo que importa es la naturaleza de las partes que lo componen, los patrones de interconexión y el trazado de los límites relevantes, y cada uno de estos aspectos forma una dimensión de la política de innovación.

5) *Los factores que influyen en la innovación pueden agruparse en 4 categorías: Oportunidades percibidas, recursos disponibles, incentivos y capacidades para gestionar el proceso.*

Es necesario tener en cuenta los cuatro factores para que la política de innovación sea efectiva. Por lo tanto, es probable que aumentar los recursos dedicados a la innovación genere rendimientos rápidamente decrecientes si no se perciben nuevas oportunidades o si la gestión de la innovación no es adecuada y está mal conectada con otras actividades de la empresa o del sector (Carter y Williams, 1958).

II Los límites de la teoría de los fallos de mercado aplicados al fenómeno de la innovación

El desarrollo de la economía de la información y el conocimiento en la década de 1960 llevó a los académicos a darse cuenta de que el conocimiento y la información no son bienes económicos al uso, sino que poseen atributos que dificultan su intercambio en el mercado (Nelson, 1959; Arrow, 1962). La formulación de la teoría de los fallos del mercado y su justificación para la intervención del Estado en las políticas de innovación se deriva de este concepto particular sobre la naturaleza de la información y el conocimiento. En este contexto, la idea fundamental es que los mercados están relacionados con el conocimiento e información y que, éstos tienen, una tendencia inherente a producir resultados socialmente ineficientes, lo que justifica que las políticas públicas que traten de corregir estos fallos. Pero desde la teoría neo-Schumpeteriana, la doctrina de los fallos de mercado malinterpreta gravemente la naturaleza y el papel de la competencia en las sociedades modernas al no darse cuenta de que capitalismo y equilibrio son conceptos incompatibles y que innovación y empresa excluyen el equilibrio y la competencia perfecta. ¿Por qué la doctrina de los fallos del mercado fracasa con respecto a la innovación? Las razones fundamentales están en las propiedades que se predicen de los mercados perfectamente competitivos y de los equilibrios óptimos y paretianos. Bajo ese prisma, no sólo se debe negar a todos los agentes el poder de influir en los precios de los productos y los factores productivos, sino también que los mercados valoren todas las consecuencias de toda acción económica en el presente y en el futuro indeterminado. En la práctica, el conjunto de mercados posibles es incompleto y los mercados que existen no valoran todas las consecuencias de las acciones presentes y futuras.

Bajo el prisma de los fallos de mercado, las consecuencias de que las acciones no se valoren con precisión en los mercados que operan se denominan externalidades, desde la perspectiva de la innovación, las externalidades más importantes se relacionan con la necesidad de desarrollar derechos de propiedad relacionados con la explotación de la información y el conocimiento. Si los productos derivados de conocimientos concretos pueden copiarse sin costes, otros pueden convertir la invención en innovación y erosionar los incentivos para invertir en invención. Esto ha justificado los sistemas de patentes y derechos de autor.

Las externalidades no agotan la idea de los fallos del mercado. Quizás, más importante que la existencia de externalidades es la ausencia en general de mercados futuros que orienten la decisión de inversión en innovación. Todas las innovaciones son actividades que requieren de un desembolso previo al retorno económico. Debido a la ausencia de precios conocidos, el único recurso posible para la toma de decisiones es el juicio del empresario. Como ha expresado Shackle (1972), La empresa no puede basar el conocimiento sólo en la creencia de que el éxito seguirá al compromiso de actuar. Esta incertidumbre es intrínseca al proceso de mercado. En el capitalismo moderno, la incertidumbre genuina está "incorporada", por así decirlo, y sus consecuencias para la voluntad de invertir en innovación son mucho más difíciles de afrontar, ya que las innovaciones, como todos los descubrimientos, son eventos únicos. Además, los precios actuales del mercado no transmiten la información necesaria para invertir, ya que no transmiten información sobre los planes de inversión de los rivales. En consecuencia, las empresas buscan otras formas de coordinar sus actividades, ya sean complementarias o competitivas, y esto requiere desviaciones del ideal competitivo. Una consecuencia de todo esto es que los procesos de innovación están mediados por una variedad de métodos ajenos al mercado, que involucran principalmente redes de información y otras formas de acuerdo entre organizaciones e individuos, procedimientos que generan confianza y trabajan para limitar las consecuencias dañinas de la innovación como la información incierta y asimétrica. Estos acuerdos son precisamente contrarios a la idea de competencia entre empresas aisladas, atomísticas e independientes. Sin poder de mercado, hasta cierto punto, la innovación se convierte en algo improbable, y los acuerdos de colaboración en I+D, por ejemplo, son una forma de abordar los fallos de coordinación implícitos.

Por lo tanto, es la naturaleza innovadora del capitalismo la que impide el surgimiento de un conjunto completo de mercados futuros lo que imposibilita la emergencia de precio que los coordinen. El hecho fundamental es que los beneficios se derivan del despliegue de ideas que otros no tienen. La consecuencia es que toda la dinámica del sistema depende de la existencia de incertidumbre no cuantificable y asimetría en la información. No se puede argumentar que la economía funcionaría mejor si se redujeran las incertidumbres relacionadas con la innovación, porque la única manera de reducir estas incertidumbres es reducir la incidencia de la innovación y, por tanto, socavar el motor principal del progreso económico. De hecho, la razón del apoyo público a la investigación en ciencia y tecnología radica en el hecho de que los vínculos entre estas categorías generales de

conocimiento y la explotación comercial de innovaciones son, a menudo, tan débiles que las empresas privadas, legítimamente, no encontrarían justificación para invertir en ellas. Dado que no se puede innovar basándose en una fracción tecnológica o una cuarta parte de un hecho científico, es necesario crear el conjunto completo de conocimientos detrás de una innovación. En consecuencia, los costes de explotar una innovación caen con la escala de explotación, precisamente esta condición elimina la posibilidad de competencia perfecta. Los costes generales de innovación, en los que las empresas deben incurrir inevitablemente, significan que su comportamiento será, en el mejor de los casos, imperfectamente competitivo y que habrá desviaciones sistemáticas y desiguales entre los precios y los costes marginales de producción en toda la economía.

La falta de mercados y poder de mercado tampoco agota las dificultades de utilizar la competencia perfecta para reflejar el capitalismo moderno. En la terminología de la economía, hay no rivalidad y no exclusión del conocimiento. En la práctica, y como consecuencia directa de la división del trabajo del conocimiento, obtener conocimiento a partir de la información requiere conocimientos previos para interpretar esa información y este conocimiento no puede ser adquirido sin un coste de oportunidad. La transferencia de conocimientos implica mucho más que los costes de comunicación en sentido estricto. En muchos casos, el intercambio de conocimientos requiere comunicación entre 'mentes similares', sólo posible entre aquellos que han adquirido habilidades comparables para comprender el significado de la nueva información científica y tecnológica.

Hasta cierto punto, los fallos de mercado están interrelacionadas. El aspecto de bien público de información se vincula directamente con los desbordamientos de información y problemas de externalidad. Todas las economías se basan en el conocimiento y los problemas de la economía del conocimiento son intrínsecos a la naturaleza de una economía de mercado capitalista. Cuando nos ocupamos de la política de innovación, es evidente que estamos en dificultades, basando el razonamiento en un modelo de competencia perfecta. Por lo tanto, los fallos de mercado son una rúbrica general, no una receta para estimular innovaciones individuales. Cuando aparecen distorsiones del mercado relacionado con el conocimiento y la información, no existe garantía de que una política gradual pueda mejorar el bienestar económico. Quizás el problema sea más profundo, en el sentido de que las cuestiones de incertidumbre, efectos indirectos, rendimientos crecientes y bienes públicos no son fracasos en absoluto, sino elementos vitales en el proceso evolutivo que es el capitalismo. Por tanto, ¿qué tipo de políticas o

estructuras institucionales podrían incentivar la innovación en las economías capitalistas? Más allá de las patentes y de la promoción de la ciencia básica, es necesario crear sistemas nacionales o regionales de innovación que sean capaces de coordinar el conocimiento entre organizaciones que compiten y cooperan, asumiendo la incertidumbre radical asociada a los procesos de innovación.

Como hemos apuntado, la innovación desempeña un papel central como fuente de las diferencias en los comportamientos de las empresas que dan lugar a ventajas competitivas. La rivalidad depende de un comportamiento diferencial y estas diferencias se reflejan en diferencias de rentabilidad y cuotas de mercado. Por lo que el papel de los mercados es coordinar y evaluar conjeturas empresariales rivales y así guiar el cambio económico que medimos (parcialmente) al elevar los niveles de vida. Esto implica la adaptación a nuevas oportunidades, nuevas necesidades y nuevos recursos. Por lo tanto, la debilidad central del enfoque de los fallos del mercado en la política de innovación no es su falta de precisión sino su intento de establecer una perspectiva política dentro de los límites de la teoría del equilibrio estático de los mercados y la industria. Los argumentos sobre los fallos del mercado identifican características significativas de la producción y el uso del conocimiento, pero estas características son intrínsecas a la naturaleza dinámica del proceso competitivo. El progreso económico depende de la creación continua de conocimiento privado y asimétrico, conocimiento que sea suficientemente confiable y defendible para justificar la inversión original, pero que tiene retornos potenciales que no sólo son inciertos para el inversor, sino que crea incertidumbre de manera complementaria y competitiva para los rivales. Las imperfecciones identificadas en el enfoque de los fallos del mercado deben verse ahora desde una perspectiva diferente, como aspectos integrales y necesarios de la producción y difusión del conocimiento en una economía de mercado. Por supuesto, este no es un punto nuevo: son las características naturales de un proceso económico impulsado por la destrucción creativa (Schumpeter, 1942). Otra forma de decir esto es decir que, sin asimetrías de conocimiento y las incertidumbres e indivisibilidades coordinadas, el proceso competitivo no tiene nada con qué trabajar. La naturaleza del bien cuasi público del conocimiento, la indivisibilidad y los rendimientos crecientes, las incertidumbres inherentes a los procesos creativos, de prueba y error y la naturaleza imperfecta de los derechos de propiedad sobre el conocimiento, son esenciales para que funcione el capitalismo de mercado. No son imperfecciones que deban corregirse mediante políticas.

Los empresarios introducen novedades en la economía, alteran patrones establecidos de la actividad del mercado, crean incertidumbre y proporcionan el combustible que enciende el proceso de evolución económica. El hecho de que el marco de competencia perfecta no pueda incorporar al empresario es una declaración reveladora de su falta de adaptación hacia una economía impulsada por la innovación. Estas recompensas anormales no son consecuencia de imperfecciones del mercado, ni reflejan necesariamente el uso indeseable del poder de mercado; más bien son recompensas por un desempeño superior y deben ser consideradas como tales. Las innovaciones crean diferencias de comportamiento, que identificamos como ventajas competitivas, y la posibilidad de competencia e incentivos para desafiar las posiciones establecidas en el mercado. Además, para que las instituciones del mercado funcionen adecuadamente, las empresas con innovaciones superiores controlarán una participación cada vez mayor de los escasos recursos productivos disponibles, proceso que es el vínculo entre las innovaciones en particular y el crecimiento económico en general. Esto sugiere que la política de innovación y la política de competencia son complementarias; de hecho, que una política pro-innovación puede ser la forma más segura de política de competencia, y que su propósito amplio es asegurar que se mantengan las condiciones para la continua creación y explotación de asimetrías de competencia. En mercados verdaderamente competitivos, todas las posiciones establecidas están abiertas a desafíos. Por lo tanto, el capitalismo es necesariamente inquieto, ocasionalmente cambiante, y la competencia en el fondo es un proceso para difundir diversos descubrimientos, cuya utilidad no puede predecirse de antemano. El mecanismo de mercado es un marco dentro del cual llevar a cabo experimentos innovadores y un marco para facilitar la adaptación económica a esos experimentos. La cuestión clave, por lo tanto, es cómo interactúa este proceso competitivo con las condiciones que promueven la innovación.

III Rendimientos crecientes, sistemas indirectos de producción de conocimientos y de innovación

En una economía basada en el conocimiento, el hecho de que los rendimientos de las inversiones en innovación aumentan con la escala de su explotación implica la existencia de rendimientos crecientes. Como Adam Smith entendió tan claramente, los rendimientos crecientes se aplican tanto a la generación de conocimiento como a su explotación

precisamente debido a la creciente especialización de los tipos de conocimiento y de las instituciones generadoras de conocimiento. Dos características dan forma al proceso de innovación moderno, a saber, una creciente complementariedad de diferentes tipos de conocimiento junto con una creciente disimilitud de estos tipos de conocimiento, un reflejo de una división cada vez más fina del trabajo en la producción de conocimiento (Richardson, 1972). Las empresas innovadoras necesitan aprovechar e integrar múltiples tipos de conocimiento, ya sean científicos, tecnológicos o de mercado, comprender la importancia y contribuir a los avances en estos diversos tipos de conocimiento está más allá de las capacidades internas de cada empresa individual. En consecuencia, las empresas deben aumentar sus propios esfuerzos de I+D, ganando acceso al conocimiento generado y aprender a gestionar un amplio espectro de acuerdos de colaboración para la generación de conocimiento (Coombs y Metcalfe, 2000). La consecuencia es que las innovaciones tienen lugar en un contexto sistémico.

Sin embargo, los sistemas no se definen sólo en términos de sus componentes, en este caso por las personas con conocimientos específicos que operan en las organizaciones; La naturaleza del sistema también depende de cómo estos individuos están conectados por flujos de información y el propósito que se esconde detrás de estos flujos. La correlación de conocimientos requiere comunicación de información e indica la importancia de las conexiones en el sistema de innovación y la necesidad de que estas conexiones cambien a medida que cambian los problemas de innovación. Pero, los sistemas de ciencia y tecnología no son sistemas de innovación; estos últimos tienen un alcance mucho más limitado y están dirigidos a objetivos comerciales específicos; es decir, se centran en secuencias de problemas locales que reflejan las preocupaciones propias de la empresa innovadora. La forma más apropiada de concebir estos sistemas es que se autoorganizan y que las empresas privadas toman la iniciativa de estimular la autoorganización de las mentes conocedoras del sistema. Esto significa que los sistemas de innovación son entidades localmente dinámicas, nacen, crecen, se estabilizan y, en última instancia, declinan y fracasan, y que la base de la dinámica de la autoorganización es la evolución de la secuencia particular del problema de innovación. Parte de la dinámica del cambio sistémico es que el crecimiento del conocimiento depende del desacuerdo entre los individuos y del hecho de que la solución a un problema típicamente abre nuevos problemas que pueden requerir diferentes tipos de conocimiento para su solución.

Como señalan Cohendet y Meyer-Krahmer (2001), los sistemas de innovación operan como procesos recursivos de prueba y error para estimular el crecimiento del conocimiento en relación con problemas específicos. La consecuencia de esto es que, a medida que evoluciona la secuencia del problema, también lo hacen los componentes y conexiones que definen el sistema de innovación particular.

Lo que está en juego aquí es el desarrollo de la estructura institucional que genera o facilita la innovación en la economía, una estructura institucional que transfiere información y facilita la intercomunicación del conocimiento existente para moldear mutuamente las agendas futuras y las soluciones de los recursos de las diferentes organizaciones en torno a las soluciones de secuencias de problemas de innovación. Es esta una estructura institucional para coordinar los distintos tipos de conocimientos que mejoran la comunicación entre las distintas organizaciones que intervienen en el proceso y facilitan que emerjan las innovaciones (Edquist, 1997; Carlsson, 1997; Nelson, 1993).

En los sistemas de innovación están involucradas muchas organizaciones: empresas privadas que operan en contextos de mercado, universidades y otros organismos educativos, sociedades profesionales y laboratorios gubernamentales, consultorías privadas y asociaciones de investigación industrial, pero son fundamentalmente empresas, las que están en la posición única de combinar los múltiples tipos de conocimiento para innovar. Existe una fuerte división del trabajo y, debido a las peculiaridades económicas de la información mencionadas anteriormente, un predominio de la coordinación a través de redes, estructuras de comités públicos y otras organizaciones no mercantiles (Tassey, 1992; Teubal, 1996). En consecuencia, la información es "pegajosa", parcialmente ininteligible, no fluye fácilmente entre diferentes instituciones o disciplinas y, por lo tanto, es difícil coordinar el conocimiento en el grado deseado. Por ello, los así llamados los sistemas nacionales de innovación buscan facilitar la coordinación del conocimiento entre las empresas que operan en entornos competitivos. El énfasis actual en programas de investigación colaborativa que incluyan empresas, clientes, proveedores y universidades, los incentivos para establecer parques científicos o incubadoras de universidades, el énfasis en programas de desarrollo de clústers, el establecimiento de oficinas de transferencia de tecnología en las universidades, la financiación de importantes programas de I+D industrial dentro de los laboratorios universitarios, y los intensos esfuerzos nacionales en materia de actividad

prospectiva son ejemplos importantes de mecanismos de coordinación promovidos por los sistemas nacionales de innovación.

Una vez descrita la naturaleza de los procesos de innovación y sus problemas de coordinación del conocimiento nos preguntamos si existe alguna manera de guiar a dichos sistemas hacia trayectorias de innovación concretas. Como veremos a continuación, más allá de las orientaciones estratégicas, que dependerán del contexto geopolítico concreto del país, existen un conjunto de reglas que permiten examinar para un determinado problema tecnológico, cuál será la trayectoria tecnológica más exitosa. Y es que, como explicaremos a continuación, la coordinación del conocimiento en una innovación no solo requiere coordinación entre mentes, agentes y organizaciones, sino que también es necesario que exista coordinación entre las partes que integran el propio conocimiento en sí con sus desarrollos científico-técnicos y tecnológicos. Es decir, podemos afirmar que las innovaciones surgen cuando existe una adecuada coevolución entre los conocimientos científico-técnicos y sus aplicaciones prácticas (innovaciones) orientadas a la resolución de problemas concretos. En este sentido, las reglas Sarewitz-Nelson (S-N) describen el contexto en el que la adecuada coevolución entre ciencia y desarrollo tecnológico se produce y, por tanto, la solución tecnológica es más probable que emerja.

IV Las reglas de Sarewitz-Nelson

Cuando afirmamos que las tecnologías avanzan a través de la coevolución simultánea entre los desarrollos técnicos y la comprensión de sus bases científicas, asumimos que existen procesos de selección mutuamente dependientes en ambos ámbitos (Nelson 2005). Normalmente, los núcleos técnicos primitivos (innovaciones tecnológicas) surgen primero de la experiencia empírica; luego, la práctica y la comprensión de los mecanismos teóricos subyacentes coevolucionan a través del aprendizaje incremental mutuo (Vicenti, 1990). Como señala Nelson (2008), estos procesos de coevolución no operan con la misma fluidez en todas las actividades. Al observar la evolución de diferentes campos, vemos que, en aquellos sectores en los que el progreso tecnológico es rápido, el conjunto de aplicaciones técnicas tiende a evolucionar hacia donde la comprensión teórica sólida existe, al tiempo que, la comprensión científica avanza y ayuda a mejorar la práctica mediante la manipulación experimental de las innovaciones en que se basan dichos conocimientos científicos. Este proceso de mutua

interdependencia es lo que llamaremos coevolución entre ciencia y tecnología, y la comprensión de sus mecanismos nos permitirá predecir qué trayectorias tecnológicas serán más exitosas en el corto plazo para resolver un determinado problema tecnológico; así como detectar posibles factores que puedan bloquear o favorecer la emergencia de innovaciones concretas.

En concreto, en un intento por detectar factores de bloqueo o avance en los procesos de coevolución subyacentes a las actividades de innovación (basados en tecnología concreta), Sarewitz y Nelson (2008, 2008) han propuesto tres reglas simples que se basan en la concepción del cambio técnico expuesta en las páginas anteriores. Básicamente, las reglas S-N las podemos presentar de la siguiente manera (ver Almudí et al., 2016):

1) La regla de causa-efecto

Para que una tecnología sea eficiente en la resolución de problemas, es necesario que incorpore las variables esenciales (lo que implica la comprensión de los mecanismos de causa-efecto que subyacen a la resolución de dicho problema) para resolver el problema en cuestión. Por lo tanto, para invertir en una dirección tecnológica específica, es una gran ventaja que exista un vínculo fuerte y claro entre lo que hará una tecnología (si evoluciona exitosamente) y el remedio que puede proporcionar para el problema. Es decir: es importante comprender los mecanismos teóricos que subyacen a la tecnología en cuestión, y que, además, dicha solución tecnológica no depende del contexto en el que se aplica.

2) La regla del estándar-técnico.

Para que la tecnología en cuestión sea exitosa, es importante que exista o pueda desarrollarse un prototipo basado en el conocimiento científico y sobre el que se pueda experimentar. Normalmente, los prototipos primitivos aparecen primero y luego se produce un aprendizaje incremental sobre todo si existe un conocimiento científico sólido alrededor de los mecanismos técnicos que componen el estándar-técnico.

3) La regla de la experimentación iluminadora.

Una opción tecnológica será tanto más prometedora para solucionar un problema cuanto más fácil sea evaluar sus resultados con criterios inequívocos; Necesitamos nociones

claras sobre lo que significa mejorar y volverse eficaz en la resolución de problemas. Esto significa que será útil que los experimentos arrojen una evidencia clara acerca de si ciertas direcciones en la experimentación sobre el estándar técnico han cambiado o mejorado la dicha tecnología.

Como sostienen Sarewitz y Nelson (2008a, 2008b), cuando las tecnologías cumplen las tres reglas, podríamos esperar que las inversiones en I+D conduzcan a un progreso rápido hacia la resolución del problema al que se dirigen las inversiones. Por otra parte, cuando no se cumplen las normas, no se debe esperar que los programas de I+D que se desarrollan en torno a dichas tecnologías tengan éxito en el futuro próximo.

En su formulación original, las reglas SN se proponen como un método amplio que emerge de un marco teórico implícito. Esta formulación tiene ventajas y desventajas. Por un lado, es flexible e intuitivo y encaja con el trabajo teórico apreciativo. Por otro lado, sigue abierta la posibilidad de afinar las reglas, viendo hasta qué punto son aplicables sin ambigüedades y evaluando hasta dónde llegan como parte de una teoría para la política tecnológica.

3 APLICACIONES DE LAS REGLAS SAREWITZ-NELSON AL PROBLEMA DE LAS FUENTES DE ENERGÍA NO AGOTABLES: SUPERCONDUCTORES, HIDRÓGENO Y GEOTERMIA

En el contexto geopolítico actual, la cuestión de energía ha adquirido una relevancia sin precedentes debido a una serie de factores interrelacionados. Por un lado, tenemos la dependencia de fuentes de energía convencionales, como el petróleo y el gas natural, los cuales han generado tensiones geopolíticas significativas, todas ellas marcadas por la competencia de recursos y la volatilidad de precios. Otro punto para tener en cuenta es la preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual ha llevado a una creciente demanda de fuentes de energía más limpias y sostenibles. Además, está el debate sobre la necesidad de alcanzar la soberanía energética a partir de fuentes de energía que se produzcan dentro de los territorios nacionales para evitar los efectos de las guerras comerciales y las interdependencias geoestratégicas.

Por lo que, considerando el marco geopolítico, social y económico actuales, encontrar una fuente de energía alternativa se ha vuelto necesario por varias razones. En primer lugar, reducir la dependencia de combustibles fósiles de regiones geopolíticamente inestables, lo que puede contribuir a una mayor seguridad energética y a su vez mayor estabilidad global. Además, diversificar las fuentes energéticas hacia fuentes renovables, reduciendo los impactos ambientales negativos asociados con la extracción y quema de combustibles fósiles, y también impulsar la innovación y desarrollo económico de energías limpias.

Por lo tanto, la búsqueda de fuentes de energía alternativas no solo es crucial para abordar los desafíos geopolíticos y ambientales actuales, sino que también ofrece oportunidades para impulsar la sostenibilidad y el progreso a nivel mundial.

A continuación, partiendo de las tres reglas Sarewitz-Nelson, exploraré la evolución de tres potenciales fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles y el gas, como son: la energía generada a partir de materiales superconductores, la energía basada en la explotación del hidrógeno y la energía geotérmica. En este análisis, evaluaremos su eficacia en términos de sus posibilidades de éxito para convertirse en fuentes de energía alternativas en el corto plazo, lo que aconsejaría la inversión en investigación y desarrollo (I+D) para dichas tecnologías.

1 Energía basada en superconductores

Regla 1: Causa-efecto.

Los superconductores funcionan en la mayoría de los materiales cuando están en un estado de muy baja energía. En un conductor estándar como el cobre a temperatura ambiente, los electrones que se mueven a través de él interactúan con las vibraciones de la red de átomos, lo que genera resistencia y disipación de energía en forma de calor. Sin embargo, cuando un conductor se enfría a temperaturas extremadamente bajas, los electrones pueden formar pares que se desplazan a través del material como si fueran una sola entidad. Esto reduce o elimina la capacidad de los electrones para interactuar con las vibraciones de la red, lo que resulta en la ausencia de resistencia eléctrica en los superconductores. Este fenómeno es clave para comprender por qué los superconductores pueden transportar corriente eléctrica sin pérdida de energía

A la hora explicar este tipo de energía existen varias teorías importantes como son: la BSC, las ecuaciones de Eliashberg, la Teoría de Ginzburg-Landau, Los superconductores de alta TC. Entre estas teorías, la teoría BCS es una de las más destacadas y ampliamente aceptadas.

La teoría BCS nos explica que los superconductores son materiales que, al ser enfriados por debajo de una temperatura crítica, conducen electricidad sin resistencia. A temperatura ambiente, los electrones en un conductor se comportan como un gas que choca con los átomos del material, lo que dificulta el flujo eléctrico. Sin embargo, al disminuir la temperatura, las vibraciones de los átomos disminuyen, facilitando el movimiento de los electrones. Esta temperatura crítica varía según el material.

Cuando un conductor se enfría por debajo de su temperatura crítica, los átomos se estabilizan y forman una red sobre la cual los electrones pueden moverse libremente. A pesar de que los electrones se repelen entre sí debido a su carga negativa, la mecánica cuántica permite explicar este fenómeno peculiar.

Los electrones, al ser cargados negativamente, atraen a los átomos cargados positivamente, distorsionando la red de átomos del conductor. Esto crea vibraciones en la red, donde se acumula carga positiva localizada.

Estas vibraciones cargadas positivamente se propagan por el conductor, atrayendo a otros electrones. Esto da lugar a la formación de pares de electrones conocidos como pares de Cooper. Estos pares de Cooper se mueven como una sola entidad, comportándose como partículas negativas en un patrón de vibración ordenado que permite la conducción de electricidad sin pérdida de energía en la red.

Por lo tanto, la energía basada en superconductores no cumple con la primera ley de causa y efecto de Sarewitz-Nelson debido a la incompleta comprensión de los mecanismos teóricos subyacentes lo que puede socavar la capacidad de predecir y controlar los efectos de una manera confiable. Esto también se puede aplicar al contexto en el que se aplica, ya que varía dependiendo de la comprensión de los mecanismos subyacentes y la capacidad para predecir y controlar sus efectos. Aunque existen varias teorías que podrían explorarse y ser una tecnología prometedora en un futuro lejano.

Regla 2: Estándar-técnico

La existencia de un estándar técnico (prototipo) sobre el que experimentar y validar los resultados científicos y evaluar su eficiencia y aportación. En el caso de la energía basada en superconductores, un ejemplo puede ser el generador eléctrico para molinos eólicos el cual está desarrollado por el CSIC y por la empresa Gamesa.

Este proyecto representa una aplicación concreta y tangible de la tecnología basada en superconductores en el campo de la energía eólica. Este generador desarrollado es significativamente más ligero que los convencionales, lo que facilita su traslado e instalación. Además, tiene la capacidad de generar la misma cantidad de energía o incluso mayor que los generadores convencionales.

Una de las principales características de este generador es la reducción de la velocidad de rotación del generador, lo que conlleva simplificar y reducir el peso de los componentes mecánicos, especialmente del multiplicador, que es esencial para transmitir y multiplicar el movimiento de las palas del molino al generador. La optimización del diseño permite una mayor eficiencia en la conversión de energía cinética del viento en energía eléctrica.

La utilización de este generador presenta ventajas en términos de eficiencia y disipación de calor, ya que al no incorporar hierro en su circuito magnético y usar menos cobre que los generadores convencionales, reduce la pérdida de energía por calor y, por lo tanto, se reduce la necesidad de sistemas de refrigeración. Esto conlleva una mayor eficiencia en la generación de energía y una reducción en los costos operativos asociados con el mantenimiento y la refrigeración.

En conclusión, la existencia y éxito de este proyecto respalda los resultados científicos detrás de la tecnología basada en superconductores, donde se demuestra su viabilidad y utilidad a la hora de generar energía. Por lo que este ejemplo demuestra cómo el desarrollo de prototipos puede contribuir significativamente a la validación y la mejora continua de la tecnología, cumpliendo así con los principios establecidos por la segunda regla de Sarewitz-Nelson.

Regla 3: Posibilidad de experimentación iluminadora

Esto implica la capacidad de predecir y controlar los aspectos de una innovación de manera fiable ya sea en términos económicos, sociales o medioambientales. Para el caso de la energía basada en superconductores podemos observar que no se cumple con esta

regla de manera completa, esto debido a la falta de comprensión de los mecanismos teóricos.

Aunque existen importantes teorías como la BCS, la cual nos proporciona un marco teórico para entender del comportamiento de los superconductores, aún existen aspectos desconocidos e incompletos que afectan la capacidad de predecir y controlar los efectos de esta tecnología.

La falta de comprensión de los mecanismos teóricos puede socavar la capacidad de los investigadores y responsables de la toma de decisiones para prever y abordar los posibles impactos económicos, sociales y ambientales. Por ejemplo, es difícil estimar los costes de producción, la disponibilidad de materiales o incluso en la estabilidad de la red eléctrica si los superconductores se utilizan a gran escala.

En conclusión, las limitaciones en la comprensión de los mecanismos teóricos de la energía basada en superconductores, la tercera regla de Sarewitz-Nelson la cual implica la capacidad de predecir y controlar los efectos de una innovación de una manera confiable, en este caso no se cumple. Esta falta de comprensión completa puede dificultar la implementación segura y efectiva de la tecnología de superconductores en diversos contextos.

II Energía basada en el hidrogeno

Regla 1: Causa-efecto

La energía basada en el hidrogeno se produce principalmente por el proceso de electrolisis, en el cual se utiliza electricidad para separar la molécula de oxígeno e hidrogeno. Esta división genera energía química, que queda almacenada en la molécula del hidrogeno. Este almacenamiento de energía permite su uso para cuando sea necesario o requerido, lo que resulta fundamental para aprovechar eficazmente la energía basada en el hidrogeno.

Todo este proceso se realiza mediante un electrolizador, siendo este el dispositivo clave ya que es capaz de descomponer las moléculas de agua en sus componentes básicos antes señalados. Los enlaces entre estos dos elementos son altamente estables, por lo que se requiere aportar energía eléctrica para que ocurra la electrólisis. La eficiencia de los

electrolizadores es esencial para facilitar la penetración del hidrógeno en diversas industrias y promover la adopción de tecnologías como las pilas de combustible de hidrógeno.

Contar con electrolizadores eficientes no solo garantiza una producción de hidrógeno más sostenible, sino que también impulsa el desarrollo de infraestructuras de energía basada en el hidrógeno, lo que a su vez fomenta la transición hacia una economía más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Como observamos, se cumple con la primera regla de Sarewitz- Nelson donde la causa y los efectos teóricos están claramente establecidos, lo que nos proporciona la capacidad de predecir y controlar los efectos ambientales, económicos y sociales. Esto nos garantiza una toma de decisiones más informada y completa posible. En este caso podemos determinar también que es independiente del contexto en el que se aplique.

Regla 2: Estándar-técnico

En este caso nos referimos a la existencia de un prototipo en el cual se pueda comprobar su base científica y a su vez la eficiencia y contribución de la innovación. En el caso de la energía basada en el hidrógeno, un ejemplo puede ser la Fotelectrocatalisis.

La fotelectrocatalisis representa una mejora significativa en el proceso de producción de hidrógeno renovable en comparación con la electrolisis tradicional. Esto debido a que la electrolisis tradicional requiere de electricidad transportada a un electrolizador para separar el agua en hidrógeno y oxígeno, en cambio la fotelectrocatalisis integra este proceso en un solo paso utilizando directamente la radiación solar.

La simplificación de este proceso conlleva una serie de importantes beneficios. En primer lugar, evita las pérdidas de transporte y transformación de electricidad, generando una mejora en la eficiencia de la conversión de energía solar a hidrógeno. Además, al utilizar energía solar como fuente directa de energía, la fotelectrocatalisis reduce la dependencia de los precios fluctuantes de la electricidad, lo cual hace que la producción de hidrógeno sea más predecible y económica a largo plazo.

Un aspecto fundamental es la simplificación de la infraestructura y los equipos necesarios para implementar la fotoelectrocatalisis en comparación con la electrolisis tradicional. Lo cual reduce las inversiones necesarias para establecer instalaciones de producción de

hidrógeno y hacer que la tecnología sea más accesible y adaptable a una variedad de entornos.

Por lo tanto, la fotoelectrocatalisis representa un prototipo funcional y viable en la producción de hidrógeno renovable, donde se valida la base científica y demuestra su eficacia. Al proporcionar una solución más eficiente, económica y sostenible para la producción de hidrógeno, la fotoelectrocatalisis cumple con la segunda regla de Sarewitz-Nelson, donde se demuestra la capacidad, y a su vez respalda y avanza en el conocimiento y la aplicación práctica del hidrogeno como fuente de energía.

Regla 3: Posibilidad de experimentación iluminadora

Al aplicar la tercera regla de Sarewitz-Nelson, la cual estudia la capacidad de prever y controlar los efectos de una tecnología de manera confiable, ya sea en términos económicos, sociales o medioambientales, para la energía basada en hidrogeno, se puede concluir lo siguiente:

En primer lugar, se puede observar cómo el proceso de electrolisis es una parte fundamental para la obtención de energía basada en el hidrogeno. Siendo la electrolisis un proceso bien comprendido que utiliza electricidad para separar el agua en hidrogeno y oxígeno. Esta técnica nos proporciona una forma eficiente y sostenible de obtener hidrogeno. Por lo que, al comprender este proceso y sus implicaciones, se puede prever y mejorar su impacto en el medioambiente y en la economía.

Además, al obtener electrolizadores más eficientes no solo nos garantiza una producción de hidrogeno más sostenible al reducir el consumo de energía, sino que también impulsa el desarrollo de infraestructuras de energía basada en el hidrogeno, esto incluye la construcción de plantas de producción de hidrógeno, estaciones de abastecimiento de hidrógeno para vehículos de pila de combustible y otros componentes de la infraestructura necesaria para una economía basada en el hidrógeno. Al tener en cuenta estos aspectos, se puede prever y controlar mejor el impacto ambiental, económico y social.

En resumen, el entendimiento claro de los procesos involucrados en la producción de energía basada en el hidrogeno y la capacidad de prever y controlar los efectos ambientales, económicos y sociales nos indica que se cumple con la tercera regla de Sarewitz-Nelson.

III Energía geotérmica

Regla 1: Causa- efecto

La energía geotérmica es una forma de energía de origen volcánico, la cual aprovecha el calor interno de la Tierra para extraer agua a elevadas temperaturas del subsuelo, la que es utilizada para generar electricidad o para obtener energía calórica. Esta forma de energía se basa en el principio de que la temperatura del interior de la Tierra aumenta con la profundidad, lo que resulta en la existencia de aguas calientes o vapor cerca de la superficie terrestre en ciertas regiones a nivel mundial. La base científica está basada en el aumento de la temperatura en el interior de la Tierra con la profundidad. Esto científicamente nos proporciona una base sólida para prever y comprender los efectos de esta tecnología

Existen tres tipos principales de centrales de energía geotérmica: de vapor seco, flash y binarias. En las centrales de vapor seco, que son la tecnología geotérmica más antigua, se extrae vapor directamente de las fracturas del suelo para accionar una turbina y generar electricidad. Las centrales flash aprovechan agua caliente a alta presión proveniente de la profundidad, la cual se mezcla con agua fría y de baja presión para producir vapor que impulsa una turbina. Por otro lado, en las centrales binarias, el agua caliente del subsuelo calienta un fluido secundario con un punto de ebullición más bajo que el del agua, lo que hace que el fluido se convierta en vapor y accione una turbina para generar electricidad.

Como sabemos la primera ley de Sarewitz-Nelson de causa-efecto establece que es importante comprender tanto los beneficios como los posibles riesgos y efectos secundarios de una tecnología o práctica antes de su implementación. En el caso de la energía geotérmica, es esencial considerar aspectos como el potencial de contaminación del agua y del suelo, los posibles impactos en los ecosistemas locales y la sismicidad inducida por la extracción de calor del subsuelo. De esta manera, se puede garantizar una implementación responsable y sostenible de esta fuente de energía renovable. En definitiva, la energía geotérmica si cumple parcialmente con la primera regla de Sarewitz-Nelson ya que se conoce todos sus posibles efectos en términos económicos, sociales y ambientales. Sin embargo, no cumple con la independencia del contexto en el que se aplique o implemente, ya que depende de la zona geográfica, dado que solo se puede

desarrollar en determinadas zonas que tengan altas concentraciones geotérmicas. Por lo tanto, no cumple completamente con la primera regla de Sarewitz-Nelson de Causa-efecto.

Regla 2: Estándar-técnico

Entendemos la necesidad de contar con un prototipo el cual nos confirme y valide los resultados obtenidos de la primera fase, es decir, la investigación científica. Este prototipo no solo actúa como una herramienta de validación, sino que también nos proporciona una plataforma de analizar y mejorar de una manera más eficiente la innovación. En el caso de la energía geotérmica destacamos el proyecto de Google y la compañía de Fervo Energy.

En este proyecto el enfoque innovador es la extracción de fluidos calientes de depósitos natural mediante la perforación de dos pozos horizontales cerca de un campo geotérmico. Este enfoque representa una mejora significativa sobre los métodos convencionales al utilizar un circuito cerrado. En este proceso, el agua fría se bombea a través de los pozos hacia fracturas en la roca subterránea, donde se calienta y se convierte en vapor. Este vapor es llevado a la superficie y utilizado para generar electricidad mediante turbinas. Un aspecto destacado de este sistema es que el agua inyectada se reutiliza en lugar de ser descargada, lo que es crucial para conservar recursos hídricos, especialmente en regiones secas como Nevada.

En este proyecto se aborda tanto los problemas técnicos como sociales asociados a la generación de energía geotérmica. Ya que maximiza la eficiencia del proceso al utilizar un circuito cerrado y reutiliza el agua, lo cual reduce los desperdicios y optimiza los recursos. Socialmente, responde a los problemas locales al proporcionar una solución energética sostenible que pueda beneficiar a las comunidades cercanas, tanto a la hora de generar empleo como reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

En conclusión, el proyecto de energía geotérmica de Google y Fervo Energy cumple con las premisas establecidas por Sarewitz y Nelson, ya que aborda tanto los aspectos técnicos como sociales de la generación de energía de manera innovadora y sostenible.

Regla 3: Posibilidad de experimentación iluminadores

Esta hace referencia a la capacidad de prever y controlar los efectos de una tecnología de manera confiable, ya sea en términos económicos, sociales o medioambientales. En el caso de la energía geotérmica, esta regla parece cumplirse de manera efectiva.

En primer lugar, su base científica está bien establecida y comprendida, esto científicamente nos proporciona una base sólida para prever y comprender los efectos de esta tecnología. Se entiende que la extracción de calor del subsuelo puede tener implicaciones en la sismicidad local, en la calidad del agua y en los ecosistemas circundantes. Por lo cual, se pueden tomar medidas preventivas y correctivas para mitigar cualquier impacto negativo ya sea económico, social o medioambiental.

En segundo lugar, el proyecto de energía geotérmica de Google y Fervo Energy aborda problemas técnicos como pueden ser los sociales asociados con la generación de energía geotérmica. La utilización de un circuito cerrado para la extracción y reutilización del agua reduce los desperdicios y optimiza los recursos, lo que contribuye a minimizar los posibles impactos ambientales. También, el proyecto responde a las necesidades y preocupaciones de las comunidades locales al proporcionar una solución energética sostenible que puede beneficiarlas tanto en términos de empleo como de reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Por lo tanto, podemos concluir que se cumple con tercera regla de Sarewitz-Nelson, donde el conocimiento científico subyacente y la capacidad de abordar los efectos potenciales en términos económicos, sociales y medioambientales indican que se puede prever y controlar de manera confiable el impacto de esta tecnología.

IV Conclusiones:

Del análisis anterior concluimos:

1) Energía basada en superconductores

La comprensión de los mecanismos teóricos subyacentes es esencial para predecir y controlar los efectos de la tecnología. Aunque hay varias teorías relevantes, como la de BCS, aún no se comprenden completamente todos los aspectos, lo que complica la aplicación de una manera confiable en los diferentes contextos y la primera regla no se

cumpliría. La existencia de proyectos como el generador eléctrico para molinos eólicos respaldan la viabilidad y utilidad de este tipo de tecnología. Este prototipo nos muestra como el desarrollo práctico puede contribuir significativamente a ratificar y mejorar de forma continua la tecnología.

Por más que existan de teorías importantes como la BCS, la falta de comprensión de los mecanismos teóricos subyacentes dificulta la capacidad de prever y controlar los efectos de la tecnología de una manera confiable. Esto puede plantear desafíos en términos de estimación de costos, disponibilidad de materiales y estabilidad de la red eléctrica a gran escala.

En conclusión, la superconductividad no cumple con las tres reglas de Sarewitz-Nelson, ya que al no comprender los mecanismos teóricos subyacentes no cumple con la primera regla de Causa-Efecto ni con la tercer Regla de Posibilidad de experimentación iluminadora.

2) Energía basada en el hidrogeno

En este caso si se cumple con la primera regla de Sarewitz-Nelson, ya que la relación causa-efecto entre el proceso de electrólisis y la producción de energía está claramente establecida y comprendida. Esto proporciona la capacidad de predecir y controlar los efectos económicos, sociales y medioambientales de una manera eficaz, de forma independiente del contexto que se utiliza.

El ejemplo de la fotoelectrocatalisis nos muestra un prototipo funcional y viable en la producción de hidrogeno renovable, validando la base científica y a su vez demostrando su eficiencia. Esto cumple con la segunda regla de Sarewitz- Nelson, aplicando el conocimiento de forma práctica como fuente de energía me manera eficiente, económica y sostenible.

Al tener claro los procesos involucrados en la producción de energía basada en el hidrogeno y la capacidad de prever, así como controlar sus efectos ambientales, económicos y sociales indican que se cumple con la tercera regla de Sarewitz-Nelson. Esto se evidencia en la capacidad para anticipar y mejorar el impacto ambiental, económico y social de la tecnología, así como el impulso de infraestructuras necesarias para su implementación.

En conclusión, la energía basada en el hidrogeno cumple de una forma satisfactoria con las tres reglas de Sarewitz-Nelson, lo que respalda su viabilidad y utilidad como una alternativa eficiente, sostenible y prometedora en la producción de energía.

3) *Energía Geotérmica*

La energía geotérmica, si bien cuenta con una base científica sólida que respalda su comprensión y efectos, no cumple de forma completa con la primera regla de Sarewitz-Nelson de causa y efecto. Aunque se conoce la relación entre la extracción de calor del subsuelo y la generación de energía, la implementación está condicionada a la disponibilidad de recursos geotérmicos en zonas específicas, limitando la aplicación independientemente del contexto.

El proyecto de energía geotérmica realizado por Google y Fervo Energy representa un progreso significativo entre la innovación y sostenibilidad de esta tecnología. Al abordar tanto los aspectos técnicos como sociales asociados a la generación de energía geotérmica, esto nos muestra el compromiso con la eficiencia, la optimización de recursos y el beneficio de las comunidades locales.

La energía geotérmica cumple con la tercera regla de Sarewitz-Nelson al contar con un sólido conocimiento científico subyacente y la capacidad de abordar los efectos potenciales en términos económicos, sociales y medioambientales. Ya que, al comprender los posibles impactos como la implementación de soluciones técnicas y sociales adecuadas, nos muestran la capacidad de prever y controlar de manera confiable el impacto de esta tecnología.

Por lo tanto, la energía geotérmica representa una opción prometedora para la generación de energía renovable, aunque su implementación puede estar condicionada por la disponibilidad de recursos geotérmicos.

En la siguiente tabla (Tabla 1) presentamos de manera resumida la discusión llevada a cabo sobre el grado de cumplimiento de las reglas S-N para las distintas tecnologías.

	Superconductores	Hidrógeno	Geotérmica
Regla 1: <i>Causa-Efecto</i>	No cumple	Si cumple	No cumple
Regla 2: <i>Estándar-Técnico.</i>	Si cumple	Si cumple	Si cumple
Regla 3: <i>Experimentación iluminadora.</i>	No cumple	Si cumple	Si cumple

Tabla 1: Grado de cumplimiento de las reglas S-N

4 CONCLUSIONES

Revisando los desarrollos recientes en la política de innovación he intentado verlos a través del lente de nuevos desarrollos en el pensamiento sobre los sistemas de innovación y los procesos que los forman. Aquí la idea fundamental es la naturaleza experimental y evolutiva de una economía de mercado y de red. Como observó acertadamente Schumpeter, el capitalismo funciona mediante la destrucción creativa, un proceso que se desarrolla a escala global. Los patrones de competencia internacional cambian constantemente y un país avanzado debe ser siempre consciente de las nuevas oportunidades y amenazas si quiere mantener su nivel de vida. Un elemento central de respuesta debe ser su tasa de experimentación innovadora y en los últimos 20 años ha surgido un hilo conductor consistente en las políticas basado en una perspectiva de innovación distribuida y una competencia impulsada por la innovación. En este nuevo enfoque, el foco de atención es la naturaleza transitoria e institucionalizada de la innovación, más que el gasto en investigación y desarrollo. Llamado a esto la "perspectiva del fallo del sistema" en sustitución a la "perspectiva de los fallos del mercado".

Partiendo del contexto anterior, las Reglas de Sarewitz-Nelson emergen como un conjunto de reglas para comprender y evaluar las inversiones en I+D. Estas reglas se fundamentan en la idea de coevolución entre la ciencia y la tecnología, reconociendo como estas influyen en la resolución de los problemas tecnológicos. Estas reglas tres reglas delinean criterios clave para determinar la eficiencia de la inversión en tecnología,

las cuales son: 1) Regla Causa-Efecto: bases científicas bien establecidas y que no dependa del contexto; 2) Regla del estándar-técnico: Es necesario que exista un prototipo basado en el conocimiento científico sobre el cual se pueda experimentar; 3) Regla de la experimentación iluminadora: una opción tecnológica será más prometedora si es fácil evaluar los resultados de los experimentos con criterios claros. Los experimentos deben proporcionar evidencias de clara mejora en lo económico, social y ambiental.

Cuando una tecnología cumple con estas tres reglas, se recomiendan las inversiones en I+D. Por otro lado, si no se cumplen estas reglas no se recomienda la inversión, ya que es poco probable que los programas de I+D tengan éxito en un corto plazo de tiempo.

Explorando las tres reglas de Sarewitz-Nelson, se analiza la evolución de tres potenciales innovaciones energéticas, que son la energía basada en superconductores, la energía basada en el hidrógeno y la geotérmica.

Como hemos visto la superconductividad no cumple con las tres reglas de Sarewitz-Nelson debido a la falta de comprensión de los mecanismos teóricos subyacentes. Se recomienda la inversión en ciencia básica, para comprender bien la tecnología y sus bases científicas. La energía basada en el hidrogeno cumple de una forma satisfactoria con las tres reglas de Sarewitz-Nelson, lo que respalda su viabilidad y utilidad como una alternativa eficiente, sostenible y prometedora en la producción de energía. Se recomienda invertir en el corto plazo e impulsar su desarrollo en I+D. Por último, la energía geotérmica representa una opción prometedora para la generación de energía renovable, aunque su implementación puede estar condicionada por la disponibilidad de recursos geotérmicos. Se recomienda invertir, pero dentro del desarrollo de redes de energía de carácter local por el propio carácter intrínseco de esta tecnología.

En conclusión, basándonos en el análisis según las tres reglas de Sarewitz-Nelson, la tecnología que recomendaríamos fomentar a nivel global y con intensos planes de I+D, sería la del hidrogeno ya que cumple con todas las reglas de forma satisfactoria.

5 BIBLIOGRAFIA

Aghion, P. & Howitt, P. (1992). A Model of Growth through Creative Destruction. *Econometrica* 60(2): 323-351.

Aghion, P. & Howitt, P. (1998). *Endogenous Growth Theory*. MIT Press.

Almudí, I., Fatas-Villafranca, F. and Sánchez, J. (2016). A formal discussion of the Sarewitz-Nelson rules. *Economics of Innovation and New Technology*, 25(7): 714-730.

Arrow, K. (1962). Economic welfare and the allocation of resources to invention, in R.R. Nelson (ed). *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economical and Social Factors*, New York: NBER

Carlsson, B. (1997) *Technological Systems and Industrial Dynamics*, Dordrecht
Carter, C., and Williams, B.R., 1958, *Industry and Technical Progress*, Oxford University Press.

Cohendet, P. and Meyer-Krahmer, F. (2001). *The theoretical and policy implications of knowledge codification*, *Research Policy*, 30, 1563—91.

Coombs, R., Harvey M. and Tether, B. (2003). Analysing distributed innovation processes. *Industrial and Corporate change*, 12, 1125-55

Edquist, C (ed). (1997). *Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations*, London: Pinter.

Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P. and Trow, M., (1994). *The New Production of Knowledge*, London: Sage.

Grossman, G. & Helpman, E. (1991). *Innovation and Growth in the Global Economy*. MIT Press.

Littlechild, S. (1981). Misleading calculations of the social cost of monopoly power, *Economic Journal*, 91, 348-63

Merges, R.P. and Nelson, R. (1990). On the complex economics of patent scope, *The Columbia Law Review*, 90, 839-916.

Metcalf, J.S. and Georghiou, L. (1998). Equilibrium and evolutionary foundations of technology policy. *Science, Technology Industry Review*, OECD, 22, 75—100.

Nelson, R.R. (1959). The simple economics of basic scientific research. *Journal of Political Economy*, 67, 297-306.

Nelson, R. and Winter, S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press.

Nelson, R. (1993) *National Innovation Systems*, New York: Oxford University Press.

Nelson, R. R. (2005). *Perspectives on Technological Evolution*. In *The Evolutionary Foundations of Economics*, edited by K. Dopfer, 461-471. New York: Cambridge University Press.

Nelson, R. R. (2008). *Bounded Rationality, Cognitive Maps and Trial and Error Learning*. *Journal of Economic Behavior and Organization* 67: 78-89.

Richardson, G.B. (1972). *The organisation of industry*, *Economic Journal*, 82, 883-96.

Romer, P.M. (1986). Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy* 94(5): 1002-1037.

Romer, P.M. (1990). Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy* 98 (5): 71-102.

Rosenberg, N. (1990). Why do firms do basic research (with their own money), *Research Policy*, 19, 165—74.

Sarewitz, D, and R. R. Nelson (2008). *Three rules for Technological Fixes*, *Nature* 456: 871-872

Shackle, G, L.S. (1972) *Epistemics and Economics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Solow, R. (1956). *A Contribution to the Theory of Economic Growth*. *Quarterly Journal of Economics* 70: 65-94.

Tassey, G. (1992). *Technology Infrastructure and Competitive Position*, Dordrecht: Kluwer

Teubal, M. (1996). R&D and technology policy in NICs as learning processes, *World Development*, 24, 449-60.

Vincenti, W. (1990). *What Engineers Know and How They Know It*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Young, A. (1928). Increasing returns and economic progress. *Economic Journal*, 38 527-42

6. WEBGRAFÍA

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/electrolizador#:~:text=Los%20electrolizadores%20PEM%20utilizan%20una,en%20el%20lado%20de%20c%C3%A1todo.>

<https://www.tecpa.es/energiahidrogeno/#:~:text=El%20hidrogeno%20como%20fuente%20de%20energia%20se%20produce%20principalmente%20mediante,en%20la%20mol%C3%A9cula%20de%20hidr%C3%B3geno>

[Energía Geotérmica - Qué es, cómo funciona, ventajas y desventajas \(concepto.de\)](https://www.concepto.de/energia-geotermica-que-es-como-funciona-ventajas-y-desventajas)

<https://fintualist.com/chile/ciencia/superconductores-a-temperatura-ambiente/>

[file:///C:/Users/Usuario/Downloads/revista,+2+511+La+superconductividad+2%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/revista,+2+511+La+superconductividad+2%20(2).pdf)

[R+D CSIC - El primer generador eléctrico superconductor para molinos eólicos de mediana potencia](https://www.csic.es/energia/el-primer-generador-elctrico-superconductor-para-molinos-eolicos-de-mediana-potencia)

<https://www.pv-magazine.es/2021/08/26/fotoelectrocatalisis-el-proyecto-de-innovacion-de-repsol-y-enagas-que-simplifica-la-electrolisis-busca-novio/>

<https://www.motor.es/futuro/proyecto-energia-geotermica-google-en-marcha-202398914.html>

<https://www.techopedia.com/es/definicion/superconductor>

<https://xavierferras.com/2014/09/una-definicion-de-innovacion/>

https://cincodias.elpais.com/cincodias/2018/10/08/mercados/1538992231_511910.html#

<https://www.leadsostenibilidad.com/blog/agotamiento-recursos-naturales>

<https://www.petroenergia.info/post/la-intermitencia-de-las-energ%C3%ADas-renovables-impactos-y->

[alternativas#:~:text=La%20intermitencia%20se%20refiere%20a,los%20focos%20de%20una%20casa.](https://www.petroenergia.info/post/la-intermitencia-de-las-energ%C3%ADas-renovables-impactos-y-alternativas#:~:text=La%20intermitencia%20se%20refiere%20a,los%20focos%20de%20una%20casa.)

<https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/ejes-sostenibilidad/cambio-climatico/eficiencia-energetica/que-es-la-eficiencia-energetica/index.cshtml>

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/07/report-universal-access-to-sustainable-energy-will-remain-elusive-without-addressing-inequalities>