

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Administración para el Desarrollo**

**Modelo de Decisión Bajo Incertidumbre Para Inversiones en  
Plantas de Fusión Tokamak**  
Trabajo de investigación

**Marco Gabriel Villagómez Yánez**

**Economía**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Economista

Quito, 21 de diciembre de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE ADMINISTRACIÓN PARA EL DESARROLLO

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Modelo de Decisión Bajo Incertidumbre para Inversiones en Plantas de Fusión  
Tokamak**

**Marco Gabriel Villagómez Yáñez**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Sebastián Oleas Martin , Economista  
Ph.D.(c).

Firma del profesor

---

Quito, 21 de diciembre de 2016

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Marco Gabriel Villagómez Yánez

Código: Colegio de Administración para el Desarrollo

Cédula de Identidad: 0502293236

Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre de 2016

## RESUMEN

Dado el creciente peligro del calentamiento global, se ha encontrado que una acidificación marina debido a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera puede causar una extinción masiva del 35% de las especies marinas. Por lo mismo es necesario desarrollar nuevos tipos de energía que puedan suplir la demanda energética global con cero emisiones. Las plantas europeas conceptuales de fusión son una posible solución. Por lo tanto, la presente investigación propone un modelo de decisión bajo incertidumbre en el cual se establecen pagos esperados para el Gobierno Federal de Estados Unidos en dos escenarios: en el primero, el agente representativo opta por invertir en Fusión Nuclear, en el segundo opta por seguir construyendo plantas de carbón. El enfoque de pagos esperados se centra en las ganancias netas que recibiría el agente para ambos escenarios. Al compararlos, se introducen tres variables probabilísticas: alfa (probabilidad de extinción masiva al usar plantas de fusión nuclear), beta (probabilidad de extinción masiva al usar plantas de carbón) y gamma (probabilidad de que las plantas de fusión sean una realidad en términos industriales para el año 2050). Además, se presenta la variable C, que representa la pérdida que sufriría el agente representativo en caso de una extinción masiva. Resolviendo el modelo, se estiman los valores para todas las variables probabilísticas. Los resultados muestran que un agente representativo estaría dispuesto a invertir en plantas de fusión nuclear incluso si la probabilidad de que sean una realidad en el año 2050 es tan pequeña como el 2,38%. El comportamiento de alfa, beta y gamma muestra claramente que el incentivo primordial del agente inversor no es el cuidado del medio ambiente, más bien, la alta rentabilidad de las plantas de fusión nuclear.

Palabras clave: incertidumbre, modelo, VPN, fusión nuclear, Tokamak, extinción masiva.

## ABSTRACT

Given the increasing danger of global warming, it has been found that marine acidification due to the high concentrations of CO<sub>2</sub> in the atmosphere can cause a massive extinction of 35% of marine species. Therefore it is necessary to develop new types of energy that can meet the global energy demand with zero emissions. European conceptual fusion plants are a possible solution. Therefore, the present research proposes a decision model under uncertainty in which expected payments are established for the Federal Government of the United States in two scenarios: in the first one, the representative agent chooses to invest in Nuclear Fusion, in the second option, for continuing to build coal plants. The expected payments approach focuses on the net gains that the agent would receive for both scenarios. When comparing them, three probabilistic variables are introduced: alpha (probability of mass extinction using nuclear fusion plants), beta (probability of mass extinction when using coal plants) and gamma (probability of fusion plants being a reality in industrial terms by the 2050). In addition, the variable C is introduced, which represents the loss that the representative agent would suffer in the event of a mass extinction. Solving the model, we estimate the values for all probabilistic variables. The results show that a representative agent would be willing to invest in nuclear fusion plants even if the probability of them becoming a reality in the year 2050 is as small as 2.38%. The alpha, beta and gamma behavior clearly shows that the primary incentive of the investing agent is not environmental care, rather, the high profitability of nuclear fusion plants.

Key words: uncertainty, model, VPN, nuclear fusion, Tokamak, mass extinction.

## Tabla de contenido

<b>Pregunta .....</b>	<b>10</b>
<b>Objetivos: .....</b>	<b>10</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>10</b>
<b>Extinción Masiva .....</b>	<b>12</b>
<b>Identificación de emisiones.....</b>	<b>13</b>
<b>Generalidades de la fusión .....</b>	<b>17</b>
<b>Las ventajas de la fusión nuclear .....</b>	<b>18</b>
<b>Viabilidad.....</b>	<b>19</b>
<b>Revisión de literatura.....</b>	<b>20</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>23</b>
<b>Variables .....</b>	<b>24</b>
<b>Explicación del Modelo .....</b>	<b>27</b>
<b>Valor Presente Neto Estimado para una planta de Fusión .....</b>	<b>28</b>
<b>Valor Presente Neto para una planta de carbón .....</b>	<b>31</b>
<b>Costos GG e IR .....</b>	<b>32</b>
<b>Costo C (Extinción Masiva) .....</b>	<b>33</b>
<b>Probabilidades alfa, beta y gamma sin incertidumbre .....</b>	<b>36</b>
<b>Probabilidades alfa, beta y gamma con incertidumbre .....</b>	<b>38</b>
<b>Limitaciones del Modelo .....</b>	<b>42</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>44</b>

**Anexos:..... 47**

**Gráficos:**

Gráfico 1 (GLOBAL CARBON ATLAS, 2014).....	14
Gráfico 2. (EPA, 2016).....	15
Gráfico 3 (Liu, 2015).....	16
Gráfico 4 (Liu, 2015).....	16
Gráfico 5. Diagrama esquemático de una planta de poder tokamak. (Maisonnier, y otros, 2005) .....	18
Gráfico 6. Línea Temporal Escenario F.....	26
Gráfico 7. Línea Temporal Escenario G.....	27
Gráfico 9. Projected change in global fisheries revenues under climate change. (Lam, Cheung, Reygondeau, & Sumaila, 2016).....	34
Gráfico 10. Extinction Intensity. (New World Encyclopedia, 2014).....	35
Gráfico 11. Comportamiento de Gamma, Alfa y Beta.....	39
Gráfico 12. Distribución Gamma.....	40



**Tablas:**

Tabla 1. Costos Estimados de Plantas de Fusión Nuclear (Maisonnier, y otros, 2005) .....	29
Tabla 2. Costos Estimados de Investigación para Plantas de Fusión Nuclear .....	30
Tabla 3. VPNs estimados para diferentes escenarios con varias tasas de descuento.....	30
Tabla 4. VPNs Plantas de Carbón.....	32
Tabla 5. Estimación de variable C .....	36
Tabla 6. Escenarios Conferencia de París (Climate Interactive, 2016) .....	36
Tabla 7. Regresión de Gamma, Alfa y Beta. ....	39
Tabla 8. Recuento Distribución Gamma.....	41
Tabla 9. Escenarios Gamma.....	41

### **Pregunta**

¿Bajo qué condiciones probabilísticas presenta retornos positivos y competitivos el invertir en energía de fusión nuclear durante los siguientes 24 años?

### **Objetivos:**

- Identificar las consecuencias a largo plazo de la excesiva emisión de CO<sub>2</sub> sobre la fauna marina, haciendo uso de estudios científicos reconocidos pertinentes a la investigación.
- Determinar las fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> de Estados Unidos y China, los dos más grandes emisores a nivel mundial, mediante el uso de información confiable proveniente de fuentes oficiales y documentos académicos.
- Explicar de manera clara el funcionamiento general del proceso de fusión nuclear y usar como ejemplo prototipos existentes, cuya información está basada en reportes e investigaciones hechos por autoridades miembros del programa ITER respecto a esta nueva tecnología.
- Construir un modelo de toma de decisiones bajo incertidumbre que pueda establecer las condiciones bajo las cuales la inversión en fusión nuclear resulta atractiva en términos financieros versus otros métodos de generación energética. Esto se logra mediante la inclusión de diversas variables identificadas y justificadas con sustento académico.

### **Introducción**

El ser humano ha vivido en el planeta Tierra durante cerca de 6000 años (Thomas & otros, 1997), tiempo en el cual ha cambiado y se ha adaptado a diferentes situaciones con el único objeto de sobrevivir. Sus cualidades particulares le han convertido en la especie sobre el tope de la cadena alimenticia en varios sentidos. Específicamente, su capacidad de usar el medio que le rodea para conseguir determinados fines; desde la manipulación del fuego para

cocer alimentos, calentarse y alumbrar hasta la histórica revolución industrial, misma que le dotó de capacidades tecnológicas sin precedentes. El ser humano usa su inteligencia para conseguir su propagación como especie y el cumplimiento de sus necesidades. ¿Existe un límite para el crecimiento? Se puede deducir que incluso en un horizonte temporal muy lejano, la fuente de alimentos o energía se puede agotar. Si se mira este problema en un contexto más reducido, todo ecosistema tiene una capacidad de carga que puede soportar un determinado número de individuos antes de que los recursos sean insuficientes (Stojkov & Shepherd, 2007). Esto implica que el planeta y los recursos naturales que usa el hombre también tienen una capacidad que de ser sobrepasada; esto causaría un conflicto entre las necesidades humanas y la posibilidad de satisfacer las mismas. Día a día el consumo aumenta, se construyen ciudades para satisfacer la necesidad de refugio y seguridad, estas a su vez desencadenan una serie de beneficios que obedecen a la naturaleza gregaria de la especie, al comercio, al desarrollo, la especialización, el surgimiento de nuevas tecnologías, la aplicación de las mismas, la producción de una enorme gama de bienes y servicios cada vez más específicos.

De este planteamiento nacen varias interrogantes: ¿cómo satisfacer las necesidades de una especie que ha aumentado su consumo de recursos per cápita, desde sus inicios, en un factor de 30? Un ser humano actual consume 30 veces más que un humano en las etapas iniciales de la especie. Por ejemplo, para el año 2009, la humanidad ya extraía un 50% más de recursos naturales que tres décadas atrás (Giljum, y otros, 2009). Particularmente, el consumo energético masivo es relativamente nuevo dentro de la historia de la humanidad. La revolución industrial fue el vaticinio del calentamiento global debido a la emisión de CO<sub>2</sub>, conllevando cambios ambientales a nivel planetario en un ritmo que la Tierra jamás ha experimentado. Aunque el derretimiento de los casquetes polares, el aumento en el nivel del mar y el cambio

de los patrones climáticos parezcan ser la consecuencia central de la contaminación, quizás se le ha dado menor importancia a un peligro aún mayor: el impacto biológico.

### **Extinción Masiva**

Ahora bien, respecto a este tema en particular, se han realizado numerosos estudios científicos para determinar el impacto de la emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente. Resulta de particular interés la investigación realizada por J. Veron en 2008, donde se presenta un análisis detallado sobre los efectos de las emisiones de dióxido de carbono a largo plazo. Se predice que al finalizar este siglo los océanos estarían experimentando cambios de acidificación, mismos que son nocivos para el ecosistema marino (Veron, 2008). Aunque podría pensarse que un siglo es un largo período para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, el principal problema radica en que existe, en palabras del autor, un *commitment* o compromiso, término usado en las ciencias naturales para referirse al inicio de cambios irreversibles cuyos efectos se verán tiempo después. Así, los niveles críticos de acidificación marina se alcanzarían después de medio siglo y sus efectos a largo plazo podrían manifestarse al final del siglo. Pero se debe recalcar, que bajo estas primicias, si los niveles de CO<sub>2</sub> no se reducen de manera considerable dentro de las siguientes décadas, el resultado sería catastrófico para finales del año 2100.

En palabras de Veron:

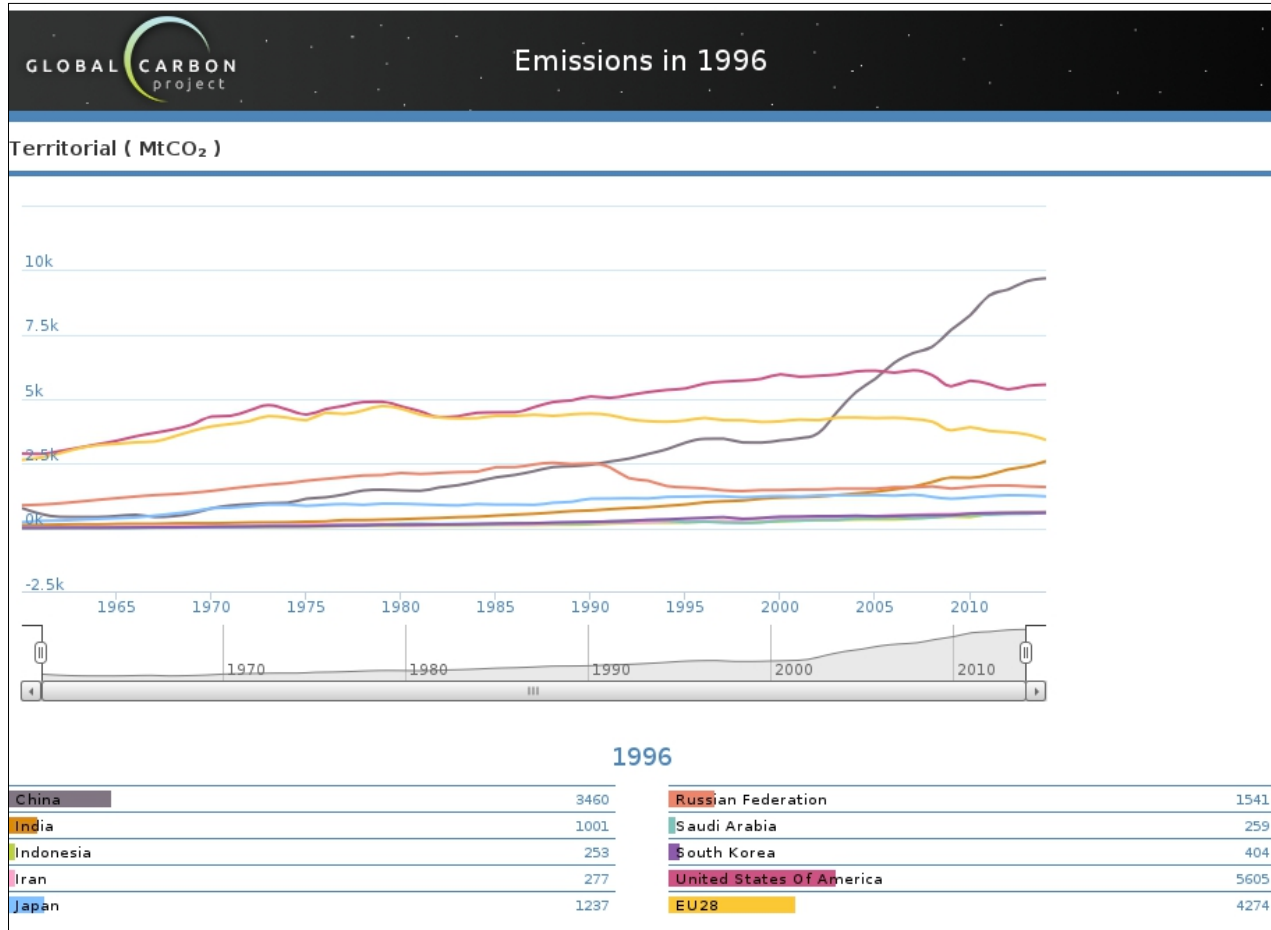
“Los niveles de CO<sub>2</sub> y pH esperados para el final de este siglo no han ocurrido desde el Eoceno Medio, pero la significativa tasa de cambio que actualmente estamos experimentando no tiene precedentes conocidos. No puede haber una solución evolutiva para dicha tasa de cambio. Finalmente –y aquí estamos hablando de siglos en lugar de milenios- el pH del océano va a bajar a un punto en el cual alteraciones en los anfitriones de otros cambios químicos, incluyendo la anoxia, serían esperados. Si esto sucede, el estado ácido del océano al final del

siglo, o en momentos cercanos a este, se volverán una realidad y la Tierra entraría en su sexta extinción masiva de forma repentina. Otras cuantas décadas como las actuales causaran que la Tierra se encuentre comprometida en una trayectoria de la cual no habrá manera de escapar” (Veron, 2008).

Esta declaración tiene fuertes implicaciones sobre el futuro de la humanidad, pues una extinción masiva en el ecosistema oceánico podría desencadenar catástrofes no solo en términos de biodiversidad, sino también en temas económicos. Basta preguntarse qué sucederá con las fuentes de alimento que provienen del mar, la cantidad de trabajos que se perderían, la escasez que esto causaría y lo más importante: el efecto en cadena que todo ecosistema tiene, una extinción masiva en los océanos podría traer consigo una serie de impactos ambientales sobre tierra firme, incluyendo un crítico desbalance de otras especies terrestres y el posible surgimiento de nuevas enfermedades. Así, se puede concluir que el escenario a futuro no es muy prometedor, a menos que se reduzcan las emisiones de CO<sub>2</sub> lo antes posible. ¿Pero cómo puede lograrse tal objetivo?

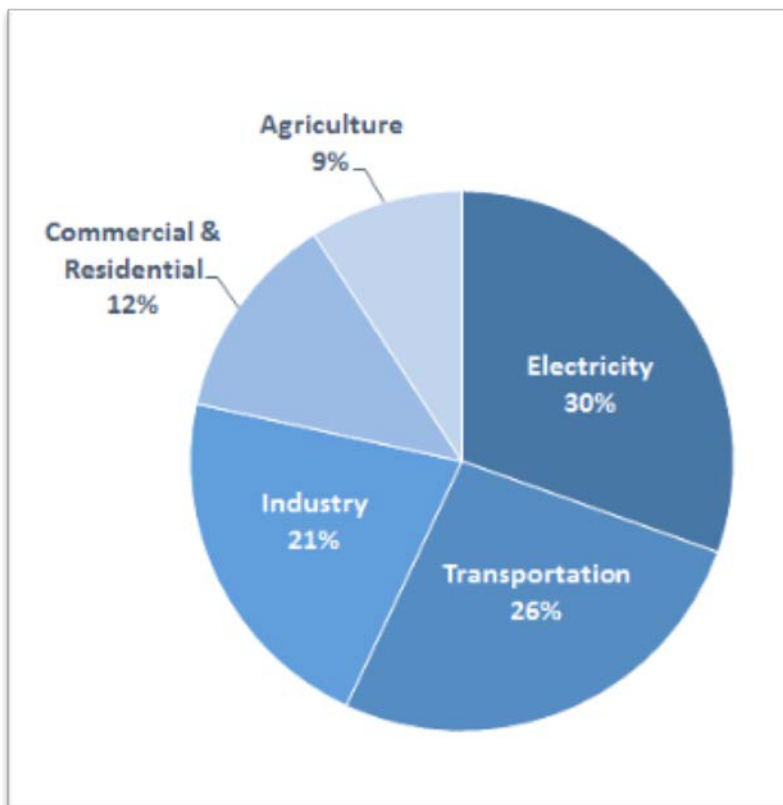
### **Identificación de emisiones**

Es necesario considerar el origen de las emisiones. Los países que mayores emisiones de CO<sub>2</sub> actualmente son China, en el primer lugar seguido por los Estados Unidos (Anexo1). Se puede apreciar la evolución temporal de estas emisiones en el Gráfico 1.



**Gráfico 1 (GLOBAL CARBON ATLAS, 2014)**

¿Qué vuelve a estos países grandes contaminadores? Según los datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos,(EPA) la electricidad es la principal causa de emisión de CO<sub>2</sub>, con un 30% del total, seguida del transporte y la industria (Gráfico 2). Aunque los usos sean diferentes, la raíz de estas emisiones es la misma: la quema de combustibles (EPA, 2016).



**Gráfico 2. (EPA, 2016)**

Por otro lado, el caso de China muestra un esquema algo más elaborado, de manera que se conocen las fuentes como actividades y también como combustibles, llevándose el primer lugar la generación energética como actividad y el uso de carbono como medio de generación de energía (Gráficos 3 y 4). Además se sabe que el uso de combustibles fósiles contribuye con un 90% de las emisiones totales, un 25% se va en exportación y lo demás se consume en su totalidad al interior del país (Liu, 2015).

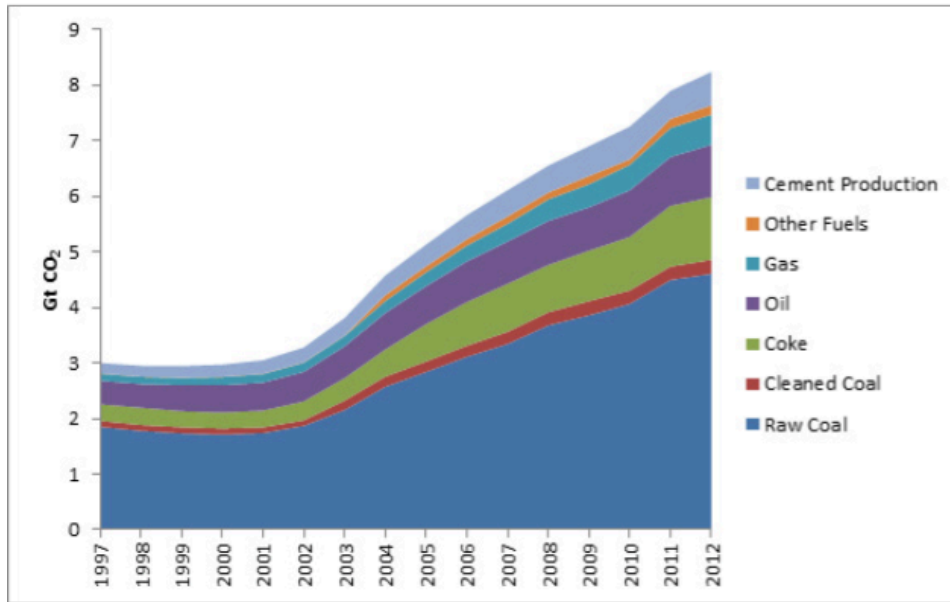


Gráfico 3 (Liu, 2015)

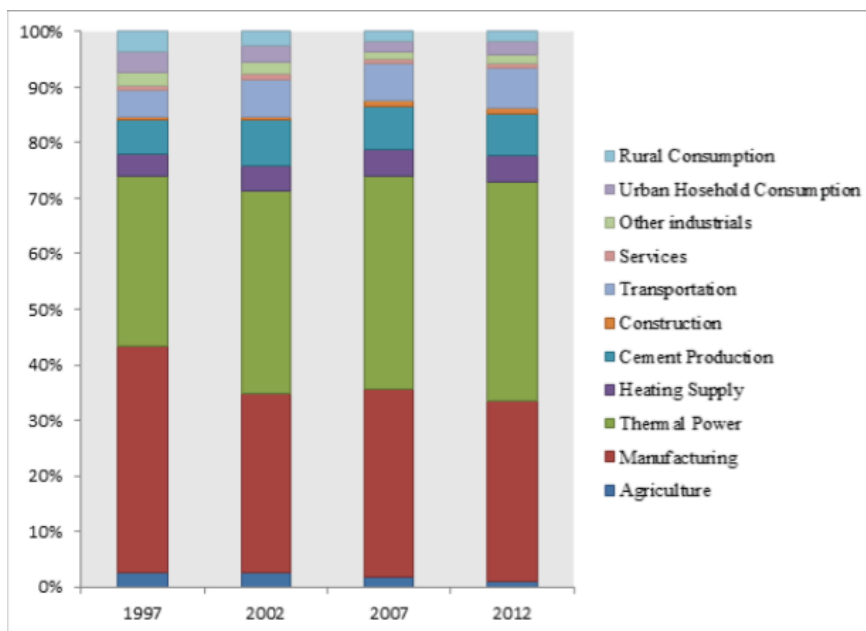


Gráfico 4 (Liu, 2015)

El problema a resolver es evidente: es necesario usar una fuente de energía que produzca menos emisiones y que pueda suplir la demanda de energía. Las razones por las cuales la fusión nuclear es una opción atractiva pueden debatirse frente a las ya establecidas fuentes alternativas

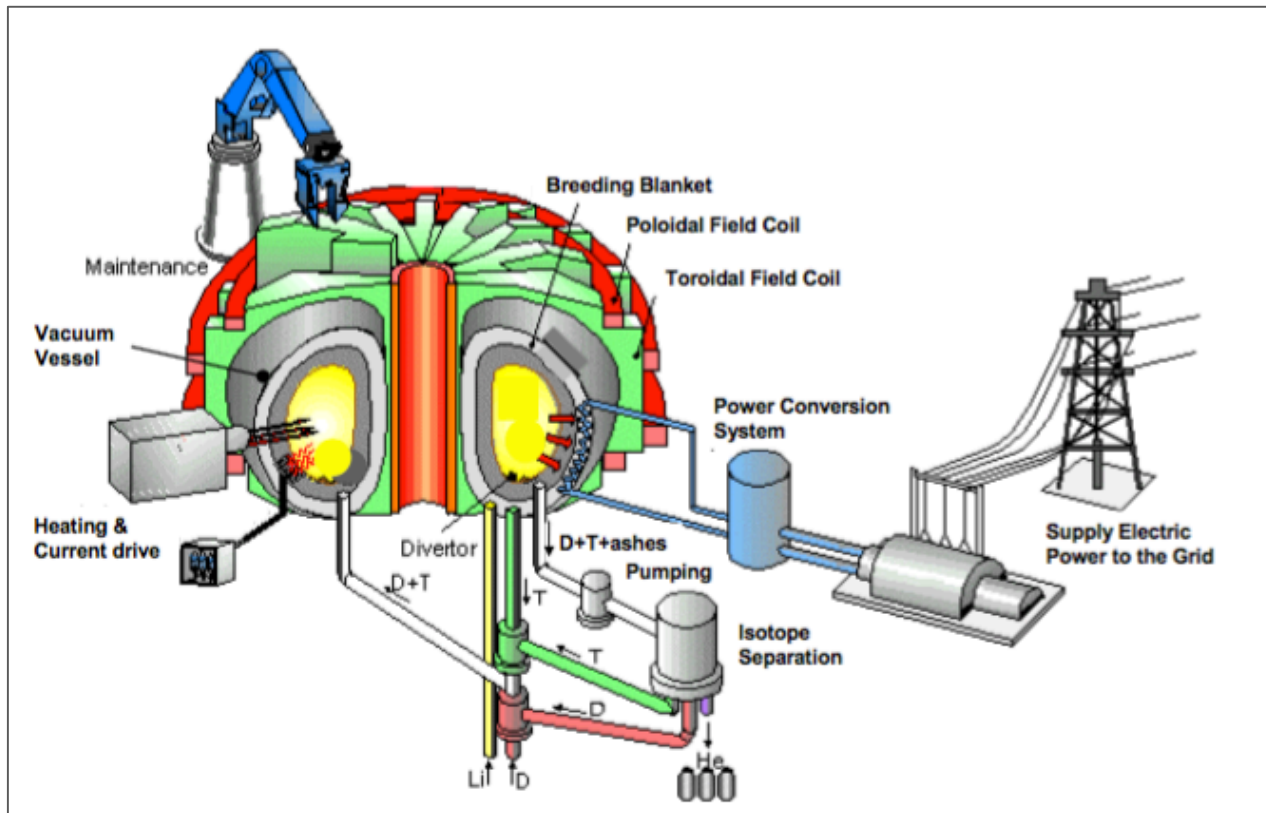


de energía, sin embargo, las inversiones realizadas en desarrollo e investigación no dejan lugar a dudas sobre la importancia de esta potencial forma de generación energética. Quizás el factor más llamativo sea la eficiencia que esta puede lograr, estimando que por ejemplo, un gramo de deuterio, el combustible de fusión por excelencia, lograría generar la misma electricidad que diez toneladas de carbono (Stang, 2015).

### **Generalidades de la fusión**

El término fusión nuclear es usado para describir la reacción desencadenada en las estrellas, donde a gran temperatura y gravedad, el núcleo de hidrógeno de estos cuerpos celestes colisiona, fusionándose a nivel atómico en formas de hidrógeno más pesado y generando enormes cantidades de energía (ITER, 2016). Este fenómeno se puede producir de manera artificial y a una escala muy inferior mediante el uso de espacios sellados al vacío, hidrógeno pesado en forma gaseosa y bobinas magnéticas, todos ellos combinados en un modelo de planta llamado Tokamak. Cuando el hidrógeno es calentado hasta el estado de plasma sus átomos pueden ser fusionados y liberar energía, esta energía es absorbida por las paredes del reactor, se convierte en calor y vapor, lo cual moverá turbinas y generadores que producirán electricidad. Dos elementos caracterizan a estos modelos de reactores: el desviador y la manta (Maisonnier, y otros, 2005).

El desviador es el artefacto que se encarga de sacar los residuos de una reacción nuclear, en este caso el residuo es simplemente helio. La manta es el dispositivo que ralentiza los átomos producto de la reacción y usa ese calor para convertir átomos de litio en tritio, el combustible intermedio. Estas tecnologías están condensadas en cuatro modelos de plantas resultantes del Estudio Conceptual Europeo de Plantas de Poder, PPCS por sus siglas en inglés. Se puede observar un diagrama general de estos diseños en el gráfico 5.



**Gráfico 5. Diagrama esquemático de una planta de poder tokamak. (Maisonnier, y otros, 2005)**

### Las ventajas de la fusión nuclear

Como se mencionó anteriormente, el combustible que se necesita para realizar un proceso de fusión es el deuterio, un isótopo también conocido como hidrógeno pesado, pues a diferencia de los demás isótopos (por ejemplo el protio), el deuterio tiene un protón además de un neutrón. Su naturaleza lo vuelve un isótopo extremadamente abundante, pues puede ser sustraído de cualquier tipo de agua. De hecho, se calcula que contando con las reservas de agua terrestres podría alimentarse un reactor de fusión durante mil años. Si además se tomaran en cuenta los océanos podría hablarse de millones de años. Evidentemente este es un panorama muy distinto al de los combustibles fósiles, cuyas reservas conocidas no podrían superar de ninguna manera el tiempo de funcionamiento proporcionado por el deuterio (ITER, 2016). Además, los residuos

resultantes de este proceso no tendrían que ser tratados como los residuos de reacciones de fisión que usan isótopos como plutonio o uranio; los desechos de fusión pueden ser usados nuevamente para producir energía en un período inferior a cien años. En cuanto a las emisiones secundarias, un reactor de fusión produce únicamente helio, un gas inerte y no tóxico.

Por otro lado, si se habla de estabilidad en cuanto a la reacción como tal, un evento similar a la catástrofe de Fukushima no sería posible, pues en caso de un mal funcionamiento el plasma usado en el proceso se enfriaría en cuestión de segundos, deteniendo la reacción instantáneamente y evitando un efecto de cadena. Esto deriva en la imposibilidad de usar la fusión como arma de destrucción masiva, lo cual sí sucede con el proceso de fisión.

Finalmente, quizás la ventaja más grande que presenta la fusión nuclear es la cantidad de energía que es capaz de producir. Según estudios realizados por la organización detrás del proyecto ITER, los átomos en proceso de fusión pueden liberar cuatro millones de veces la energía que se obtiene de procesos de quema de carbono, petróleo o gas y cuatro veces más que un proceso de fisión, si se toman masas iguales en todos ellos (ITER, 2016).

### **Viabilidad**

Ahora bien, además de considerar las ventajas de contar con plantas de fusión nuclear es preciso tomar en cuenta otros aspectos de vital importancia dentro de un posible futuro en el cual se busque energía casi ilimitada y limpia. En primera instancia se debe tomar en cuenta el costo de la energía, tanto de la instalación como del funcionamiento, pues esto determinaría en gran medida el precio al cual se podría acceder a energía de fusión. Por otro lado es esencial tomar en cuenta los precios y competitividad de otras formas de energía que serían directamente rivales comerciales de los modelos PPCS. Además, está el posible impacto que pueda tener una externalidad causada por las altas emisiones de CO<sub>2</sub> sobre las economías globales. Todos estos

aspectos deben ser analizados de manera cuidadosa y práctica para poder responder una interrogante clave: ¿serán competitivas las plantas de fusión nuclear dentro de las siguientes décadas? ¿Bajo qué condiciones?

Así, antes de continuar con el análisis propuesto, es preciso mencionar y ver de cerca estudios realizados anteriormente con respecto al mismo tema y tópicos relacionados, pues tal información constituye la base para poder construir un argumento sustentable respecto al problema.

### **Revisión de literatura**

Los estudios científicos enfocados en el uso de nuevas formas de energía, particularmente sobre reactores de fusión nuclear, han ganado mucha fuerza en los últimos 30 años. Dada la naturaleza investigativa del diseño de esta tecnología, las necesidades de inversión en desarrollo son masivas. Grunwald *et al* analizan en su trabajo del 2002 Thermonuclear Fusion Summary las grandes inversiones hechas por países miembros de la Unión Europea, sumando cifras de 10 billones para finales del siglo 20. Países como Alemania ven en la fusión nuclear un proyecto rentable al cual siguen inyectando capital de manera continua, llegando a cifras de 150 millones en el año 2000 y estimando una inversión de 60-80 billones de dólares durante los siguientes 50 años. El uso de reactores de fusión comerciales se estima para mediados del siglo 21 (Grunwald, Grünwald, Oertel, & Paschen, 2002).

Adicionalmente, nuevos modelos de reactores son propuestos de manera continua y estudios de ciencia aplicada respecto a su factibilidad técnica abundan en los medios académicos, pero los estudios de índole económico respecto a su integración al mercado energético son menos comunes. Sin embargo, existen análisis relacionados al tema que aportan importantes perspectivas respecto a diversos aspectos relevantes, como el comportamiento de las firmas con

relación a energías alternativas, los efectos de políticas de comando y control, la relación entre eficiencia y uso de energías renovables, entre otros. Es posible tomar elementos de estos trabajos para comprender mejor las implicaciones del problema y construir un argumento consistente respecto a la factibilidad económica de reactores de fusión nuclear.

Una posible incorporación de energía de fusión al mercado energético requeriría, en teoría, de la intervención activa de los sectores productivos en lo que constituiría una transformación industrial comparable a la revolución industrial en términos de eficiencia energética. En 2003, Finon *et al* realizaron un estudio examinando la elección de políticas para promover el desarrollo de energías renovables. La razón para hacer este estudio, parafraseando a los autores, es el inminente riesgo del calentamiento global, el cual ha sido reconocido por la Unión Europea, quien a su vez ha expresado su interés en perseguir ambiciosas metas para poder producir energía eléctrica que provenga de fuentes renovables (Menanteau, Finon, & Lamy, 2003). Por parte de las autoridades, este trabajo de investigación muestra que el objetivo es bastante claro: estimular el progreso técnico y acelerar el proceso de aprendizaje hasta el punto en el que las energías renovables puedan competir con formas de energía más tradicionales. Por supuesto, para ello es necesario internalizar el costo ambiental de tales procesos de producción. Aún más importante, los investigadores encuentran que el uso de instrumentos de regulación, como bonos de carbono, debido a la poca experiencia en este campo, presentan un problema de incertidumbre en cuanto a crear un marco de producción e inversión que pueda considerarse rentable para los inversionistas. Esto apunta a una solución mucho más estable al largo plazo, un nuevo tipo de energía, más barata, más limpia, que podría reducir de manera sustancial las emisiones de gases invernadero y al mismo tiempo, ser atractivo para las firmas en términos financieros.

El punto anterior puede concluirse no solamente de manera inductiva sino también de forma empírica. A finales de 2015, Harrison *et al* realizaron una investigación sobre el comportamiento de firmas en cuanto a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y la implementación de medidas de disminución de impacto ambiental. Mediante métodos econométricos, comparan los resultados de medidas de comando y control frente a cambios de precios, consumo de carbón y crecimiento en niveles de productividad. Las estadísticas muestran inmediatamente una importante relación directa entre menor consumo de carbón y niveles de contaminación más bajos (Harrison, Hyman, Martin, & Nataral, 2015) .Por otro lado, aumentos en el precio del carbono también tienen un efecto positivo en la reducción de emisiones, mucho más que medidas de comando y control. Esto sugiere una relación directa entre el comportamiento del mercado y el de las firmas, pues las medidas gubernamentales basadas en el mero principio de autoridad tardan en surtir algún efecto sobre los esfuerzos por reducir emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que una reducción en el margen de ganancia debido a carbón más caro crea una búsqueda de energías alternativas y aumento en la productividad de forma inmediata. Tales resultados muestran de forma consistente que los grandes productores persiguen la rentabilidad.

Respecto a la eficiencia de las energías renovables y su efecto en las economías, Chien & Hu realizaron un estudio en 2007 valiéndose de Análisis Envolvente de Datos (DEA), usando datos de trabajo, stock de capital y consumo de energía como sus variables explicativas, y el PIB real como variable explicada (Chien & Hu, 2007).El análisis muestra una relación positiva entre la eficiencia técnica de una economía y el uso de energías alternativas. Además, los países miembros de la Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OECD) muestran un mayor grado de eficiencia técnica frente a países no miembros, al contar con más formas de energía geotermal, solar, hídrica, eólica y de combustibles alternativos.

Adicionalmente, si se mira a los costos de manera más directa, Sims, Rogner y Gregory condujeron un estudio en el cual comparan los costos de generación de energía de las tecnologías tradicionales versus los costos de producción que tendrían nuevas energías disponibles dentro de las siguientes décadas. Así, tomaron la generación de energía proveniente del carbón pulverizado en plantas de poder como la base del estudio (Sims, Rogner, & Gregory, 2002). Surge la pregunta: ¿Qué sucedería si se cambia el tipo de combustibles en un futuro? De manera general, concluyen que la industria eléctrica global puede reducir sus emisiones de carbón a la atmósfera en un 15 por ciento para el año 2020, junto con beneficios y ahorro en costos en comparación a la estructura energética actual. Se encontró además, que la mayoría de energías alternativas renovables consideradas en el estudio tienen el potencial de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y ser rentables al mismo tiempo, con la excepción de energía solar y la captura de residuos de carbono.

Entonces surge la incógnita. Si se realiza un análisis de toma de decisión bajo incertidumbre de las plantas de fusión proyectadas para mediados de este siglo versus tecnologías de generación de energía ya existentes: ¿cuál será el resultado, qué factores deberán tomarse en cuenta y cómo se los puede incluir dentro de un análisis comparativo? Los aportes hechos por los autores citados, por poner algunos ejemplos, resultarán muy útiles para resolver tales preguntas.

### **Metodología**

Para establecer un modelo de toma de decisiones bajo incertidumbre primero se deben considerar las generalidades que afectarán de manera directa su funcionamiento (Gilboa, 2008). En primer lugar, es necesario comparar la fusión con otra forma de generación de energía que utilice tecnología ya existente. Así, se establecerán dos escenarios: uno en el cual el agente

representativo elige apoyar la fusión nuclear y otro en el cual decide usar plantas de carbón. Por agente representativo puede hablarse de China o de Estados Unidos. Dado que son los grandes contaminadores, sus casos son de particular interés.

### **Variables**

La variable más inmediata son los costos de instalación y el beneficio que se espera obtener hasta determinado momento. Los costos de ambos casos, tanto del escenario de fusión (desde ahora referido como F) y de plantas de carbón (desde ahora referidos como G) están disponibles dentro de la literatura citada.

Se definen las siguientes variables a continuación:

VPF = valor presente neto en escenario F

VPG = valor presente neto en escenario G

GF = costo “overnight” de construir planta de fusión (Bustreo, 2013)

GG = costo “overnight” de construir planta carbón

El término overnight se refiere al valor de construir en un solo día, ignorando los posibles costos que surgirían a través del tiempo, como por ejemplo, una subestimación del dinero necesario o una tasa de interés en caso de que el dinero venga de un préstamo.

Para el caso del escenario F, se debe además contar con los costos de investigación y desarrollo, que se denominarán IR. Adicionalmente, se espera una probable extinción masiva en los ecosistemas marinos debido a la gran acumulación de CO<sub>2</sub> en el ambiente (Veron, 2008), esto presentará una pérdida en los pagos de ambos escenarios, se identificará este costo como simplemente C. Por otro lado, la probabilidad de que esto suceda es diferente en cada escenario.

$\alpha$  = probabilidad de extinción en escenario F

$\beta$  = probabilidad de extinción en escenario G



Dado que las emisiones de CO2 bajarían en gran medida con un cambio de matriz energética de combustibles a una de fusión, es evidente que la probabilidad de extinción oceánica masiva es inferior en F que en G. Entonces  $\alpha < \beta$ . Además, la posibilidad de que las plantas de fusión nuclear funcionen dentro de un período dado no son del 100%, pues se ha retrasado el proyecto en ocasiones anteriores, más aún, existe la posibilidad de que la investigación y desarrollo no logren dar como resultado una planta comercial de uso industrial, por lo que se asume una probabilidad de tener fusión  $\gamma$ , donde  $\gamma < 1$ .

Finalmente se establece que los beneficios netos de ambos escenarios serán  $\Pi F$  y  $\Pi G$  respectivamente. Así, se tendrían las ecuaciones:

$$\Pi F = \gamma(VPF - IR - GF - \alpha C) + (1 - \gamma)(-IR - \beta C)$$

$$\Pi G = VPG - GG - \beta C$$

El cometido de esta investigación es encontrar las condiciones probabilistas bajo las cuales un agente representativo preferiría invertir en fusión en lugar de tecnologías ya existentes, gamma es el coeficiente a encontrar. El álgebra implícita es:

$$\Pi F > \Pi G$$

### Ecuación 1

$$\gamma (VPF - IR - GF - \alpha C) + (1 - \gamma) (-IR - \beta C) > VPG - GG - \beta C$$

$$\gamma VPF - \gamma IR - \gamma GF - \gamma \alpha C - IR - \beta C + \gamma IR + \gamma \beta C > VPG - GG - \beta C$$

Mediante factor común, obtenemos:

$$\gamma VPF - \gamma IR - \gamma GF - \gamma \alpha C + \gamma IR + \gamma \beta C - IR - \beta C > VPG - GG - \beta C$$

$$\gamma (VPF - IR - GF - \alpha C + IR + \beta C) > VPG - GG - \beta C + IR + \beta C$$

### Ecuación 2

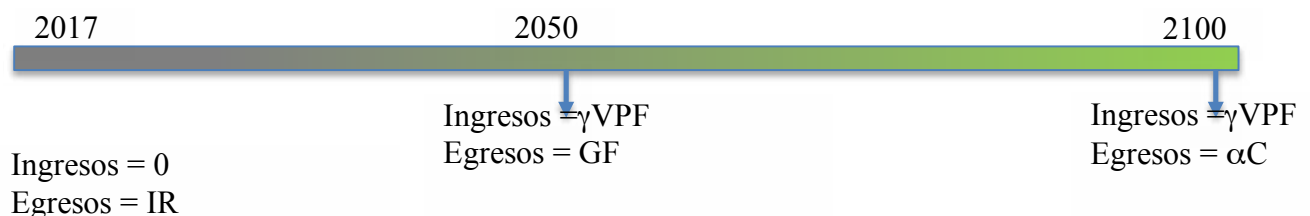
$$\gamma > \frac{VPG - GG - \beta C + IR + \beta C}{(VPF - IR - GF - \alpha C + IR + \beta C)}$$

Posteriormente, se presentarán estimaciones determinísticas para VPF que incluyen IR y GF, que son gastos de investigación y desarrollo y gastos de construcción *overnight* (Bednyagin, 2010). Por lo que estas variables son absorbidas por VPF en la primera parte del denominador, dejando los costos de investigación por sí solos en caso de que no se pueda concretar un modelo industrial, así la ecuación terminaría de la siguiente manera:

### Ecuación 3

$$\gamma > \frac{VPG - GG + IR}{(VPF - \alpha C + IR + \beta C)}$$

Ahora bien, se debe aclarar que existen dos diferencias más, además de las evidentes, entre ambos escenarios. La primera es el año en el cual el agente representativo empezaría a percibir ingresos. Para el caso de F, sería en el año 2050, según las estimaciones hechas por autoridades especializadas en estas tecnologías (Bustreo, 2013). En el caso de G, los ingresos serían inmediatos, pues no se trata de tecnologías que deban probarse, están desarrolladas y optimizadas, no existiría un período de investigación y desarrollo. Así, la línea temporal de acontecimientos generales para cada escenario se vería de la siguiente manera:



**Gráfico 6. Línea Temporal Escenario F**



- A mayor beta, gamma descende, esto implica que mientras mayor sea la probabilidad de extinción al usar plantas contaminantes, la probabilidad requerida de funcionamiento de fusión baja.
- A mayor alfa, el denominador decrece, por lo que gamma sube. Esto implica que si la probabilidad de extinción masiva aún con plantas de fusión nuclear es alta, la probabilidad requerida de funcionamiento de fusión sube.

### **Valor Presente Neto Estimado para una planta de Fusión**

La estimación del valor presente neto para una inversión en plantas de fusión nuclear supone un reto en términos técnicos, pues la información que usualmente sería usada para hacer predicciones no está disponible de manera histórica. En lugar de ello, se conocen los costos de capital, los costos operativos variables y fijos y las características que ciertos modelos propuestos por el proyecto ITER tendrán. Con estos datos (Maisonnier, y otros, 2005) se han elaborado estimaciones bajo una serie de supuestos razonables para las diferentes variables (Bednyagin, 2010). En su estudio, Bednyagin propone tres tipos de acercamientos al hacer una estimación del VPN de una planta de fusión:

- Enfoque determinístico
- Enfoque probabilístico
- Enfoque de opciones reales

Dado que las ecuaciones mostradas anteriormente ya incluyen la variable gamma para asignar una probabilidad de funcionamiento exitoso en el proyecto nuclear, y puesto que las decisiones administrativas (parte principal de un enfoque de opciones reales) son en sí el cometido de un modelo de decisión bajo incertidumbre, es pertinente usar los VPNs obtenidos en

el enfoque determinístico. Existen tres factores principales que son tomados en cuenta para la estimación determinística:

1. Los costos que incluye la investigación, la construcción, la operación y el mantenimiento de una planta.
2. Los ingresos y utilidad que se espera obtener de su funcionamiento.
3. El marco temporal y la tasa de descuento.

Los costos de construcción, operación y mantenimiento tanto fijos como variables son:

	Capital (Overnight) Millones \$/KW	Costos Fijos (Millones \$/GW)	Costos Variables (Millones \$/PJ)
Planta básica	3940 (temprana)	65.8	2.16
	2950 (madura)	65.8	1.64
Planta Avanzada	2820 (temprana)	65.3	2.14
	2170 (madura)	65.3	1.64

**Tabla 1. Costos Estimados de Plantas de Fusión Nuclear (Maisonnier, y otros, 2005)**

Las explicaciones de las unidades son las siguientes;

- Millones de dólares /KW: la cantidad de dinero para lograr determinada cantidad de energía en kilowatts.
- Millones de dólares /GW: la cantidad de dinero para lograr determinada cantidad de energía en giga watts.
- Millones de dólares /PJ: la cantidad de dinero en función del personal requerido para el funcionamiento de la planta.
- Millones de dólares /MWh: la cantidad de dinero para lograr determinada cantidad de energía en mega watts por hora.

Las diferentes unidades, por ejemplo, de Kilo watts a Giga Watts se dan por la gran diferencia de gasto. De manera que por facilidad visual, se transforma los KW a GW de la primera a segunda columna. Para mayor referencia, un Kilo watt tiene 0.000001 GW. Las

estimaciones presentadas por el EFDA incluyen una reducción en el costo de construcción con el paso del tiempo en cuanto varios procesos serán optimizados (Bustreo, 2013).

Por otro lado, respecto a los costos promedio de investigación y desarrollo, que en el modelo se han denominado IR, son presentados en tres diferentes escenarios, cada uno con un monto de inversión promedio diferente para cada caso en millones de dólares:

Costos	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Costo Específico de Capital (millones \$/MW)	4,37	3,4	2,4
Inversión Anual por planta (millones \$)	382,62	295	207
Costos Anuales de Investigación (millones \$/MW)	0,16	0,13	0,12
Coste de Capital (millones \$/MWh)	60,13	47	37,17

**Tabla 2. Costos Estimados de Investigación para Plantas de Fusión Nuclear**

Finalmente, se establecen criterios respecto a la tasa de descuento apropiada para el caso de una inversión de largo plazo. Un punto importante a tomar en cuenta es el hecho de que hasta el momento este tema es considerado un tópico de debate académico y científico. Por lo mismo, se usan varias tasas de descuento constantes para calcular el VPN en cada escenario. Sin embargo, es necesario mencionar los siguientes conceptos establecidos por Weitzman (2001) (Weitzman, 2001), mismos que dan una idea de la implicación de elegir una tasa de descuento:

- 4% para futuro inmediato (1 a 5 años)
- 3% para futuro cercano (6 a 25 años)
- 2% para futuro intermedio (26 a 75 años)
- 1% para largo plazo (76 a 300 años)

Así, los resultados para VPNs son los siguientes en mil millones de dólares:

Tasas de descuento	2%	3%	4%	5%	6%
Escenario A	-128,477	-78,982	-52,652	-37,913	-28,432
Escenario B	591,840	250,624	100,039	32,644	3,159
Escenario C	2834,939	1291,029	588,709	266,424	115,836

**Tabla 3. VPNs estimados para diferentes escenarios con varias tasas de descuento.**

Queda claro que las incertidumbres al momento de encontrar un valor presente neto son grandes, desde el costo de la electricidad de fusión hasta factores de mercado que no pueden ser predichos con certeza, más aún para un período tan largo. Así, se tiene el “mejor” escenario C y el “peor” escenario A, de manera que lo más razonable es usar los datos obtenidos con suposiciones menos extremas. Dentro del escenario B, se puede escoger alguno de estos VPNs usando los criterios dados por Weitzman. El valor más cercano a una tasa de descuento para el largo plazo es del 2%, de manera que sería apropiado usar el VPN de \$ 591,840,000,000.

### **Valor Presente Neto para una planta de carbón**

El caso de evaluación para esta tecnología resulta mucho más sencillo debido a que existen datos históricos y múltiples estudios al respecto. Para este caso, se usan las estimaciones dadas por Kumar (Kumar, Sharma, & Tewari, 2015) y se aproxima el valor presente neto para una tasa de descuento del 2%, la misma tasa usada por Bednyagin.

El valor presente da como resultado \$620,000,000, muy inferior al resultado de la planta de fusión nuclear. Sin embargo, dados los criterios de tasa de descuento proporcionados por Weitzman (Weitzman, 2001), es evidente que la tasa a usar es diferente y en cierto modo iterativa para el caso de plantas de carbón. Esto se debe a dos razones:

- La vida útil de la planta de 30 años (Bednyagin, 2010)
- La inmediatez con la que el agente representativo empieza a recibir los ingresos, en este caso hipotético, dado el enfoque de construcción *overnight*, el año 2017.

Esto supone una acotación al Gráfico 7 en cuanto a los períodos en los que se perciben ingresos en el escenario G. Matemáticamente y siendo que el agente representativo querrá seguir supliendo energía bajo el esquema G, deberá construir dos plantas más durante el siglo, tenemos:

Año	Criterio Temporal	r (%)	VPN (\$)
2017	Futuro inmediato	4	3,800,000,000
2047	Futuro medio	2	620,000,000
2077	Futuro medio	2	620,000,000

**Tabla 4. VPNs Plantas de Carbón**

Así, se suma un total de \$5,040,000,000 versus el valor presente neto de \$591,840,000,000 para una planta de fusión. Evidentemente, el valor neto para la planta de fusión sigue siendo mucho más alto, 117 veces mayor. Por lo tanto, la solución obvia al problema parecer estar a la vista, sin embargo aún se deben resolver el costo de construcción de la planta de carbón, valor de Investigación y Desarrollo Nuclear (IR) en caso de no tener éxito con modelos industriales de fusión, el costo de extinción marina, su respectiva probabilidad gamma y finalmente los valores probabilísticos alfa y beta.

#### Costos GG e IR

Retomando el modelo de decisión bajo incertidumbre se tiene:

$$\gamma > \frac{VPG - GG + IR}{(VPF - \alpha C + IR + \beta C)}$$

Mediante factor común:

#### Ecuación 4:

$$\gamma > \frac{VPG - GG + IR}{VPF + IR + C(\beta - \alpha)}$$

Tomando como base la capacidad de 210MW usados para la estimación de VPN de plantas de carbón y según la información dada por la EFDA (Bustreo, 2013) GG llega a tener un valor de \$ 294,000,000. Por otro lado, tomando el escenario B dado por Bednyagin, IR representa \$295,000,000 por año. Al ser un período entre 2017 y 2050 suma un total de \$9,735,000,000.



Con todas las cifras en millones:

$$\gamma > \frac{5,040 - 294 + 9,735}{591,840 + 9,735 + C(\beta - \alpha)}$$

Resolviendo los valores dados:

**Ecuación 5:**

$$\gamma > \frac{14,481}{601,575 + C(\beta - \alpha)}$$

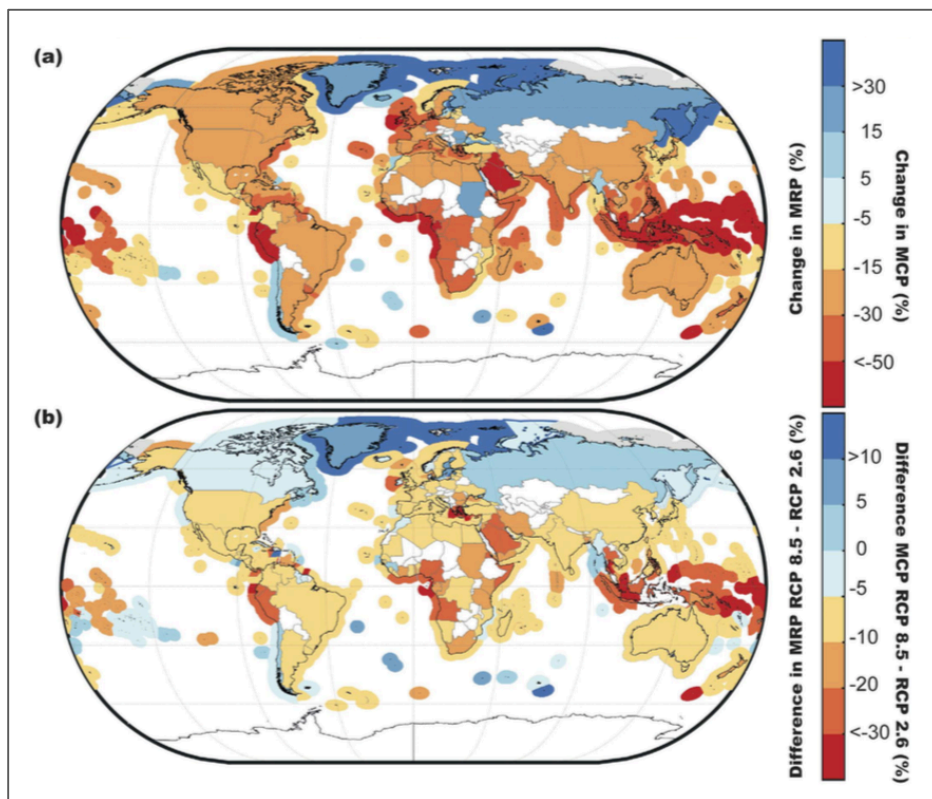
**Costo C (Extinción Masiva)**

El costo de una probable extinción masiva puede estimarse en función del país que se tome como agente representativo. Debido al papel de Estados Unidos dentro del proyecto ITER y a su lugar como el segundo gran contaminador a nivel global, su caso resulta útil para estimar C.

En primer lugar, es necesario establecer que el agente representativo es el estado federal, al ser el inversionista que ha aportado con los costos de investigación y desarrollo, y dada la masiva necesidad de financiamiento para la construcción de una planta a futuro, es evidente que en caso de existir una implementación de plantas Tokamak, esta sería llevada a cabo por el estado.

En segundo lugar, se plantea un método de identificación de C. Una extinción masiva influiría directamente en el ratio de capturas máximas de las grandes pesqueras, tomando en cuenta que tales corporaciones pagan un 35% de impuestos federales sobre sus ingresos (I.R.S., 2015), esta pérdida afectaría de inmediato a los ingresos tributarios del estado. Esta conexión directa establece un nexo entre pérdidas pesqueras y agente representativo dentro del modelo.

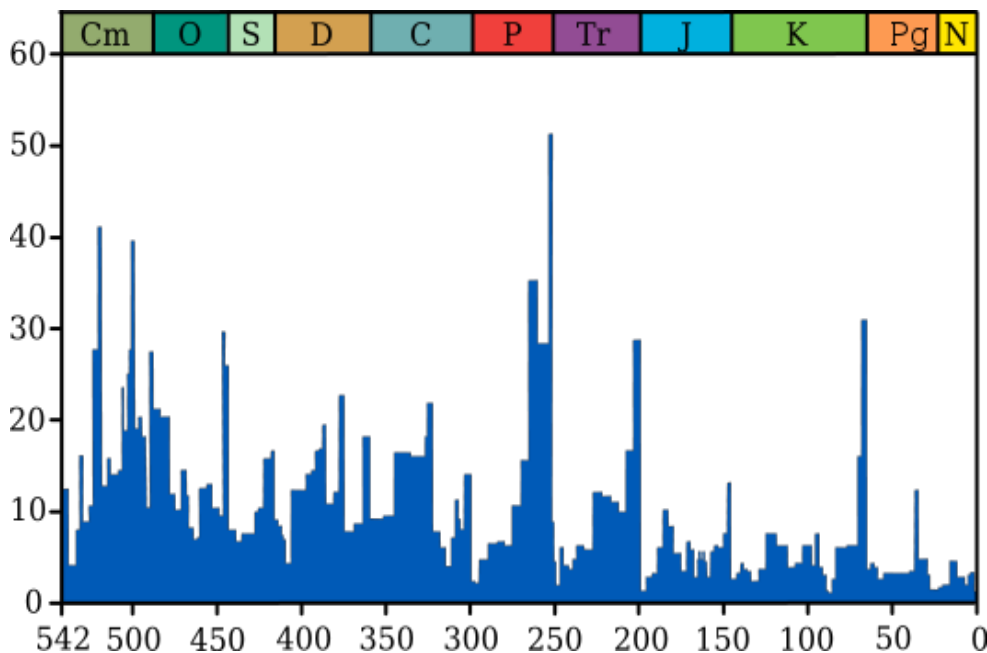
Por otro lado, la estimación de ingresos en un futuro lejano juega un rol importante en la determinación de C. Un primer cambio importante es la afluencia de fauna marina en diferentes zonas del planeta (Lam, Cheung, Reygondeau, & Sumaila, 2016). Para Estados Unidos, se espera una disminución del ratio de ingresos máximos del 15%. Hay que recalcar que esta disminución se debe simplemente a la migración de especies marinas debido al cambio climático.



**Gráfico 8. Projected change in global fisheries revenues under climate change. (Lam, Cheung, Reygondeau, & Sumaila, 2016)**

Usando datos históricos del Departamento de Comercio de Estados Unidos sobre los ingresos y utilidades de la industria pesquera se ha proyectado que en el año 2100 se tendrán ingresos de 1,2 billones de dólares (U.S.D.C., 2016). Esta proyección, junto con la proyección de utilidades hechas por Lam coinciden entre sí. El ratio de crecimiento bajo en ingresos y utilidades se explica por una compensación entre una baja en la cantidad de capturas proyectada y la subida de precios (Lam, Cheung, Reygondeau, & Sumaila, 2016).

Posteriormente, el trabajo de diferentes biólogos estima una pérdida de fauna marina del 35%, similar al evento K/T, esto se debe a los PPMs de CO<sub>2</sub> similares en la época del cretáceo tercero (Prothero, 1994). La extinción en el cretáceo se dio debido a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, producida por eventos volcánicos masivos, mismos que dieron inicio a un proceso de anoxia, o falta de oxígeno en las células, que exterminó la vida tanto terrestre como marina (Raup & Sepkoski, 1982). Si bien esta extinción se dio en miles de años, debido al crecimiento de PPMs de CO<sub>2</sub> en la actualidad, el cual no tiene precedentes, se puede esperar un evento similar de forma abrupta. En el siguiente gráfico pueden verse las diferentes extinciones masivas que han ocurrido a lo largo de la historia del planeta. El eje y representa el porcentaje de extinción marino, el eje x representa la línea temporal.



**Gráfico 9. Extinction Intensity. (New World Encyclopedia, 2014)**

Una vez se han realizado los cálculos con los datos presentados anteriormente, los resultados de pérdida C se resumen en:

	Escenario Sin Calentamiento Global	Escenario Con Calentamiento Global
Ingresos 2100	\$1.200.000.000.000,00	\$600.000.000.000,00
Impuestos 2100	\$420.000.000.000,00	\$105.000.000.000,00
VPN Impuestos	\$411.764.705.882,35	\$102.941.176.470,59
Pérdida Tributaria	\$308.823.529.411,77	

**Tabla 5. Estimación de variable C**

### Probabilidades alfa, beta y gamma sin incertidumbre

Los términos probabilísticos son una parte importante de este trabajo, pues influyen en las diferentes decisiones que podría tomar un agente inversor. Respecto a la probabilidad de extinción en F y G ( $\alpha$  y  $\beta$ ) respectivamente, bajo un enfoque simplista, basta como analizar los datos dados en la conferencia de París para el Cambio Climático del año 2015. En la misma se presentaron posibles escenarios en función del nivel de compromiso hecho por los países miembros, entre los cuales se encuentran China y Estados Unidos. Los escenarios se resumen en:

<b>2100 Values</b>			
<b>Temp. Increase Over Preindustrial (90% C.I.)</b>		<b>Atmospheric CO<sub>2</sub></b>	<b>Atmospheric CO<sub>2</sub>e</b>
<b>4.5°C</b> 8.1°F	(2.6°C-5.8°C) (4.7°F-10.5°F)	910 ppm	1250 ppm
<b>3.5°C</b> 6.3°F	(2°C-4.6°C) (3.7°F-8.3°F)	695 ppm	880 ppm
<b>3.2°C</b> 5.7°F	(1.8°C-4.2°C) (3.3°F-7.6°F)	635 ppm	775 ppm
<b>3°C</b> 5.4°F	(1.7°C-3.9°C) (3.1°F-7.1°F)	615 ppm	720 ppm
<b>2.7°C</b> 4.8°F	(1.5°C-3.5°C) (2.7°F-6.4°F)	565 ppm	630 ppm
<b>1.8°C</b> 3.2°F	(1°C-2.5°C) (1.7°F-4.4°F)	455 ppm	460 ppm
<b>1.5°C</b> 2.7°F	(0.8°C-2.1°C) (1.4°F-3.7°F)	425 ppm	415 ppm

**Tabla 6. Escenarios Conferencia de París (Climate Interactive, 2016)**

Para poder estimar de manera simple el valor de beta, basta con mirar las partes por millón (ppm) de CO2 estimadas para el año 2100 bajo un esquema Business as Usual, similar al escenario G propuesto en este documento. El nivel de ppm de CO2 excede de manera considerable el umbral de 800 ppm propuesto por Veron para que ocurra una extinción masiva. Si bien el momento en el cual la extinción masiva entre en su etapa de *commitment* es incierto, es evidente que con 910 ppm de CO2, tal evento catastrófico será una realidad. Dados los argumentos de no adaptabilidad evolutiva propuestos por Veron, es de esperarse que suceda de manera más bien repentina. Por este motivo, resulta adecuado hacer a la variable probabilística beta unitaria, es decir, si no se cambia la forma de producir energía, la extinción masiva será una realidad.

Por otro lado, dado que los escenarios propuestos, en especial el de *Ratchet Success*, incluye una reducción de CO2 por parte de los mismos países que forman el proyecto ITER para fusión nuclear, llegando a un total de 455 ppm de CO2, la probabilidad de que ocurra una extinción masiva gracias a la exitosa producción industrial de plantas de fusión es evidentemente cero, pues el nivel de dióxido de carbono atmosférico no se encuentra ni remotamente cerca del umbral de Veron. Por lo tanto, es coherente, aunque simplista modificar el modelo propuesto en este documento mediante igualar el coeficiente probabilístico alfa a cero.

En resumen:  $\alpha = 0$  ;  $\beta = 1$

Así:

$$\gamma = \frac{14,481}{601,575 + 308,823}$$

El resultado preliminar es, que incluso con un acercamiento carente de incertidumbre, el coeficiente gamma mínimo para que un agente representativo decida invertir en fusión debe ser superior a 1,59%.

### Probabilidades alfa, beta y gamma con incertidumbre

Para calcular las probabilidades bajo incertidumbre, se asignaron 10,000 valores posibles para beta, es decir, valores comprendidos entre 0 y 1. Dado que alfa será siempre menor a beta, se generaron 10,000 números aleatorios que cumplan con tal condición. Una vez producidos estos datos, se introdujeron en la ecuación:

#### Ecuación 6:

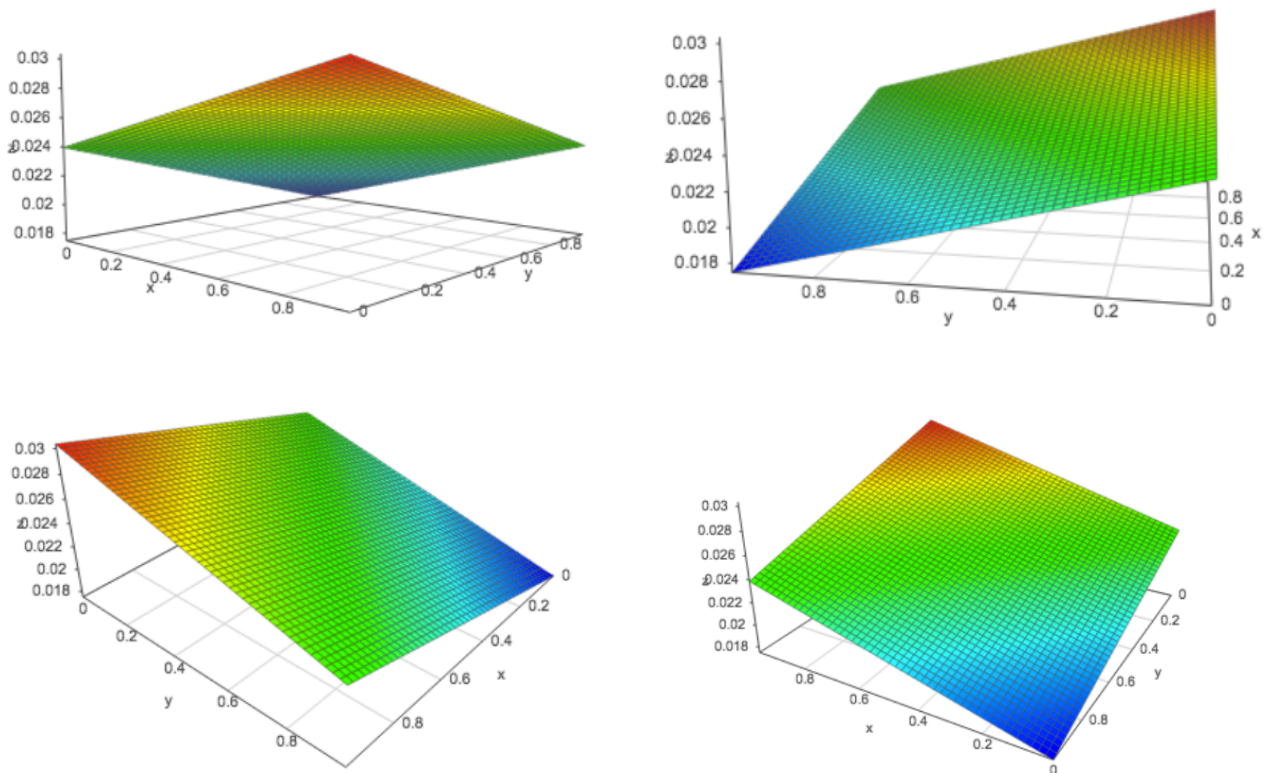
$$\gamma = \frac{14,481}{601,575 + 308,823(\beta - \alpha)}$$

De esta manera se obtuvieron 10,000 valores posibles para gamma. Posteriormente, con los valores de las tres incógnitas, se hizo una regresión en StatPlus, mostrando los siguientes resultados.

Regresión Lineal Múltiple							
<b>Estadísticos de Regresión</b>							
R	0,99498						
R Cuadrado	0,98998						
R Cuadrado Ajustado	0,98997						
S	0,0002						
N	10000						
<b>Gamma = 0,02383 + 0,00885 * Alfa - 0,00902 * Beta</b>							
<b>ANOVA</b>							
	d.f.	SS	MS	F	nivel p		
Regresión	2,	0,03982	0,01991	493.659,06604	0,		
Residuo	9.997,	0,0004	4,03329E-8				
Total	9.999,	0,04022					
	Coeficientes	Error Estándar	LCL	UCL	Estadístico t	nivel p	H0 (5%)
<b>Intercepto</b>	0,02383	4,01698E-6	0,02382	0,02384	5.932,5605	0,	rechazado
<b>Alfa</b>	0,00885	0,00001	0,00883	0,00888	742,29445	0,	rechazado
<b>Beta</b>	-0,00902	9,16239E-6	-0,00904	-0,009	-984,59237	0,	rechazado
T (5%)	1,9602						

### Tabla 7. Regresión de Gamma, Alfa y Beta.

Como se puede observar, el coeficiente de R cuadrado es muy alto, mientras el nivel p asociado es cercano a cero, por lo que todas las variables son estadísticamente significativas, al igual que la ecuación. Posteriormente, se realiza un gráfico en tres dimensiones que explique cómo se relacionan estas variables, sus máximos y mínimos en diferentes rangos:



### Gráfico 10. Comportamiento de Gamma, Alfa y Beta

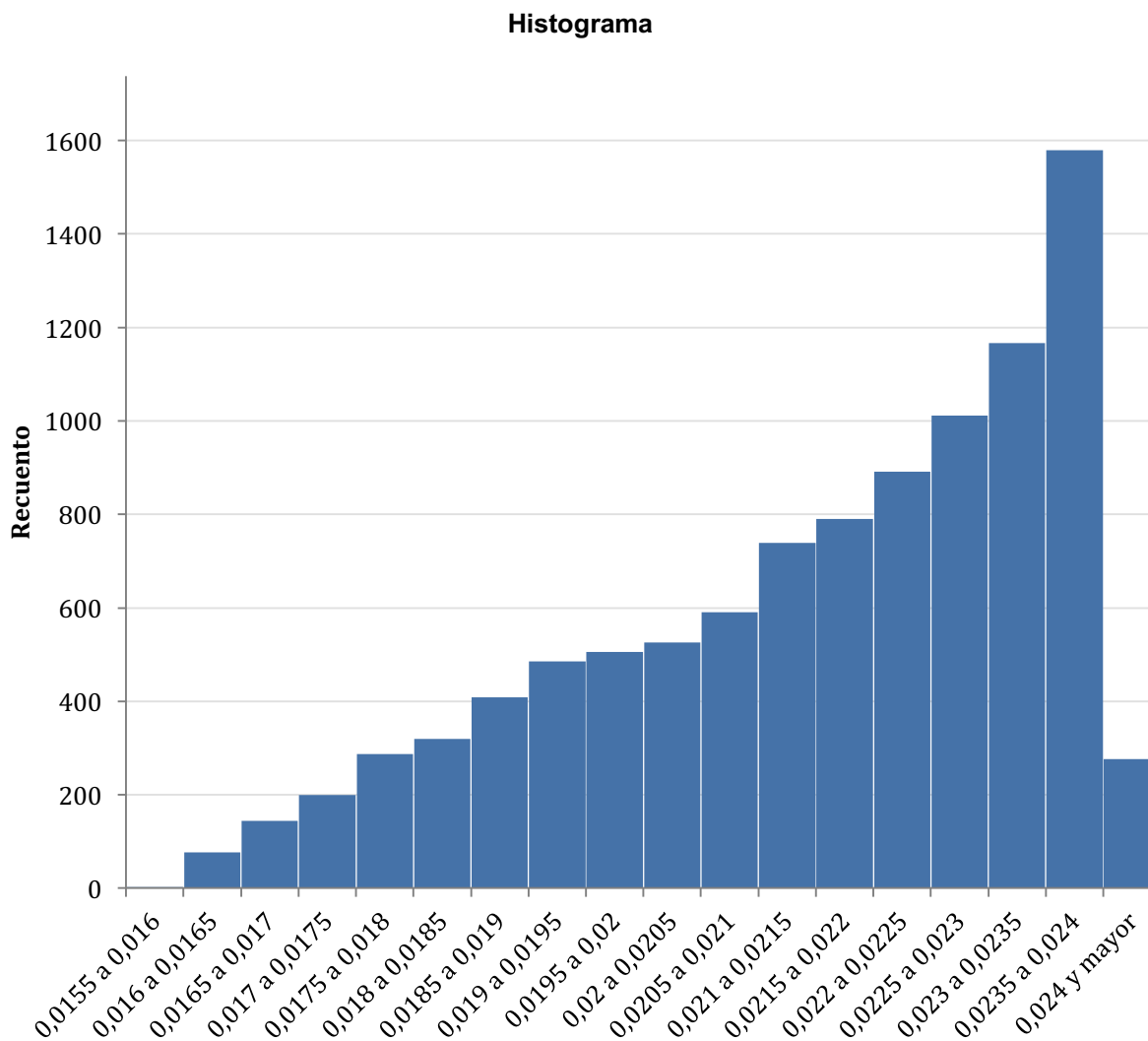
En el gráfico 11 el eje x corresponde a alfa, y a beta y z a gamma. Se puede observar que al aumentar alfa el valor de gamma sube, mientras por el contrario, al aumentar beta el valor de gamma baja. Tal comportamiento es lógico, pues si la probabilidad de extinción con función sube, el requerimiento probabilístico mínimo de funcionamiento es más alto, los inversionistas necesitan mayor seguridad de que el proyecto va a funcionar. Asimismo, si la probabilidad de

extinción por no usar fusión es alta, los inversionistas son menos exigentes respecto a las probabilidades mínimas de funcionamiento del proyecto nuclear.

Respecto a la ecuación que describe el movimiento de las variables:

$$\gamma = 0,02383 + 0,00885 \alpha - 0,00902 \beta$$

El intersepto está en 2,38%, un cambio en alfa o beta no supera una diferencia positiva y negativa respectivamente de 0,090 puntos. Los multiplicadores de alfa y beta son relativamente cercanos. El recuento de gamma muestra la siguiente distribución:



**Gráfico 11. Distribución Gamma**



<i>Distribución de frecuencia de Gamma</i>				
<i>Gamma</i>	<i>Recuento</i>	<i>Recuento acumulativo</i>	<i>Porcentaje</i>	<i>Porcentaje acumulativo</i>
0,0155 a 0,016	2,	2,	0,0002	0,0002
0,016 a 0,0165	77,	79,	0,0077	0,0079
0,0165 a 0,017	144,	223,	0,0144	0,0223
0,017 a 0,0175	199,	422,	0,0199	0,0422
0,0175 a 0,018	287,	709,	0,0287	0,0709
0,018 a 0,0185	319,	1.028,	0,0319	0,1028
0,0185 a 0,019	408,	1.436,	0,0408	0,1436
0,019 a 0,0195	486,	1.922,	0,0486	0,1922
0,0195 a 0,02	505,	2.427,	0,0505	0,2427
0,02 a 0,0205	526,	2.953,	0,0526	0,2953
0,0205 a 0,021	591,	3.544,	0,0591	0,3544
0,021 a 0,0215	739,	4.283,	0,0739	0,4283
0,0215 a 0,022	790,	5.073,	0,079	0,5073
0,022 a 0,0225	891,	5.964,	0,0891	0,5964
0,0225 a 0,023	1.012,	6.976,	0,1012	0,6976
0,023 a 0,0235	1.167,	8.143,	0,1167	0,8143
0,0235 a 0,024	1.580,	9.723,	0,158	0,9723
0,024 y mayor	277,	10.000,	0,0277	1,

**Tabla 8. Recuento Distribución Gamma**

Mirando la información generada: beta, alfa aleatoria menor a beta y gamma resultante de la ecuación 6 se pueden encontrar los siguientes rangos clasificados por escenarios:

	Alfa	Beta	Gamma
Escenario 1	98%	99%	2,36%
Escenario 2 (moda)	33,33%	57,57%	2,37%
Escenario 3	0%	0%	2,38%
Escenario 4	0%	99%	1,48%
Escenario 5 (promedio)	33,33%	69,69%	2,15%

**Tabla 9. Escenarios Gamma**

En los escenarios 1, 3 y 4 se han tomado valores de alfa y beta extremos. Se puede ver que incluso cuando ambos valores son 0, algo completamente imposible, un inversionista

requerirá un valor gamma superior al 2,38% para invertir. Subiendo al máximo tanto alfa como beta, el valor gamma requerido debe superar 2,36%. Si alfa desaparece y beta está al máximo, gamma toma un valor de 1,48% (cercano al caso sin incertidumbre). Para el valor más común, la moda, alfa y beta son relativamente cercanos y gamma está en 2,37%. Para el promedio, gamma está en 2,15%.

### **Conclusiones**

El impacto económico causado por las altas emisiones de CO<sub>2</sub> representa pérdidas de miles de millones de dólares, dependiendo del país en cuestión. El impacto sería más importante para países cuyos ingresos dependen en mayor grado de la pesquería. La generación de energía limpia y eficiente representa un reto importante que se ha manejado desde los años 60 con las iniciativas de plantas de fusión Tokamak. Estos proyectos se han retrasado varias veces, sin embargo las grandes inversiones y surgimientos de proyectos multinacionales no han cesado. El análisis mostrado explica tal comportamiento principalmente debido a la alta rentabilidad esperada de dichos proyectos; el valor presente neto estimado es 117 veces mayor al de una planta de carbón. Esto tiene fuertes implicaciones sobre las decisiones de un agente inversor. El modelo muestra que incluso si se ignoran los efectos del calentamiento global, un inversionista necesita una probabilidad de que tales plantas de fusión funcionen relativamente pequeña, mayor a solo el 2,38%. Por otro lado, las probabilidades de que exista una extinción masiva hacen que tal requerimiento baje, indicando que en todos los escenarios planteados, el agente representativo será menos exigente con el riesgo si existe un peligro de pérdida económica.

### **Limitaciones del Modelo**

Si bien los resultados describen de manera correcta el comportamiento de un inversionista en la situación dada, es evidente que como en todo modelo, existen supuestos y omisiones

importantes. En este caso probablemente la omisión más importante sea la inclusión de otras formas de energía más rentables que las plantas de carbón, tales como la energía hidroeléctrica, de fisión nuclear y paneles solares de vanguardia. Estas tecnologías han tomado un papel importante en los países de mayor eficiencia técnica (Chien & Hu, 2007) y si bien son estos mismos países los que financian la iniciativa de fusión, es evidente que si se presenta un VPN mayor para la forma de energía que compite con la fusión, el valor mínimo de gamma subirá considerablemente. Por otro lado, existe una subestimación del impacto de una extinción marina, principalmente por la gran cantidad de variables que se afectarían en un entorno macro y micro económico, tales como: exportaciones, importaciones, producto interno bruto, gasto gubernamental, inversión privada, ahorro, confianza del consumidor, solo por mencionar algunas. Asimismo, el modelo conecta tal pérdida mediante una disminución en ingresos tributarios, pero deja de lado un impacto social causado por el desempleo, la pérdida en industrias de insumos para pesquería, disminución de posibilidades alimentarias, entre otros. Además, se toma en cuenta únicamente la extinción marina, dejando fuera el impacto de la misma sobre los ecosistemas terrestres (Prothero, 1994), los cuales se ven afectados directamente.

Sin embargo, queda claro que a pesar de estas limitaciones, el curso de acción muestra una tendencia a favor de la fusión, tanto por su alta rentabilidad como la imperativa necesidad de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> lo más pronto posible. Al final del día, los números dictan las acciones.

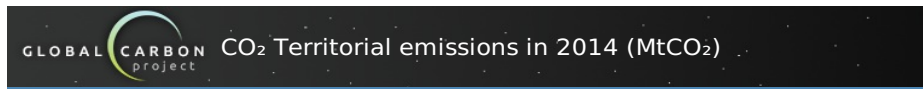
## Referencias

- Veron, J. (2008). Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs*.
- Stojkov, L., & Shepherd, J. (4 de 2 de 2007). The logistic population model with slowly varying carrying capacity.
- Stang, J. (2015). Energy's Holy Grail? You can find it at Redmond's Helion Energy. *Cross-cut: News of the Great Nearby*.
- EPA. (N.D de N.D. de 2016). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. Obtenido de EPA: <https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources.html>
- Liu, Z. (2015). *China's Carbon Emissions Report 2015*. Harvard Kennedy School, Belfer Center for Science and International Affairs. Cambridge: Harvard Kennedy School.
- ITER. (n.d. de n.d. de 2016). *Advantages of fusion*. Obtenido de iter: <https://www.iter.org/sci/Fusion>
- Maisonnier, D., Cook, I., Sardain, P., Andreani, R., Di Pace, L., Forrest, R., . . . Ward, D. (2005). *A CONCEPTUAL STUDY OF COMMERCIAL FUSION POWER PLANTS Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)*. EFDA. n.d.: EFDA.
- GLOBAL CARBON ATLAS. (n.d. de n.d. de 2014). *GLOBAL CARBON ATLAS*. Obtenido de Emissions: <http://www.globalcarbonatlas.org/?q=en/emissions>
- Grunwald, A., Grünwald, R., Oertel, D., & Paschen, H. (2002). *Thermonuclear fusion*. Bundestag: TAB.
- Menanteau, P., Finon, D., & Lamy, M.-L. (2003). *Prices versus quantities: choosing policies for promoting the development of renewable energy*. Grenoble: Elsevier Science.

- Harrison, A., Hyman, B., Martin, L., & Nataral, S. (2015). *WHEN DO FIRMS GO GREEN? COMPARING PRICE INCENTIVES WITH COMMAND AND CONTROL REGULATIONS IN INDIA*. Cambridge: NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH WORKING PAPER SERIES.
- Chien, T., & Hu, J. (2007). *Renewable energy and macroeconomic efficiency of OECD and non-OECD economies*. Institute of Business and Management, National Chiao Tung University. Taiwan: Elsevier.
- Sims, R., Rogner, H., & Gregory, K. (2002). *Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation*. Centre for Energy Research, Massey University, Palmerston North, New Zealand b Department of Nuclear Energy, International Atomic Energy Agency (IAEA), P.O. Box 100, Wagramerstr. 5, A-1400 Vienna, Austria c Centre for Business and Environment, 80 Cecil Park, Pinner, Middlesex HA5 5HH, UK. n.d.: Elsevier.
- Bustreo, C. (2013). *Fusion Energy Economics*. Seoul: ETSAP.
- Thomas, J., & otros, y. (1997). A high observed substitution rate in the human mitochondrial DNA control region. *Nature Genetics*.
- Giljum, S., Hinterberger, F., Bruckner, M., Burger, E., Frühmann, J., Lutter, S., . . . Warhust, M. (2009). *Overconsumption? Our use of ther world's natural resources*. SERI, Global 2000. n.d.: Friends of the Earth Europe.
- Bednyagin, D. (2010). *Socio-Economic Assessment of Fusion Energy Research, Development, Demonstration and Deployment Programme*. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. Lausanne: ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.

- Kumar, R., Sharma, A., & Tewari, P. (2015). *Cost analysis of a coal-fired power plant using the NPV method*. n.a.: Springerlink.
- Weitzman, M. (2001). Gamma Discounting. *The American Economic Review*, 91(1), 260-271.
- Gilboa, I. (2008). *Theory of Decision under Uncertainty*. n.d.: n.d.
- Climate Interactive. (20 de Abril de 2016). *Climate Interactive*. Obtenido de Scoreboard Science and Data: <https://www.climateinteractive.org/programs/scoreboard/scoreboard-science-and-data/>
- I.R.S. (n.a de n.a de 2015). *Instructions for form 1120*. Obtenido de Internal Revenue Service: <https://www.irs.gov/pub/irs-pdf/i1120.pdf>
- Lam, V., Cheung, W., Reygondeau, G., & Sumaila, R. (n.a. de 2016 de 2016). *Projected change in global fisheries revenues under climate change*. Obtenido de Nature: <http://www.nature.com/articles/srep32607#introduction>
- U.S.D.C. (n.d. de Mayo de 2016). *NOOA*. Obtenido de Fisheries Economics of the United States 2014: <https://www.st.nmfs.noaa.gov/Assets/economics/publications/FEUS/FEUS-2014/Report-and-chapters/FEUS-2014-FINAL-v5.pdf>
- Prothero, D. R. (n.d. de n.d. de 1994). The Late Eocene-Oligocene Extinctions. *Erath Planet Science Occidental College*, págs. 145-165.
- Raup, D. M., & Sepkoski, J. J. (1982). *Mass Extinctions in the Marine Fossil Record* (Vol. 215). n.d., U.S.A.: American Association for the Advancement of Science.
- New World Encyclopedia. (2 de Mayo de 2014). *Mass extinction*. Obtenido de New World Encyclopedia: [http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Mass\\_extinction](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Mass_extinction)

## Anexos:

Territorial (MtCO<sub>2</sub>)

Rank	Country	MtCO <sub>2</sub>
1	China	9680
2	United States of	5561
3	India	2597
4	Russian	1595
5	Japan	1232
6	Germany	789
7	Indonesia	641
8	Iran	616
9	Saudi	602
10	South	599
11	Canada	558
12	Brazil	507
13	South	476
14	Mexico	457
15	United	428
16	Australia	382
17	Turkey	373
18	Thailand	337
19	France	331
20	Italy	327
21	Poland	310
22	Taiwan	260
23	Malaysia	252
24	Spain	241
25	Egypt	237
26	Ukraine	237
27	Kazakhstan	208
28	Venezuela	207
29	Argentina	202
30	United Arab	198
31	Vietnam	195

## Anexo 1 (GLOBAL CARBON ATLAS, 2014)