



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

POTENCIAL ENERGÉTICO RENOVABLE LATINOAMERICANO: ¿ES SUFICIENTE
PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE A NIVEL MUNDIAL?

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN ECONOMÍA APLICADA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

JAVIER MARCOS MORENO JORQUERA

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO ERNESTO EDUARDO PALMA BEHNKE

PROFESOR CO-GUÍA:
JUAN PABLO MEDINA GUZMÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JORGE ERNESTO LORCA GUTIERREZ
JUAN FERNANDO ESCOBAR CASTRO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
FONDECYT Regular N° 1181532
Instituto de Imperfecciones de Mercado y Políticas Públicas - MIPP

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
AL GRADO DE MAGÍSTER EN ECONOMÍA APLICADA
POR: JAVIER MARCOS MORENO JORQUERA
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: RODRIGO ERNESTO EDUARDO PALMA BEHNKE

POTENCIAL ENERGÉTICO RENOVABLE LATINOAMERICANO: ¿ES SUFICIENTE PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE A NIVEL MUNDIAL?

América Latina (LATAM) tiene un gran potencial de energía renovable que puede jugar un papel clave en el desarrollo sostenible a escala global. Además, no existen estudios previos que hayan abordado la contribución del potencial energético de LATAM en un contexto de cambio climático e impacto económico global.

Para estudiar el rol que puede jugar LATAM en este ámbito, la presente tesis extiende un modelo de evaluación integrada, que corresponde a un modelo económico de equilibrio general, específicamente un modelo de crecimiento neoclásico multiregional con bienes intermedios, junto con un modelo climático que permite entender las dinámicas de la temperatura y el ciclo del carbono, donde a su vez, ambos tipos de modelo se retroalimentan. Con esto, se estudia el impacto climático y económico a nivel global de exportar de energías renovables de LATAM y la región Asia-Pacífico hacia el resto del mundo.

Las predicciones del modelo extendido con la información actualizada muestran que: (i) la exportación de energía renovable a escala global desde LATAM a las diferentes regiones del mundo genera beneficios económicos para todas las regiones, pero no es capaz de reducir los efectos del calentamiento global y, por el contrario, acaba agravándolo; (ii) si las exportaciones de energía renovable se llevan a cabo acompañadas de políticas que desalienten el uso de fuentes de energía contaminantes (por ejemplo, impuestos pigouvianos), es posible frenar el calentamiento global y, a su vez, generar importantes ganancias económicas para todas las regiones con respecto a el caso sin exportaciones. (iii) Aunque todas las regiones se benefician de las exportaciones, para LATAM hay incrementos en términos de ganancias económicas de alrededor de 5 veces el promedio mundial y (iv) retrasar el desarrollo de las exportaciones reduce las ganancias económicas no solo en el período de retraso, sino también en los años posteriores al inicio de las exportaciones.

Las simulaciones y sensibilidades presentadas con respecto a los niveles impositivos y las incertidumbres futuras, permiten argumentar que las exportaciones de energía renovable de LATAM a otras regiones, junto con las políticas que reducen las emisiones de carbono, generan un escenario virtuoso en que se reduce el cambio climático y, a su vez, aumenta los beneficios económicos de todas las regiones del mundo.

Finalmente, todo lo anterior requiere de un claro trabajo colaborativo entre los diferentes países que conforman la región, en donde quienes cuentan con mayores recursos renovables están llamados a tomar la iniciativa en esta materia. Lo anterior, en línea con los objetivos de cooperación internacional establecidos en el acuerdo de París.

A mi familia y amigos.

Agradecimientos

Estas palabras las quiero comenzar por quienes han sido y serán la base de lo que soy, mis papás, Marco y Sandra. Definitivamente nada de esto sería posible sin su incondicional apoyo y amor que me entregan día a día, esto es tan suyo como mío. A mis hermanos Francisco, Vicente y Gabriel, gracias por siempre estar y ser una razón de motivación diaria, no podría haber pedido mejores compañeros de vida. A mis abuelos, tíos y tías, primos y toda mi familia. Ustedes son el pilar de todo.

Además de mi familia, no podría dejar de mencionar a todos aquellos profesores que han marcado su huella en mi, en especial, al profesor Rodrigo Palma, por haberme acompañado, motivado y guiado en esta larga, complicada, pero no menos desafiante, travesía de juntar dos grandes mundos, energía y economía. También agradecer al profesor Juan Pablo Medina que desinteresadamente se embarcó en este buque, realmente su apoyo, guía y consejos fueron fundamentales para todo este proceso. A su vez, al profesor Jorge Lorca que con muy buena disposición quiso formar parte de esta comisión. También agradecer a los profesores J. Escobar, B. Villena, P. Arellano, y tantos otros, que de alguna u otra manera me acompañaron o confiaron en mi durante mi paso por Beauchef.

Como dejar de mencionar a mis amigos que son parte fundamental de mi vida, especial a "*los de las Pampas*", el Voley de Ingeniería, compañeros de eléctrica, el coimeo MagCEA, del colegio y amigos en general, gracias por tantos buenos momentos de distracción y goce. Sin esos momentos hubiese sido todo mucho más difícil.

En general agradecer a todas las personas que de alguna u otra forma han sido parte de mi vida, tengo claro que sin el apoyo de todos ustedes no podría estar terminando esta dura pero tan gratificante etapa.

Finalmente agradecer al Instituto de Imperfecciones de Mercado y Políticas Públicas - MIPP y al proyecto FONDECYT Regular N° 1181532 por haber financiado parcialmente este trabajo de tesis.

Gracias y más gracias.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Modelo	5
2.1. Modelo Económico	5
2.1.1. Hogares	5
2.1.2. Firmas	7
2.1.3. Gobierno	8
2.2. Ciclo del Carbono	8
2.3. Modelo Climático y Función de Daño	9
2.4. Caracterización del Equilibrio	10
3. Extensiones	12
3.1. Exportación de Electricidad	12
3.2. Exportación de Combustibles Sintéticos	14
3.3. Exportación de Electricidad y Combustible Sintético	15
4. Calibración	16
4.1. Formas funcionales de preferencias y tecnologías	16
4.2. Sector Energético	17
4.3. Clima y Función de Daños	18
4.4. Condiciones Iniciales y de Largo Plazo	19
5. Resultados	20
5.1. Definición de Escenarios	20
5.1.1. Nivel de Impuesto	20
5.1.2. Precio Energía Renovable	21
5.1.3. Precio del Carbón	21
5.1.4. Escenarios	22
5.2. Resultados de Escenarios	22
6. Análisis de Sensibilidad	27
6.1. Diferentes Niveles de Impuesto	27
6.2. Análisis de Robustez	30
7. Conclusiones y Trabajo Futuro	34
Bibliografía	36

A. Derivación de Resultados	41
A.1. Ecuación (2.4):	41
A.2. Ecuación (2.9):	42
A.3. Proposición 2.1	42
A.4. Proposición 3.1	45
A.5. Proposición 3.2	47
B. Parametrización del Modelo	48
C. Resultados Económicos por Región	50

Índice de Tablas

6.1.	Parámetros Estocásticos	30
B.1.	Parámetros Función de Daño	48
B.2.	Productividades Iniciales	48
B.3.	Porcentaje de Brecha con respecto a Norte América.	49
B.4.	Precios Iniciales por tipo de Energía.	49

Índice de Ilustraciones

5.1.	Resultados climáticos.	23
5.2.	Resultados económicos.	25
6.1.	Resultados globales para diferentes niveles de impuestos.	28
6.2.	Resultados globales para diferentes niveles de impuestos por año	29
6.3.	Resultados Simulaciones de Montecarlo - Evolución de la Temperatura sin Impuestos	31
6.4.	Resultados Simulaciones de Montecarlo - Evolución de la Temperatura con Impuestos	32
6.5.	Evolución de la composición promedio y volatilidad de la matriz energética mundial	33
C.1.	North America Economic results.	50
C.2.	Europe Economic results.	51
C.3.	China Economic results.	52
C.4.	Africa Economic results.	53
C.5.	South Asia Economic results.	54
C.6.	LATAM Economic results.	55
C.7.	Asia Pacific Economic results.	56

Capítulo 1

Introducción

Desde hace varios años existe una basta y larga evidencia a nivel mundial en que seguir con el modelo de desarrollo actual, basado en la quema de combustibles fósiles, deforestación, y destrucción de ecosistemas terrestres y marítimos debido a los diferentes procesos productivos, generará daños irreversibles al medio ambiente¹. Es por esto, que desde el año 1995 se desarrollan las llamadas *Conferencia entre las Partes* (COP) que buscan generar consenso sobre las políticas a implementar para frenar el cambio climático. Algunas de las COP que destacan son la COP3 en 1997 donde se firmó el *Protocolo de Kyoto* [57] que acordó el objetivo de reducir en 5 % las emisiones de los países, y hace algunos años la COP21 en 2015 donde se firmó el *Acuerdo de París* [58] en el que se estableció disminuir la temperatura a nivel global a no más de 2°C al 2100, a través de responsabilidades comunes pero diferenciadas entre las Partes.

Sin embargo, uno de los últimos reportes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [26] señala que debe reactualizarse el límite de aumento de la temperatura a nivel global a no más de 1.5°C al 2100, ya que se prevé importantes efectos en la biodiversidad y los ecosistemas, riesgos en la salud, seguridad alimentaria, suministro de agua y crecimiento económico si produce un aumento de 2°C en relación a un aumento de 1.5°C al 2100. Además de esto, la reciente crisis provocada por el Covid-19 refuerzan las políticas de estímulo "verdes" para afrontar la recuperación económica. Esto se puede ver en los diferentes informes de organismos internacionales como la ONU, la OCDE, o el IMF² en donde el mensaje en común es aprovechar los diferentes estímulos fiscales, que correctamente están llevando a cabo los gobiernos a nivel mundial para sobrellevar la crisis, para promover un desarrollo sostenible.

Por otro lado, para entender las fuentes que generan las emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático, se tiene que en 2016 el 73.2 % de las emisiones a nivel mundial fueron provocadas por el sector energético³ y sólo un 18.4 % por la agricultura y cambio de uso de suelo [48], en donde las emisiones provocadas en el sector energéticos se deben principalmente a la quema de combustibles fósiles. Por lo tanto, resulta imperante disminuir el uso de este tipo de combustibles para así cumplir con el límite de 1.5°C de aumento de temperatura al 2100.

En línea con lo anterior, una posible opción para poder descarbonizar la matriz energética es el cambio del uso de combustibles fósiles por energías renovables como la energía solar

¹ Mirar por ejemplo la fecha del primer informe de [24]

² Revisar [60], [44] y [22]

³ Esto incluye el uso de la energía en el sector industrial como en la generación eléctrica, transporte y otros usos. Para un mayor desglose ver [48]

o eólica⁴, ya que estas han reducido en casi un 80% y 35% los Costos Nivelados de la Energía (LCOE)⁵ en los últimos 10 años respectivamente, llegando a los 85[USD/MWh] aproximadamente [27], volviendo mucho más competitivas a estas tecnologías, ya que el LCOE de una central térmica bordea los 60[USD/MWh] sin impuestos.

Ahora bien, no existe una distribución homogénea a nivel mundial de los potenciales energéticos renovables. Para el caso de la energía solar, los mejores índices de radiación promedio diario se tienen el Desierto de Atacama en el Norte de Chile, llegando a valores cercanos al 10.5 [kWh/m²], seguidos por el Desierto del Oeste Australiano en donde la radiación promedio diaria llega a 8.0 [kWh/m²], y algunas otras regiones en África o Medio Oriente que llegan a valores cercanos a 7.0 [kWh/m²] [50]. Por el lado de la energía eólica, hace varios años existe evidencia de que la zona sur de Sudamérica, específicamente el sector de la Pampa, posee uno de los mejores niveles de viento a nivel mundial⁶ donde el potencial energético llega a 7.5 [kWh/m²] aproximadamente [32].

Sumado a lo anterior, el potencial renovable existente en Latinoamérica excede sustancialmente la demanda energética proyectada a mediano y largo plazo en la región [8], por lo que el objetivo de esta investigación es entender que puede ofrecer Latinoamérica a las demás regiones del mundo para frenar el cambio climático, es decir, entender cuáles serían los efectos económicos y climáticos de exportar el potencial energético renovable que existe en la región a nivel mundial, dada la no existencia de estudios previos en la materia.

Para lograr entender los efectos económicos y climáticos de exportar energía renovable de Latinoamérica al resto del mundo, es de vital importancia entender cuál es el horizonte temporal de estudio, como también, el nivel de desagregación de la economía, para así poder abordar el problema desde un punto de vista climático como económico. Es por esto, que revisando la literatura relacionada a Sistemas de Energía, se puede observar una predominancia de modelos de equilibrio parcial, centrados en entender las decisiones estratégicas de los agentes y el problema climático se centra en entender las emisiones por unidad de tiempo pero no se estudia el efecto de estas en las decisiones económicas, en esta línea podemos ver el estudio de [30] donde muestran los incentivos y diseño de mercado que permitiría la interconexión, y por ende exportación de energía, entre los países del Mar del Norte.

Por otro lado, entendiéndose que el problema climático es de carácter agregado, existen algunos acercamientos a este tipo de problemas mediante la utilización de modelos de equilibrio general que permitan cuantificar de mejor manera las demandas de energía y/o las emisiones provocadas por diferentes sectores productivos. Como por ejemplo, [45] mediante la utilización de un modelo de Equilibrio General Computable (CGE) muestran el impacto en toda la economía de la expansión de la energía renovable en la matriz energética Chilena. Por otro lado, [10], utilizan un modelo Dinámico Estocástico de Equilibrio General (DSGE) para evaluar los efectos económicos de implementar un impuesto al carbono aplicado al sector de generación de electricidad en Chile.

Ahora bien, ambos modelos (CGE y DSGE) poseen falencias por sí solos al momento de

⁴ Cabe destacar que ya existen a nivel mundial plantas de generación eléctrica en base a energía geotérmica, mareomotriz o bio-masa, pero para efectos de este estudio cuando hablemos de energía renovable nos estaremos refiriendo a la energía solar y eólica.

⁵ Levelized Cost of Energy: $LCOE_i = \frac{\sum_n \frac{I_t + VC_t}{(1+r)^t}}{\sum_n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$, donde I_t es el gasto en Inversión en el año t , VC_t es el costo variable en el año t , E_t es la energía generada en el año t y r es la tasa de descuento de las tecnologías ($\sim 10\%$).

⁶ También hay zonas en Islandia, Noruega y Dinamarca con estas características.

querer estudiar el problema climático y económico de manera integrada, ya que independiente de la inclusión de cierta dinámica para el modelo CGE, o una desagregación en diferentes bienes intermedios y sectores productivos para los modelos DSGE, no se preocupan de manera endógena del problema climático. Esto se tiene ya que ambos modelos no incluyen los posibles efectos que tendría el aumento de la temperatura a nivel global, ya sea porque no es el objetivo por el cual fueron diseñados, o porque en el horizonte temporal de mediano plazo (20-50 años) no se ven cambios sustanciales en la temperatura para una posible extensión. Para hacerle frente a este problema, y a su vez, poder tener herramientas que permitan realizar análisis integrados del clima y la economía es que se desarrollaron los Modelos de Evaluación Integrada (IAM) que corresponden a modelos que estudian de manera conjuntas las relaciones económicas entre los agentes y las dinámicas del clima.

Dentro de esta literatura existen tres modelos que han tomado una mayor relevancia en la academia como en tomadores de decisión. El primero es el modelo PAGE utilizado en [53], que corresponde a un modelo de equilibrio parcial en el que se modela la economía como ocho regiones con cuatro componentes de daño⁷, donde tanto el crecimiento del producto como las políticas de mitigación son inputs para el modelo. El segundo el modelo FUND [6], que al igual que el modelo PAGE corresponde a un modelo de equilibrio parcial sólo que con 16 divisiones geográficas y ocho componentes de daño, en donde el daño no sólo depende del aumento de la temperatura como en el modelo PAGE sino que también de la tasa de aumento de la temperatura. Finalmente, el tercer IAM más utilizado es el modelo Dinámico Integrado del Clima y la Economía (DICE) propuesto por primera vez en [40]⁸, que corresponde a un modelo de equilibrio general con una economía centralizada y una región⁹ en donde existe una componente de daño que se modela de manera endógena, de manera de poder obtener tanto el crecimiento económico como las políticas de mitigación como solución del modelo.

Siguiendo con el modelo DICE, uno de sus principales objetivos es el de obtener el costo social del carbono (SCC), para lo cual, dado que las emisiones se modelan endógenamente y la función de daños permite entender como las emisiones afectan la economía, es posible obtener el SCC mediante la utilización de los multiplicadores de Lagrange del problema de control óptimo que resuelve el planificador¹⁰. Cabe destacar, que para el modelo DICE/RICE en todas sus versiones las emisiones corresponde a una fracción del producto y no se modela explícitamente el sector energético.

Para solucionar lo anterior, en [15] desarrollan dos modelos IAM que modelan explícitamente la demanda energética como un bien intermedio y realiza una simplificación para la dinámica del ciclo carbón propuesta en las diferentes versiones del DICE/RICE. En el primero derivan analíticamente, desde un punto de vista de una economía centralizada, la externalidad de una unidad adicional de Carbono en la atmósfera, cosa que en el segundo modelo, modelando la economía desde un enfoque descentralizada, muestran que un impuesto igual a la externalidad derivada anteriormente permite obtener la misma asignación pareto eficiente encontrada en el modelo de la economía centralizada, es decir, encuentran una solución analítica para el impuesto óptimo.

Ahora bien, el modelo de [15] sólo posee una región a nivel mundial, por lo que [19] extienden el modelo a más regiones y permiten al existencia de energéticos que sean sustitutos

⁷ aumento del nivel mar, daños económicos, daños no económicos y discontinuidades

⁸ Las nuevas versiones del DICE, RICE y su implementación en GAMS se puede encontrar en [38]

⁹ Análogo al modelo DICE, también se desarrolló el modelo Regional Integrado del Clima y la Economía (RICE) que levanta esta condición [38]

¹⁰ Para más detalles revisar [29].

cercanos a los ya existentes (petróleo, carbón y energías renovables) para así incluir el efecto del Shale oil y del Shale gas. A su vez, evalúan diferentes tipos y niveles de impuestos, lo que no es posible en los modelos DICE/RICE ya que son economías modeladas desde un punto de vista centralizado.

Por lo tanto, con el fin de poder entender los posibles efectos económicos y climáticos de exportar energía renovable desde Latianomérica al resto del mundo, nos basaremos y extenderemos el desarrollo propuestos por [19]. Para esto, el documento estará organizado por la exposición del modelo base y sus características en la Sección 2, la descripción de las extensiones al modelo base en la Sección 3, la calibración del modelo en la Sección 4, los resultados obtenidos en la sección 5, un análisis de robustez de los resultados haciendo un análisis estocástico en la Sección 6.2 y finalmente terminar con las conclusiones y trabajo futuro en la Sección 7.

Capítulo 2

Modelo

Nuestro modelo se basa en la extensión del modelo propuesto por [19], que corresponde a un modelo macroeconómico de equilibrio general junto con un modelo simplificado del ciclo del carbono tomado de [15] y un modelo climático con dos niveles de temperatura utilizado en [41]. A continuación, detallamos los detalles de cada uno de estos.

2.1. Modelo Económico

El modelo económico corresponde a un modelo de equilibrio general, específicamente un modelo neoclásico de crecimiento multiregional bajo una economía descentralizada, con mercados secuenciales y agentes representativos. Además, modelamos explícitamente el sector energético, donde existirán combustibles fósiles y energías renovables que modelamos como bienes intermedios. A continuación, se detallan las características de cada uno de los agentes que componen esta economía.

2.1.1. Hogares

Consideraremos que existen r regiones en el mundo, cada una con un hogar representativo, en donde sin pérdida de generalidad, asumiremos que la región $r = 1$ es la única con reservas petroleras finitas que podrá exportar a las demás regiones. Esta exportación se considerará en un ambiente en donde existe un único mercado a nivel global del petróleo, que consideramos como un bien final. Cabe destacar, que en nuestro enfoque no considerará la existencia de un mercado de capitales internacional.

Para las $r - 1$ regiones importadoras de petróleo, las consideramos como regiones homogéneas, es decir, tendrán las mismas formas funcionales pero con diferentes niveles de tamaño, capital inicial y productividades. Ahora bien, el problema que resuelve cada región $i \in \{2, \dots, r\}$ corresponde a definir la senda de consumo e inversión $\{c_{i,t}, I_{i,t}\}_{t=0}^{\infty}$ que maximiza el valor presente de su utilidad, es decir, resuelve el siguiente problema de programación dinámica (en tiempo discreto)

$$\max_{\{c_{i,t}, I_{i,t}\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u_i(c_t) \quad (2.1)$$

$$\text{s.a.} \quad c_{i,t} + I_{i,t} = (1 + \Gamma_{i,t})(w_{i,t}L_{i,t} + r_{i,t}K_{i,t}) \quad (2.2)$$

$$K_{i,t+1} = I_{i,t} + K_{i,t}(1 - \delta) \quad (2.3)$$

donde $u_i(c_{i,t})$ es una función cóncava en $c_{i,t}$, la ecuación (2.2) representa la restricción presupuestaria, caracterizada por los ingresos (lado de derecho de la igualdad), determinados por los salarios $w_{i,t}$, la oferta laboral $L_{i,t}$, la renta de capital $r_{i,t}$ y el nivel de capital $K_{i,t}$ que los hogares arriendan a las firmas, los cuales se ven amplificados por el factor $1 + \Gamma_{i,t}$ que el gobierno transfiere a los hogares. A su vez, los gastos del hogar representativo (lado izquierdo de la igualdad) quedan determinados por el consumo $c_{i,t}$ y la inversión $I_{i,t}$ en dicho período. Finalmente la ecuación (2.3) describe la dinámica del capital $K_{i,t}$, con δ la tasa de depreciación del capital período a período.

Resolviendo el problema de los hogares representativos de las regiones importadoras de petróleo de forma recursiva¹, obtenemos la siguiente ecuación de Euler $\forall i \in \{2, \dots, r\}$

$$\frac{\partial u_i(c_{i,t})}{\partial c_{i,t}} = \beta \frac{\partial u_i(c_{i,t+1})}{\partial c_{i,t+1}} (1 + \Gamma_{i,t+1})(r_{i,t+1} + 1 - \delta) \quad (2.4)$$

con la cual queda caracterizado el comportamiento intertemporal del agente². A su vez, para la consistencia del modelo asumimos que

$$L_t = \sum_{i=1}^r L_{i,t} \quad (2.5)$$

$$L_{t+1} = L_t(1 + g_{L,t}) \quad (2.6)$$

donde $g_{L,t}$ es la tasa de crecimiento de la población mundial que será definida en detalle en al Sección 4.

Por otro lado, sin pérdida de generalidad asumimos que $i = 1$ corresponde a la región petrolera, en donde sus ingresos vienen dados únicamente por la exportación de petróleo, por tanto el problema que resuelve el hogar representativo de esta región es encontrar la senda de consumo y reservas $\{c_{1,t}, R_{t+1}\}_{t=0}^{\infty}$ de tal forma de maximizar el valor presente de su utilidad, lo que matemáticamente corresponde al siguiente problema dinámico

$$\max_{\{c_{1,t}, R_{t+1}\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u_1(c_t) \quad (2.7)$$

$$\text{s.a. } R_{t+1} = R_t - \sum_{i=2}^r e_{1,i,t} \quad \wedge \quad R_t \geq 0 \quad (2.8)$$

donde β es la tasa de descuento intertemporal, R_t es la cantidad de reservas de petróleo explotable en el período t y finalmente $\sum_{i=2}^r e_{1,i,t}$ corresponde a la cantidad de petróleo demandado por las demás regiones en el período t , o también visto de otra manera $e_{1,i,t}$ es la cantidad de petróleo importada por la región i en el período t .

Ahora bien, asumimos que esta firma es tomadora de precios, lo que sumado a la existencia de un único mercado global para el petróleo, definimos el precio del petróleo en el tiempo t para la región i como $p_{1,i,t} = p_{1,t}$, (medido en unidades de bien final), lo que sumado al supuesto de que el ingreso de esta región queda determinado únicamente por la exportación de petróleo, obtenemos que $c_{1,t} = p_{1,t}(R_t - R_{t+1})$, por lo que resolviendo el problema de forma

¹ En la sección A.1 se incluye el detalle de la derivación

² Cabe destacar que el problema equivalente al descrito en (2.1) y (2.2), es la ecuación de Euler descrita en (2.4) más una condición de transversalidad, que por la característica del problema es fácil mostrar que se tiene.

recursiva³, obtenemos la siguiente ecuación de Euler

$$\frac{\partial u_1(c_{1,t})}{\partial c_{1,t}} = \beta \frac{\partial u_1(c_{1,t+1})}{\partial c_{1,t+1}} \frac{p_{1,t+1}}{p_{1,t}} \quad (2.9)$$

con la cual queda caracterizado el comportamiento intertemporal del agente⁴.

2.1.2. Firms

Definiremos dos tipos de firmas y asumiremos que son competitivas y no hay fricciones de mercado. El primer tipo son las *Firmas Agregadoras de Energía*, que corresponde a firmas de bienes intermedios, que utilizan k diferentes energéticos primarios $e_{k,i,t}$ con $k \in \{1, \dots, n\}$, para producir un agregado de energía $E_{i,t}$, resolviendo el siguiente problema estático⁵

$$\min_{e_{k,i,t}} \left[\sum_{k=1}^n \hat{p}_{k,i,t} \cdot e_{k,i,t} \right] \quad (2.10)$$

$$\text{s.a.} \quad E_{i,t} = \Phi_i(e_{1,i,t}, \dots, e_{n,i,t}) \quad (2.11)$$

donde $\hat{p}_{k,i,t}$ es el precio, en unidades de bienes finales, de los diferentes energéticos incluido el nivel de impuesto⁶, y las funciones $\Phi_i(e_{1,i,t}, \dots, e_{n,i,t})$ corresponde a las funciones agregadoras de energéticos primarios, debido a que los $e_{i,k,t}$ son sustitutos imperfectos entre si. Asumimos que dichas funciones son diferenciables en $e_{i,k,t}$ y poseen inversa⁷, por lo que resolviendo el problema obtenemos la demanda por energéticos primarios como

$$e_{k,i,t} = \frac{\partial \Phi_i}{\partial e_{k,i,t}}^{-1} \left(\frac{\hat{p}_{k,i,t}}{P_{i,t}} \right) \quad (2.12)$$

donde $P_{i,t}$ es el multiplicador de Lagrange de la restricción (2.11), que interpretamos como el costo asociado de producir una unidad más del agregado energético $E_{i,t}$, por lo que en lo que sigue lo llamaremos precio del agregado energético. A su vez, podemos ver que la demanda del tipo de energía primaria k depende de su propio precio, el impuesto que se le aplica y el precio del agregado energético.

Ahora bien, el agregado energético, junto con la oferta laboral y el nivel de capital son utilizados por las *Firmas de Bienes Finales*, de tal forma de maximizar las utilidades de éstas, lo que corresponde a resolver el siguiente problema de optimización estática

$$\max_{L_{i,t}, K_{i,t}, E_{i,t}} F_i(L_{i,t}, K_{i,t}, E_{i,t}) - w_{i,t}L_{i,t} - r_{i,t}K_{i,t} - P_{i,t}E_{i,t}$$

donde F_i es una función de producción neoclásica, es decir posee retornos constantes a

³ En la sección A.2 se incluye el detalle de la derivación

⁴ Cabe destacar que el problema equivalente al descrito en (2.7) y (2.8) también necesita una condición de transversalidad.

⁵ Es importante aclarar el hecho de que es un problema estático, a diferencia del problema que resuelven los hogares representativos que resuelven un problema de optimización dinámica.

⁶ Que será definido detalladamente en la siguiente sección.

⁷ Típicamente las funciones de agregación como las CES poseen esta característica, por lo que no es un supuesto muy restrictivo.

escala, retornos marginales decrecientes en los factores y cumple las condiciones de Inada⁸. Aplicando condiciones de primer orden obtenemos las siguientes condiciones de optimalidad para el problema de la *Firmas de Bienes Finales*

$$\frac{\partial F_{i,t}}{\partial L_{i,t}} = w_{i,t} \quad \wedge \quad \frac{\partial F_{i,t}}{\partial K_{i,t}} = r_{i,t} \quad \wedge \quad \frac{\partial F_{i,t}}{\partial E_{i,t}} = P_{i,t} \quad (2.13)$$

de aquí podemos ver, que el supuesto de un mercado perfectamente competitivo origina que el pago a cada uno de los factores corresponde a su productividad marginal.

2.1.3. Gobierno

Además de los agentes representativos por región, las firmas agregadoras de energía y de bienes finales, definimos la existencia de un Gobierno para poder implementar un impuesto Pigouviano⁹, es decir, un impuesto que permita internalizar a los agentes los efectos provocados por la externalidad climática de emitir carbono a la atmósfera, de tal forma que su único objetivo es un cambio en la asignación de recursos. Específicamente, definimos un impuesto por unidad $\tau_{i,t}$ que cambia el precio del energético k de la siguiente forma

$$\hat{p}_{k,i,t} = p_{k,i,t} + \tau_{i,t} g_k \quad (2.14)$$

donde el parámetro g_k indica que tan contaminante es el energético primario k . A su vez, este impuesto se devuelve a los hogares de manera proporcional mediante el parámetro $\Gamma_{i,t}$ en la ecuación (2.2), de tal forma que cumple

$$\Gamma_{i,t}(w_{i,t}L_{i,t} + r_{i,t}K_{i,t}) = \tau_{i,t} \sum_{k=1}^n g_k \cdot e_{k,i,t} \quad (2.15)$$

Cabe destacar que esta formulación hace que el gobierno tenga un presupuesto balanceado, ya que como mencionamos anteriormente, la aplicación de este impuesto tiene sólo objetivos de reasignación y no de recaudación.

2.2. Ciclo del Carbono

En nuestro modelo las fuentes de emisiones de carbono vienen dadas únicamente por la utilización de combustibles fósiles, por lo que las emisiones de la región i vienen dadas por

$$M_{i,t} = \sum_{k=1}^n g_k \cdot e_{k,i,t} \quad (2.16)$$

Ahora bien, existe una diversidad bastante grande en la forma en la que se modela la evolución de la concentración de carbono en la atmósfera, partiendo por modelos geofísicos muy complejos y detallados como los que se utilizaron en [25], como también simplificaciones de éstos. Como por ejemplo, los modelos de degradación lineal que se utilizaron en las primeras

⁸ Para más detalles revisar [23]

⁹ En honor a lo propuesto por A.C. Pigou en [47]

versiones de los modelos DICE y RICE desarrollados por Nordhaus¹⁰.

En línea con lo anterior, las nuevas versiones de los modelos DICE y RICE, desarrollan un modelo en el cual existen tres tipos de reservorios de carbono, los que corresponden a la atmósfera, océanos superficiales y océanos profundos, en donde las relaciones entre cada uno de estos reservorios es lineal, con una velocidad de intercambio de carbono extremadamente lenta entre los océanos profundos y los océanos superficiales, en relación a la velocidad de intercambio entre la atmósfera y los océanos superficiales¹¹. Sin embargo, para nuestro modelo utilizamos la simplificación propuesta por [15], en la que argumentan que la dinámica descrita anteriormente puede aproximarse a la siguiente ecuación

$$S_t = \bar{S} + \sum_{s=0}^t (\varphi_L + (1 - \varphi_L)\varphi_0(1 - \varphi)^s) \sum_{i=2}^r M_{i,t-s} \quad (2.17)$$

donde \bar{S} corresponde al nivel de concentración existente al comienzo del período de estudio, s es la cantidad de períodos previos respecto al período actual t , por lo que φ_L representa la fracción de carbono que permanece para siempre en la atmósfera, $1 - \varphi_0$ representa la fracción restante de carbono que sale de la atmósfera inmediatamente, ya sea como captura en la biosfera o por océanos superficiales, y finalmente la cantidad restante se degrada a una tasa geométrica φ .

Finalmente, si quisiéramos incluir en nuestro modelo tecnologías de captura de carbono, el efecto de la deforestación o modelar con una mayor cantidad de estados la dinámica del carbono basta con seguir el desarrollo de [29].

2.3. Modelo Climático y Función de Daño

Como ya mencionamos anteriormente, el modelo climático que utilizamos corresponde al propuesto por [41], el que se caracteriza por modelar el ciclo climático mediante dos tipos de temperaturas, T_t que corresponde a la temperatura atmosférica y T_t^L que corresponde a la temperatura de los océanos profundos, las cuales siguen el siguiente proceso dinámico

$$T_{t+1} = T_t + \sigma_1 (\mathbf{F}_t - \kappa T_t - \sigma_2 (\Delta T_t)) \quad (2.18)$$

$$T_{t+1}^L = T_t^L + \sigma_3 (\Delta T_t) \quad (2.19)$$

con $\Delta T_t = T_t - T_t^L$ la diferencia de temperatura entre ambos reservorios y $\mathbf{F}_t = \frac{\eta}{\ln 2} \ln \left(\frac{S_t}{S_0} \right)$ que representa el forzamiento radiativo, donde los parámetros σ_i corresponden a coeficientes de transferencia entre las diferentes temperaturas, η es el forzamiento de equilibrio y κ es cociente entre el forzamiento y el impacto en la temperatura de equilibrio por la duplicación de la concentración de carbono y S_0 es la concentración de carbono en la atmósfera en el período pre-industrial. Cabe destacar que ambas temperaturas son medidas como el aumento con respecto a la temperatura del período pre-industrial.

Finalmente, para darle un carácter de modelo integrado, definimos la *función de daños* como la función que permite mapear los cambios en la temperatura en cambios en variables económicas. Como se describe detalladamente en el capítulo 4 de [43], aumentos en la tem-

¹⁰ Ver detalles en [40] y [39]

¹¹ Ver detalles en [43]

peratura generan pérdidas en el producto neto para todos los sectores económicos, aunque no de manera uniforme. De tal forma que la pérdida de producto está determinada por el factor $\Omega_{i,t}$, el cual depende tanto de la temperatura como del cuadrado de esta, según

$$\Omega_{i,t} = \frac{1}{\theta_{i,1}T_t + \theta_{i,2}T_t^2}$$

de tal forma que el producto neto queda determinado por $\Omega_{i,t}F(L_{i,t}, K_{i,t}, E_{i,t})$. Ahora bien, [15] argumentan que el producto neto puede aproximarse a una función de producción en la que la productividad depende negativamente de las concentraciones de carbono en la atmósfera, específicamente, asumen que la productividad está definida como

$$A_{i,t} = \exp(z_{i,t} - \gamma_{i,t}(T_t) \cdot S_{t-1}) \quad (2.20)$$

donde $z_{i,t}$ corresponde a la evolución exógena de la productividad, $\gamma_{i,t}(T_t)$ es la función que permite cuantificar cómo el aumento de la concentración de carbono en la atmósfera, traducido en un aumento de la temperatura, afecta la productividad¹². De aquí podemos ver que los efectos en las productividades no son homogéneos para todas las regiones, lo que será un punto importante para el análisis de resultados. Finalmente, podemos ver que $A_{i,t}$ depende de la concentración de carbono atmosférico del período anterior, lo que en términos cuantitativos, dada la lenta dinámica que posee el ciclo del carbono, es prácticamente nulo su efecto en términos cuantitativos pero simplifica de sobremanera el desarrollo del equilibrio como mostramos a continuación.

2.4. Caracterización del Equilibrio

Una de las características principales de este tipo de modelos, es la capacidad de poder definir un equilibrio que sea consistente con las decisiones racionales de los agentes representativos, firmas y gobiernos de tal manera de poder caracterizar las relaciones entre los agentes, es por esta razón, que siguiendo los famosos desarrollos de [7] y [34], definimos el equilibrio de la economía como sigue

Definición 2.1 *Definimos el Equilibrio Walrasiano (EW) de esta economía como el conjunto de variables de estados $\{K_{i,t+1}, R_{t+1}, L_{i,t}, S_t, T_t, T_t^L\}_{t=0}^{\infty}$, variables de control $\{c_{i,t}, I_{i,t}, E_{i,t}, e_{k,i,t}\}_{t=0}^{\infty}$ y secuencia de precios $\{P_{i,t}, p_{i,k,t}, \tau_{i,t}, \Gamma_{i,t}, r_{i,t}, w_{i,t}\}_{t=0}^{\infty}$ tales que satisfacen:*

1. *Hogares representativos maximizan utilidades: Ecuaciones (2.4) y (2.9) .*
2. *Firmas agregadoras de energía y de bienes finales maximizan utilidades: Ecuaciones (2.12) y (2.13).*
3. *Condiciones de limpieza del mercado: Ecuaciones (2.8), (2.11) y (2.15).*
4. *Leyes de movimiento de las variables de estado: Ecuaciones (2.3), (2.6), (2.17), (2.18) y (2.19).*

¹² Matemáticamente corresponde a que $\frac{\partial \gamma_{i,t}}{\partial T_t} > 0$

Ahora bien, aun cuando nuestro modelo es determinístico, la solución del EW definido anteriormente posee una gran complejidad dependiendo de las formas funcionales que se utilicen, en donde generalmente se utilizan métodos numéricos para encontrar la solución ya que no poseen solución analítica¹³. Es por esta razón, que siguiendo el desarrollo propuesto por [17], proponemos la siguiente proposición.

Proposición 2.1 Si $u(c_{i,t}) = \ln(c_{i,t})$, $F_{i,t} = A_{i,t}L_{i,t}^{1-\alpha-\nu}K_{i,t}^\alpha E_{i,t}^\nu$, $\Phi_{i,t} = (\sum_{k=1}^n \lambda_k(e_{k,i,t})^\rho)^{\frac{1}{\rho}}$, $\delta = 1$, $\forall t$, y $\forall i \in \{1, \dots, r\}$ entonces el EW de la Definición 2.1 queda determinado por las variables de estado $K_{i,t}$, R_t , S_{t-1} , T_t , T_t^L y $L_{i,t}$ tales que: (i) Una tasa de ahorro constante: $s_{i,t} = \frac{\alpha\beta}{1-\nu}$ (ii) Precios del agregado de energía: $P_{i,t} = \left(\sum_{k=1}^n \widehat{p}_{k,i,t}^{\frac{\rho}{\rho-1}} \lambda_k^{\frac{1}{1-\rho}}\right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}$, (iii) Agregado de Energía: $E_{i,t} = \left(\frac{\nu e^{(z_{i,t}-\gamma_{i,t}S_{t-1})} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^\alpha}{P_{i,t}}\right)^{\frac{1}{1-\nu}}$ (iv) Demanda por tipo de energía: $e_{k,i,t} = E_{i,t} \left(\frac{P_{t,i}\lambda_k}{\widehat{p}_{k,i,t}}\right)^{\frac{1}{1-\rho}}$, (v) Producto Neto: $\widehat{Y}_{i,t} = (1-\nu)A_{i,t}L_{i,t}^{1-\alpha-\nu}K_{i,t}^\alpha E_{i,t}^\nu$, (vi) Oferta de petróleo: $R_t(1-\beta)$ (vii) Limpieza del mercado del petróleo: $\sum_{i=2}^r e_{1,i,t} = R_t(1-\beta)$ (viii) Leyes de movimiento de variables de estado: $K_{t,i} = \alpha\beta\widehat{Y}_{i,t}$, $R_{t+1} = \beta R_t$ y las ecuaciones (2.6), (2.17), (2.18) y (2.19).

De la Proposición 2.1¹⁴, podemos ver de que dado que la elasticidad de sustitución intertemporal de la función de utilidad es igual a uno¹⁵, la asignación se realiza de manera secuencial, ya que los efectos ingresos y sustitución se cancelan.

Por otro lado, podemos ver que la oferta de petróleo es inelástica e igual $R_t(1-\beta)$ por lo que queda determinada únicamente por la oferta. Este resultado iría en contra de la *Regla de Hotelling* propuesta en [20], en la que el precio de este recurso no renovable queda determinado por el ingreso neto marginal de la venta del mismo, aumentando conforme a la tasa de interés. Esto se debe principalmente porque el excedente (o pérdida) no puede ser invertida (o endeudar) a una tasa de interés ya que en nuestro modelo no existe un mercado de capitales global. Por lo que el precio del petróleo quedará determinado por la demanda, ya que, este precio deberá *limpiar* este mercado.

Finalmente, y en línea con lo anterior, notemos que de existir el precio del petróleo $p_{1,t} \forall t$, la Proposición 2.1 indica que las condiciones de equilibrio tienen solución cerrada, por lo que, período a período, se deberá encontrar el precio del petróleo $p_{1,t}$, que resuelve la ecuación algebraica que iguala la oferta $R_t(1-\beta)$ con la demanda mundial $\sum_{i=2}^r e_{1,i,t}$ de petróleo.

¹³ Para más detalles revisar capítulos 4 y 5 de [55] o los capítulos 3 y 4 de [31].

¹⁴ La demostración se encuentra en la sección A.3

¹⁵ Notemos que la función de utilidad $u(c_{i,t}) = \ln(c_{i,t})$ pertenece a la familia de funciones CRRA (aversión relativa al riesgo constante) con $u(c) = \frac{c^{1-\sigma}-1}{1-\sigma}$ cuando $\sigma \rightarrow 1$, en donde la elasticidad de sustitución para este tipo de funciones es $1/\sigma$.

Capítulo 3

Extensiones

En el modelo descrito en la Sección 2, describimos un ambiente en que el único energético comercializado internacionalmente es el petróleo. Ahora bien, en esta sección proponemos dos tipos de extensiones al modelo para permitir la exportación de energía renovable, específicamente como electricidad y como combustibles sintéticos.

3.1. Exportación de Electricidad

Una forma de poder aprovechar el potencial energético renovable que existe en Latinoamérica es mediante la conversión de las energías primarias (solares, eólicas, biomasa, geotérmica, etc) en electricidad y exportarla mediante interconexiones eléctricas entre regiones.

En nuestro ambiente, sin pérdida de generalidad, asumimos que $k = 3$ corresponde a la energía renovable. A su vez, ciertas regiones tendrán la opción de exportar un nuevo energético renovable que definiremos $e_{4,i,t}$ como *energético renovable exportable mediante electricidad*, que corresponde a la energía renovable exportada como electricidad por la región i en el período t siguiendo el desarrollo de [18]. Cabe destacar que en la sección de calibración explicitaremos que regiones podrán exportar este tipo energía, a que países, y como evolucionarán los precios de este nuevo energético energético.

A su vez, este nuevo energético renovable es un sustituto cercano a la energía renovable existente en dicha región, por lo que definimos un *agregado de energía renovable* $\mathbf{R}_{i,t}$ como

$$\mathbf{R}_{i,t} \equiv l \left(\sum_{j=1}^l \lambda_{3,j} (e_{3,j,i,t})^{\rho_r} \right)^{\frac{1}{\rho_r}} \quad (3.1)$$

en donde $e_{3,j,i,t}$ corresponde a la energía renovable de tipo j demandada en la región i en el período t , donde para este caso corresponderá a $j = 1$ energía renovable producida en la misma región y $j = 2$ energía renovable importada. A su vez, los $\lambda_{3,j}$ corresponde a la eficiencia relativa entre cada una de las $j \in \{1, 2\}$ energías renovables con ρ_r la elasticidad de sustitución entre dichas energías. Cabe destacar que suponemos $\rho_r > \rho$, de tal forma que efectivamente éste tipo de energías sean sustitutos cercanos con respecto a las demás.

Por lo tanto la agregación de energía $E_{i,t}$ para las regiones importadoras de este nuevo energético, asumiendo que se asume una función de agregación CES y en línea con la

Proposición 2.1, se define como

$$E_{i,t} = \left(\sum_{k \neq 3} \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho + \lambda_3 (\mathbf{R}_{i,t})^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (3.2)$$

En este nuevo ambiente, las firmas agregadoras de energía resuelven primero el problema de decidir que tipo de energía renovable utilizar, lo que corresponde a resolver

$$\begin{aligned} \min_{e_{3,j,i,t}} \left[\sum_{k=1}^n \widehat{p}_{3,j,i,t} \cdot e_{3,j,i,t} \right] \\ \text{s.a. Ecuación (3.2)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

donde $\widehat{p}_{3,j,i,t}$ es el precio del energético renovable j después de impuestos en la región i y en el período t . Posterior a esto, la firmas agregadoras de energía vuelven a resolver el problema definido en (2.10) y (2.11).

Por otro lado, análogo al caso del petróleo, asumimos que existe un único mercado a nivel mundial para este nuevo energético renovable, donde además asumiremos que su precio evoluciona de manera exógena y que la producción a nivel global es infinitamente elástica al precio, por lo tanto toda la producción de este energético va a estar definido por el lado de la demanda. Por tanto, asumimos que la demanda total se reparte equitativamente en todas las regiones productoras de este nuevo energético renovable, y que los ingresos obtenidos por la exportación se suman al producto neto definido anteriormente en el inciso (v) de la Proposición 2.1.

Cabe destacar, que para esta extensión el problema de los hogares representativos de las regiones importadoras de petróleo y la región petrolera no se ven modificados. Por lo tanto, el equilibrio en este nuevo ambiente se caracteriza en la siguiente Proposición.

Proposición 3.1 Si $u(c_{i,t}) = \ln(c_{i,t})$, $F_{i,t} = A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^\alpha E_{i,t}^\nu$, $\Phi_{i,t} = \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}}$, $\delta = 1$, $\forall t$, y $\forall i \in \{1, \dots, r\}$ entonces el EW de la Definición 2.1 queda determinado por la Proposición 2.1 y las siguientes condiciones: (viii) Precio del Agregado Renovable: $P_{i,t}^R = l^{-1} \left(\sum_{j=1}^l (\lambda_{3,j})^{\frac{1}{1-\rho r}} (\widehat{p}_{3,j,i,t})^{\frac{\rho r}{\rho r-1}} \right)^{\frac{\rho r-1}{\rho r}}$, (ix) Demanda Agregado Renovable: $R_{i,t} = E_{i,t} \left(\frac{P_{t,i} \lambda_3}{P_{i,t}^R} \right)^{\frac{1}{1-\rho}}$, (x) Demanda de tipo de Energía Renovable: $e_{3,j,i,t} = \frac{R_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^R \lambda_{3,j}}{\widehat{p}_{3,j,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho r}}$, (xi) Precio del Agregado de Energía: $P_{i,t} = \left(\sum_{k \neq 3} (\widehat{p}_{k,i,t})^{\frac{\rho}{\rho-1}} (\lambda_k)^{\frac{1}{1-\rho}} + (\lambda_3)^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{i,t}^R)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}$, (xii) Limpieza del mercado de energía exportada: $\sum_{i \in \text{exp}} e_{4,i,t} = \sum_{i \in \text{imp}} \frac{R_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^R \lambda_{3,2}}{\widehat{p}_{3,2,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho r}}$.

Notemos que esta extensión del modelo no cambia el resultado fundamental que define el comportamiento de los agentes representativos, ya que la tasa de ahorro $s_{i,t}$ sigue constante y la oferta de petróleo sigue siendo inelástica al precio e igual a $R_{i,t}(1 - \beta)$. Este resultado se tiene, ya que la extensión propuesta sólo corresponde a un cambio en el problema estático de las firmas agregadoras de energía y de bienes finales, pero no un cambio en los problemas dinámicos de los agentes representativos, por lo que encontrar el equilibrio período a período sigue siendo resolver una ecuación algebraica, distinta obviamente a la de la Proposición 2.1, que *limpia* el mercado del petróleo.

3.2. Exportación de Combustibles Sintéticos

Otra manera de poder aprovechar el potencial renovable que posee Latinoamérica es mediante el desarrollo y exportación de combustibles sintéticos como el Hidrógeno Verde.

Para incluirlo en nuestro modelo, y de forma análoga a lo propuesto para la exportación de electricidad, definimos un nuevo energético $e_{5,i,t}$ que llamaremos *combustible sintético exportable*, que será un sustituto cercano al petróleo dada sus características físicas¹, por lo tanto, nos definimos un *agregado de combustible* $\mathbf{O}_{i,t}$ como

$$\mathbf{O}_{i,t} \equiv l \left(\sum_{j=1}^l \lambda_{1,k} (e_{1,j,i,t})^{\rho_H} \right)^{\frac{1}{\rho_H}} \quad (3.4)$$

en donde análogo al caso de la exportación mediante electricidad, $e_{1,j,i,t}$ corresponde al tipo de petróleo j demandado en la región i en el período t , donde para este caso corresponderá a $j = 1$ a la importación de petróleo como tal y $j = 2$ la importación de combustibles sintéticos. A su vez, volvemos a asumir que $\rho_H > \rho$ de tal forma de caracterizar el mayor grado de sustitución del *combustible sintético exportable*, con respecto a los energéticos ya existentes. Del mismo modo, volvemos a redefinir la agregación de energía $E_{i,t}$ como

$$E_{i,t} = \left(\lambda_1 (\mathbf{O}_{i,t})^\rho + \sum_{k=2}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} \quad (3.5)$$

Finalmente, las firmas agregadoras de energía resuelven primero la elección de qué tipo de combustible utilizar (petróleo o combustible sintético), resolviendo el siguiente problema

$$\begin{aligned} \min_{e_{1,j,i,t}} & \left[\sum_{k=1}^n \hat{p}_{1,j,i,t} \cdot e_{1,j,i,t} \right] \\ \text{s.a.} & \text{ Ecuación (3.5)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

donde $\hat{p}_{1,j,i,t}$ es el precio del tipo de petróleo j después de impuestos en la región i y en el período t , es decir, $\hat{p}_{1,1,i,t}$ es el precio del petróleo que responde al problema de los hogares exportadores de petróleo y $\hat{p}_{1,2,i,t}$ es el precio del combustible sintético que asumiremos exógeno. A su vez, y en línea con la exportación de electricidad, asumimos que existe un único mercado a nivel mundial para este nuevo combustible sintético, donde además asumiremos que la producción a nivel global es infinitamente elástica al precio, dicha demanda se divide entre todas las regiones capaces de producir este combustible sintético y que los ingresos por estas exportaciones se suman al producto neto.

Posterior a esto, las firmas agregadoras de energía encuentran las demandas por los tipos de energía primaria $e_{i,k,t}$ y la demanda del agregado de energía $E_{i,t}$ resolviendo (2.10) y (2.11). Nuevamente, notemos que el problema dinámico de los hogares no se ve afectado por lo que en este ambiente, por lo que el equilibrio de la economía queda caracterizado por la siguiente Proposición.

Proposición 3.2 Si $u(c_{i,t}) = \ln(c_{i,t})$, $F_{i,t} = A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^\alpha E_{i,t}^\nu$, $\Phi_{i,t} = (\sum_{k=1}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho)^{\frac{1}{\rho}}$,

¹ Para mayor detalle revisar [27].

$\delta = 1$, $\forall t$, y $\forall i \in \{1, \dots, r\}$ entonces el EW de la Definición 2.1 queda determinado por la Proposición 2.1 y las siguientes condiciones: (viii.b) Precio del Agregado de Petróleo:

$$P_{i,t}^O = l^{-1} \left(\sum_{j=1}^l (\lambda_{1,j})^{\frac{1}{1-\rho_H}} (\widehat{p}_{1,j,i,t})^{\frac{\rho_H}{\rho_H-1}} \right)^{\frac{\rho_H-1}{\rho_H}}, \quad (ix.b) \text{ Demanda Agregado de Petróleo: } \mathbf{O}_{i,t} =$$

$$E_{i,t} \left(\frac{P_{i,t} \lambda_1}{P_{i,t}^O} \right)^{\frac{1}{1-\rho}}, \quad (x.b) \text{ Demanda de tipo de Combustible: } e_{1,j,i,t} = \frac{\mathbf{O}_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^O l \lambda_{1,j}}{\widehat{p}_{1,j,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho_r}}, \quad (xi.b)$$

$$\text{Precio del Agregado de Energía: } P_{i,t} = \left((\lambda_1)^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{i,t}^O)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + \sum_{k=2}^n (\widehat{p}_{k,i,t})^{\frac{\rho}{\rho-1}} (\lambda_k)^{\frac{1}{1-\rho}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}, \quad (xii.b)$$

$$\text{Limpieza del mercado de energía exportada: } \sum_{prod} e_{5,i,t} = \sum_{i=2}^r \frac{\mathbf{O}_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^O l \lambda_{1,2}}{\widehat{p}_{1,2,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho_H}}.$$

Es importante recalcar que, para encontrar el equilibrio definido en la Proposición 3.2, al igual que en la extensión anterior, sólo es necesario resolver una ecuación algebraica para el precio del petróleo, que en este caso siguiendo la nomenclatura utilizada corresponde a $p_{1,t} = p_{1,1,i,t}$.

3.3. Exportación de Electricidad y Combustible Sintético

Sumado a los dos tipos de extensiones mostradas, es de gran interés poder evaluar los efectos de desarrollar ambos tipos de exportaciones simultáneamente. Por lo anterior, el equilibrio en este caso, dado que ya se definieron los nuevos tipos de energéticos y agregados energéticos, se resume en la siguiente Proposición.

Proposición 3.3 Si $u(c_{i,t}) = \ln(c_{i,t})$, $F_{i,t} = A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^\alpha E_{i,t}^\nu$, $\Phi_{i,t} = (\sum_{k=1}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho)^{\frac{1}{\rho}}$, $\delta = 1$, $\forall t$, y $\forall i \in \{1, \dots, r\}$ entonces el EW de la Definición 2.1 queda determinado por las Proposición 2.1, 3.1 y 3.2 donde el Precio del Agregado de Energía para las regiones que importan combustibles sintéticos y electricidad queda determinado por

$$(x.c) P_{i,t} = \left(\lambda_1^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{i,t}^O)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + \lambda_2^{\frac{1}{1-\rho}} (\widehat{p}_{2,i,t})^{\frac{\rho}{\rho-1}} + \lambda_3^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{i,t}^R)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}}$$

Capítulo 4

Calibración

Partimos definiendo que cada período de simulación corresponden a 10 años, hay $r = 8$ regiones que componen esta economía, que representan a Norte América, Europa, China, Asia del Sur, Asia Pacífico (sin contar China), Latinoamérica y una región productora de petróleo. Para las extensiones del modelo, asumimos que sólo Latinoamérica exportará energía a Norte América para el caso de exportaciones de electricidad, en cambio para las exportaciones de combustibles sintéticos, asumimos que Latinoamérica y Asia Pacífico pueden generar este combustible, según [27]¹, y que pueden exportarlo a todas las regiones del mundo.

En las siguientes subsecciones definimos el valor de los diferentes parámetros que utilizaremos para simular los escenarios de exportación de energía descritos anteriormente.

4.1. Formas funcionales de preferencias y tecnologías

Uno de los puntos centrales para derivar las Proposiciones 2.1, 3.1, 3.2 y 3.3 es el supuesto de utilidades logarítmicas, funciones de producción Cobb-Douglas y tasa de descuento igual a uno para el período de estudio. Con respecto a las utilidades logarítmicas, como fue mencionado anteriormente, este tipo de funciones corresponde a la familia de funciones CRRA con la elasticidad de sustitución intertemporal igual a uno, lo que para el horizonte de estudio de 10 años es una buena aproximación, no así si fuese un horizonte menor como para estudios de ciclo económico².

Por otro lado, con respecto a la tasa de descuento, un valor de $\delta = 1$ aun cuando el período sea de 10 años, sigue siendo un valor considerablemente alto, ya que por ejemplo, el horizonte de evaluación de proyectos energéticos es de 40 años. Sin embargo, en virtud de la solución analítica del modelo decidimos seguir con este supuesto.

Ahora bien, con respecto a la forma funcional de la función de producción, notemos que la función Cobb-Douglas es un caso especial de la una función CES³ cuando la elasticidad de sustitución es igual a uno. Lo que va en línea con [54], [16] y [13] donde argumentan que este tipo de modelación es correcta cuando la elasticidad de sustitución es menor uno para períodos cortos, pero en el largo plazo, una función Cobb-Douglas es una suposición razonable. Por tanto, siguiendo a [17] utilizamos $\alpha = 0.3$ y $\nu = 0.055$.

¹ Esto porque Chile y Australia son los grandes candidatos para desarrollar esta industria.

² Para este tipo estudios típicamente se utiliza una función de utilidad CRRA con una mayor curvatura. Como por ejemplo en [14] o para Chile en [35].

³ Función de producción con elasticidad de sustitución constante entre factores

Finalmente, existe una gran discusión dentro de la literatura relacionada al cálculo del *costo social del carbono* sobre el valor de la tasa de descuento intertemporal, ya que tiene efectos importantes en el valor de dicho costo⁴. Es por esto, que se distinguen dos enfoques principales, el primero de [53] y sus trabajos posteriores, que argumenta que la tasa de descuento debe ser de un 0% efectivo ($\beta = 1$), pero nosotros utilizaremos el enfoque de los trabajos de Nordhaus que utiliza una tasa de descuento del 1.5% por década, lo que corresponde a $\beta = 0.985$. Cabe destacar que como nuestro enfoque no es el cálculo del impuesto óptimo o costo social del carbono, utilizar una tasa de descuento menor sólo vendría a reforzar los resultados de largo plazo que se obtengan, lo que se discutirá en detalle en la Sección 5.

4.2. Sector Energético

En primer lugar asumiremos que existirán $n = 3$ tipos de energéticos para el caso sin exportaciones, los que corresponden a petróleo, carbón y energías renovables. A su vez, para las extensiones del modelo, asumiremos que sólo existirán dos tipos de energéticos para cada uno de los agregados de energía definidos, es decir, para el agregado de petróleo consideramos que estará compuesto por petróleo y combustibles y sintéticos, y para el agregado renovable será la composición entre la energía renovable doméstica e importada.

Con respecto a la función de agregación, utilizamos una elasticidad de sustitución igual a 0.95 de [52] que corresponde al promedio no ponderado entre las elasticidades de sustitución entre carbón-petróleo, carbón-electricidad y electricidad-petróleo, lo que implica que $\rho = -0.058$ ⁵. Además, como definimos el combustible sintético y la energía renovable exportada como sustitutos cercanos del petróleo y la energía renovable doméstica respectivamente, asumimos que $\rho_r = \rho_H = 0.2$.

Con respecto a las eficiencias relativas entre energéticos, utilizamos la condición (iv) de la Proposición 2.1 para obtener

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_k} = \left(\frac{e_{1,t}}{e_{k,t}} \right)^{1-\rho} \frac{p_{1,t}}{p_{k,t}} \quad (4.1)$$

por lo que tomando la demanda mundial por los diferentes energéticos y los precios de los combustibles fósiles de [11], junto el LCOE de las tecnologías renovables de [28] y el supuesto de que $\sum_k \lambda_k = 1$, obtenemos que $\lambda_1 = 0.434$, $\lambda_2 = 0.111$ y $\lambda_3 = 0.453$. Cabe destacar que la utilización del LCOE para parametrizar la función de agregación de energía es una mejora con respecto a los trabajos previos de [15], [17] y [19], ya que como se muestra en [28], los LCOE han podido ser una muy buena aproximación de los precios de despeje de las diferentes licitaciones de energía a nivel mundial. Por esto, es que en los trabajos mencionados se asumía arbitrariamente que el precio relativo entre el petróleo y el precio de la energía renovable es igual a uno. Lo que hacía que λ_3 , la eficiencia de la energía renovable, fuese menor y por ende sub-estimaban su aporte en la función de agregación.

Ahora bien, para las eficiencias relativas para el agregado de petróleo, utilizamos la misma metodología obteniéndose $\lambda_{1,petro,i,t} = 0.83$ y $\lambda_{1,sintetic,i,t} = 0.17$. Por otro lado, para el caso

⁴ Ver por ejemplo [29] que muestra diferentes resultados del costo social para diferentes valores de tasa de descuento.

⁵ $\rho = \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}$ con ε la elasticidad de sustitución.

del agregado renovable, debido a la no existencia de energía eléctrica exportada entre las regiones de involucradas, asumimos que poseen la misma eficiencia los dos tipos de energía renovable.

Finalmente, para determinar los precios de los energéticos, utilizamos el promedio de los últimos 10 años para los combustibles fósiles de [11], para el precio de las energías renovables lo obtenemos como el promedio simple de los LCOE para el año 2018 entre las tecnologías Hidráulica de pequeña escala⁶, Solar Fotovoltaica y Eólica Onshore⁷ tomados de [28], en tanto para el combustible sintético utilizamos el LCOE del Hidrógeno Verde tomado de [27] y el precio de la energía renovable exportada corresponde al promedio simple entre el precio de las energías renovables de las regiones involucradas, esto con el fin de incrementar el precio de la energía exportada con respecto a la consumida en la región exportadora, de manera de incluir los costos asociados al transporte de dicha energía. Cabe destacar, que como la unidad de medida de nuestro modelo son las toneladas de carbono equivalente, utilizamos la metodología propuesta por [15] de manera de utilizar las eficiencias energéticas de cada una de las tecnologías y el gasto asociado en términos de PIB por el sector energético para transformar los precios medidos en unidades típicas⁸ a unidades de carbono equivalente por unidades de PIB, por lo que el resumen de precios se adjunta en la Tabla B.4.

4.3. Clima y Función de Daños

Para el modelo del ciclo del Carbono, nos basamos directamente de lo propuesto en [15], por lo que $\phi = 0.0228$, $\phi_L = 0.2$ y $\phi_0 = 0.393$, donde además, la concentración de carbono en la atmósfera en el época pre-industrial es de 581 gigatoneladas de carbono (unidad de medida para esta variable de estado).

Por otro lado, con respecto a las emisiones, utilizamos $g_k = 1$ para los combustibles fósiles y $g_k = 0$ para las tecnologías renovables. Cabe destacar, que esta suposición asume que existe heterogeneidad en las emisiones por tipo de tecnología, ya que como se mencionó en la sección 4.2, los precios de los energéticos al estar medidos en unidades de bienes finales incluyen la eficiencia.

Ahora bien, con respecto al modelo de la temperatura, utilizamos directamente la parametrización utilizada en [41], por lo que $\sigma_1 = 0.098$, $\sigma_2 = 0.088$, $\sigma_3 = 0.025$, $\eta = 3.8$ y $\kappa = 1.31$. Finalmente, para parametrizar $\gamma_{i,t}$ seguimos a [19], donde proponen la siguiente forma funcional

$$\gamma_i = -\frac{\ln(1 - (\phi_{1,i}T + \phi_{2,i}T^2))}{S_0 \left(e^{\frac{T \ln(2)}{\xi}} - 1 \right)} \quad (4.2)$$

donde ξ es la sensibilidad climática, que es igual a $3^\circ C$ por cada vez que se duplique la concentración de carbono. Los valores de los parámetros de $\phi_{1,t}$ y $\phi_{2,t}$ se muestran en la Tabla B.1.

⁶ No cuenta las grandes centrales de embalse.

⁷ No consideramos las fuentes eólicas offshore por la poca participación en la matriz energética mundial.

⁸ Unidades Métricas del Energético
Unidades Monetarias

4.4. Condiciones Iniciales y de Largo Plazo

Para parametrizar los valores iniciales de las variables del modelo utilizamos la metodología propuesta en [43]⁹, lo que consiste en tomar las variables con un período de rezago (10 años para nuestro modelo) y dejar el nivel de productividad libre, de tal forma de fijar el nivel de productividad inicial para el que el modelo prediga correctamente los valores de las variables de estado en el período inicial. De esta forma los valores de las productividades iniciales se muestran en la Tabla B.2. Para este ejercicio utilizamos los valores de producto medido USD corriente del 2010, y la población activa como porcentaje de la población actual para todas las regiones tomados de [61]. Esta población evoluciona como se describe en las ecuaciones (2.5) y (2.6), donde $g_{L,t}$ evoluciona según

$$g_{L,t+1} = g_{L,t} - a(g_{L,t} - g_{L,BGP}) \quad (4.3)$$

donde $g_{L,0} = 0.08$, $a = 0.4$ y $g_{L,BGP} = 0$ que corresponde a la tasa de crecimiento de la población a largo plazo o en una trayectoria de crecimiento equilibrado. Esta parametrización está en línea con el informe [59] que proyecta una población de 9,7 mil millones en 2050 y 11 mil millones en 2100.

Otro punto importante de parameterizar, cómo evolucionarán las productividades de las regiones en el largo plazo en el senda de crecimiento balanceado (BGP). Para esto, siguiendo el desarrollo de [19] proponemos la existencia de una productividad efectiva $z_{i,t}$ y una productividad para la BGP $\hat{z}_{i,t}$ de tal forma que evolucionan de la siguiente forma

$$z_{i,t+1} = z_{i,t} + 10 \ln(g_{ABGP,i}) + \frac{1}{4}(\hat{z}_{i,t} - z_{i,t}) \quad (4.4)$$

$$\hat{z}_{i,t+1} = \hat{z}_{i,t} + 10 \ln(g_{ABGP,i}) \quad (4.5)$$

donde $g_{ABGP,i}$ es la el crecimiento de la productividad en BGP que asumiremos $g_{ABGP,i} = 2\% \forall i$ siguiendo [15]. Las ecuaciones (4.4) y (4.5) describen que las regiones van *cerrando la brecha* con respecto a la BGP, por lo que regiones que estén más alejadas de dicho estado, tendrán mayores crecimientos de productividad, y por ende, mayores crecimientos del producto. Esto está en línea con los modelos neoclásicos de crecimiento [51] y [56], como también con el concepto de convergencia propuesto en [9].

Por otro lado, para parametrizar las productividades iniciales en la BGP para las diferentes regiones, asumimos que la productividad inicial de la región de Norte América se encuentra a un 10% por sobre la productividad efectiva. A su vez, asumimos que las demás regiones sólo cerrarán un cierto porcentaje de la productividad de Norte América como se muestra en la Tabla B.3¹⁰.

⁹ Para un mayor detalle revisar el Capítulo 3

¹⁰ Esto está en línea con lo propuesto en [43]

Capítulo 5

Resultados

En esta sección presentamos los resultados obtenidos para el modelo y parametrización expuestos anteriormente. Para esto, partimos por caracterizar los diferentes escenarios de evolución de la economía global, para luego mostrar los resultados cuantitativos para dichos escenarios y diferentes niveles de impuestos.

5.1. Definición de Escenarios

Un punto central para nuestro estudio, es saber como evolucionará el ambiente de nuestro modelo, para lo cual, hemos definido tres variables que permitirían caracterizar de buena manera los diferentes escenarios futuros para nuestro ambiente, los cuales corresponden al nivel de impuestos por región, precio de las energías renovables y precio del carbón¹.

5.1.1. Nivel de Impuesto

Una característica importante que define la evolución de la economía corresponde a la capacidad que tienen los agentes de internalizar la externalidad negativa de utilizar energías que produzcan emisiones de carbono. Para lo cual, el primer posible escenario es la definición de un impuesto que permita hacer una asignación eficiente de los recursos, es decir, siguiendo [15], definimos un impuesto a todas las regiones de tal forma que permita una reasignación que es equivalente a la de un planificador social que internaliza la externalidad, es decir, una asignación pareto eficiente². Específicamente, corresponde a un impuesto $\tau_{i,2020}$ que satisface

$$\tau_{i,2020} = \tau_{2020} = \gamma \hat{Y}_{i,2020} \left[\frac{\phi_L}{1 - \beta} + \frac{(1 - \phi_L)\phi_0}{1 - (1 - \phi)\beta} \right] = 85 [USD/tC] \quad (5.1)$$

¹ En teoría el precio del petróleo debería considerarse también dentro de las variables de interés que definen la evolución del ambiente, pero recordemos que el precio del petróleo es endógeno en nuestro modelo, como se discutió en la Sección 2

² El modelo utilizado en [15] corresponde a una economía global, por esta razón, el impuesto es el mismo para todas las regiones. Además, la derivación de ese impuesto es con una retribución a suma alzada y no como un amplificador del ingreso como en la ecuación (2.15), pero como los ingresos potenciales de estos impuestos serían muy pequeños, y por ende el amplificador, las diferencias cuantitativas no serán de importancia.

y que crece a una tasa del 2.2% anual, que es aproximadamente la tasa de crecimiento promedio del producto anual.

Por otro lado, puede ser difícil para las regiones menos desarrolladas a nivel mundial implementar un impuesto al carbono tan altos³. Es por esto, que el segundo escenario consiste en un impuesto heterogéneo por regiones, que corresponde específicamente a un impuesto igual a la mitad del óptimo para Latinoamérica, África y Asia del Sur, y un impuesto óptimo para las demás regiones. Finalmente, el tercer escenario posible es el caso en que no se apliquen impuesto a nivel mundial.

5.1.2. Precio Energía Renovable

Junto con la aplicación de impuestos al carbono, la reducción de los costos de producción para los diferentes tipos de energía renovable pueden ayudar a fomentar un cambio en la matriz energética a nivel mundial, y por ende, ayudar a combatir el cambio climático. Es por esta razón, que un escenario para el precio de las energías renovables es el que responde a la siguiente ecuación

$$p_{i,k,t+1} = p_{i,k,t}(1 + g_{k,t})^t \quad (5.2)$$

$$g_{k,t+1} = g_{k,t} - b(g_{k,t} - g_{k,\infty}) \quad (5.3)$$

donde $p_{i,k,t}$ y $g_{k,t}$ son el precio y tasa crecimiento del energético k en el tiempo t , con $g_{k,\infty}$ la tasa de crecimiento en largo plazo de la tecnología k , que asumiremos igual a cero para todas las tecnologías, y b la fracción que período a período se va cerrando de la brecha entre las tasas de crecimiento.

Específicamente, para el primer escenario se como el precio bajo, lo que significa que la tasa de crecimiento será de un -20% por década⁴ y un cierre de brecha igual a $b_1 = 1/3$ para las energías renovables domésticas y la exportada mediante electricidad, y $b_2 = 1/4$ para el combustible sintético. Lo anterior es para rescatar el nivel de madurez de las tecnologías, ya que el combustible sintético al ser una tecnología relativamente nueva, le faltan más años para llegar a la tasa de crecimiento de largo plazo $g_{k,\infty}$.

Finalmente, al igual que para el nivel de impuesto, otro escenario se caracterizará por no tener un decrecimiento del precio, es decir, $g_{k,t} = 0 \forall t, k$.

5.1.3. Precio del Carbón

Sumado a las dos variables descritas anteriormente, la evolución del precio del carbón podría afectar la efectividad del decrecimiento de precios de las energías renovables como herramienta para frenar el cambio climático. Es por esta razón que un primer escenario utilizamos la misma dinámica para el precio de las energías renovables, descritas en (5.2) y (5.3), donde específicamente utilizaremos una tasa de crecimiento del 5% por década y valor de $b = 1/10$.

Cabe destacar que asumir que el precio del carbón vaya subiendo un 5% por década, no quiere decir que su valor incremente en términos nominales (USD/tonCarbón), sino que dado

³ Cabe destacar en países de Latinoamérica, África o Asia del Sur sólo algunos países tienen impuestos a las emisiones, y si las tienen, no superan los 10[USD/ton C_{eq}] como se muestra en [21].

⁴ Lo que equivale a una disminución del 2% anual.

que el valor está medido en unidades de bienes finales, y las firmas van incrementando su productividad, el aumento de precio vendría a ser un estancamiento, o crecimiento en menor medida, de su productividad con respecto al de las firmas de bienes finales.

5.1.4. Escenarios

Dados los posibles escenarios para las variables descritas, se pueden generar 12 escenarios posibles. Sin embargo, para nuestro trabajo sólo analizaremos los siguientes 5 escenarios:

1. *Business as Usual*: Corresponde al escenario caracterizado por precios de energías renovables y carbón constantes y sin impuestos por región.
2. *Desarrollo Renovable*: Este escenario se caracteriza por precio de energías renovables bajo, precio del carbón constante y sin impuestos por región.
3. *Masificación Renovable*: Este escenario, aparte de un precio bajo para las energías renovables se caracteriza por un precio alto del carbón y sin la aplicación de impuestos.
4. *Impuesto Global Óptimo*: Como su nombre lo dice, este escenario se caracteriza por aplicar el impuesto óptimo definido en la Sección 5.1.1, junto con un precio bajo para las energías renovables y un precio constante para el carbón.
5. *Impuesto Heterogéneo*: Se caracteriza de la misma forma que el escenario de anterior, sólo que con el impuesto heterogéneo por región que definimos en la Sección 5.1.1.

5.2. Resultados de Escenarios

En esta sección mostramos los resultados climáticos y económicos de realizar diferentes tipos de exportaciones de energía renovable desde Latinoamérica hacia las demás regiones del mundo, en los posibles escenarios futuros. En primer lugar, la Figura 5.1 muestra la evolución del aumento de la temperatura con respecto al período pre-industrial para cada uno de los escenarios, donde se puede observar el primer resultado importante de este estudio, que corresponde a que la exportación de energía renovable, ya sea como interconexiones eléctricas o combustibles sintéticos, no soluciona el problema del cambio climático, sino que incluso puede agravar el problema, como es el caso para los escenarios *Business as Usual* y *Renewable Development*.

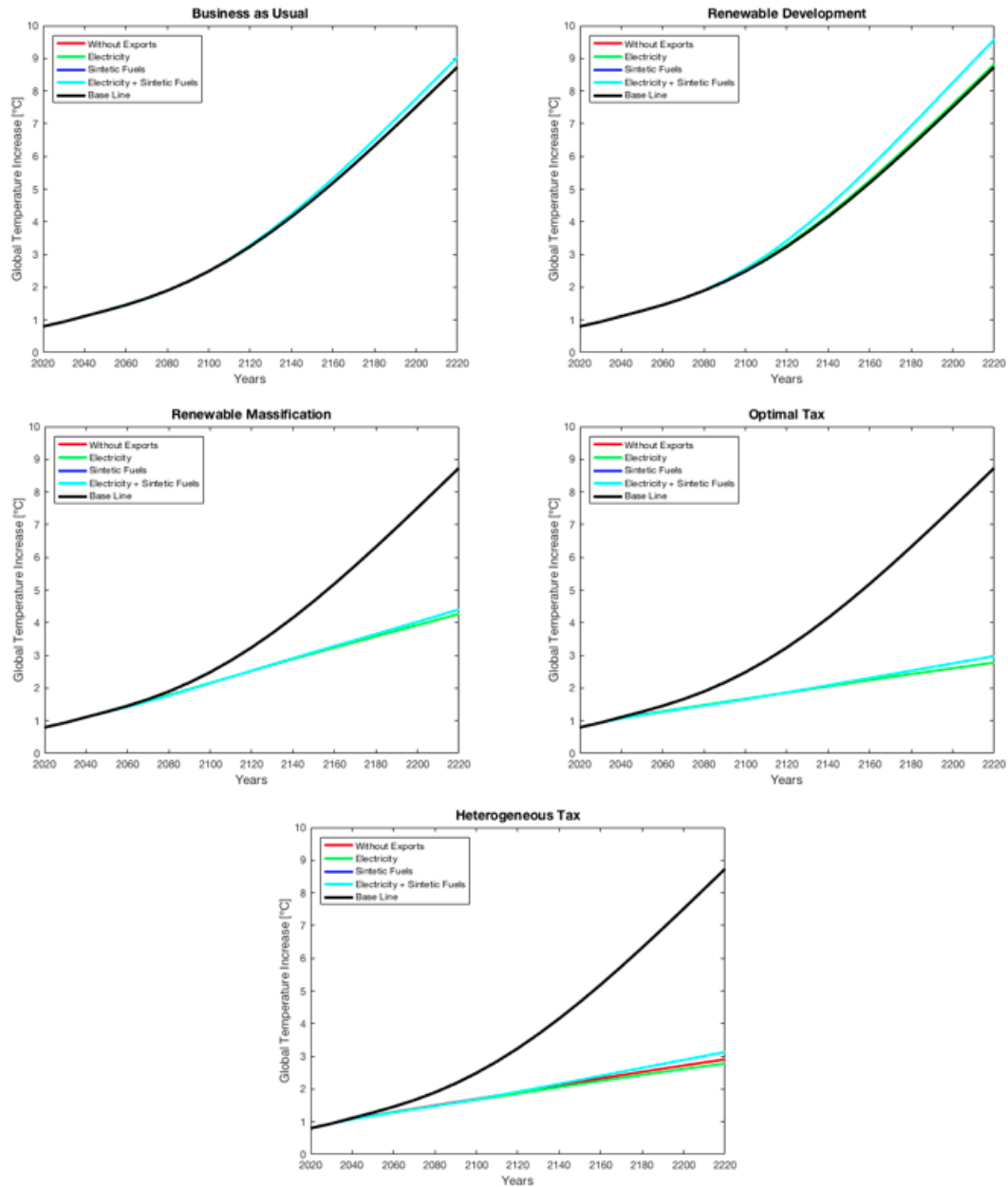


Figura 5.1: Resultados climáticos.

Sin embargo, y en línea con [15], [29] y [19], podemos ver la efectividad que tienen los impuestos en la lucha contra el cambio climático, donde tanto para el escenario *Optimal Tax* y *Heterogeneous Tax* se logra reducir considerablemente el aumento de la temperatura a nivel global. En esta línea, no existen grandes diferencias en la evolución de la temperatura para dichos escenarios debido a que los principales contaminantes a nivel mundial son las regiones de Norte América, Unión Europea y China, que para el escenario *Heterogeneous Tax* siguen con el nivel de impuesto óptimo.

Por su parte, observando los resultados del escenario *Renewable Massification* podemos ver que el aumento del precio del carbón en un 5% por década genera resultados que son equivalente a la aplicación de un impuesto, por tanto, dado que la evolución de precios es exógena, da pie para extender el marco metodológico descrito en la Sección 2, para desarrollar

un modelo de crecimiento endógeno en línea con [49], y así poder entender las causas que permiten tener dicha evolución de precios, como también el diseño de instrumentos de mercado que permita internalizar la externalidad positiva de la inversión en $I+D$ en las firmas⁵.

Estos resultados se tienen ya que al incluir estos nuevos energéticos exportables predomina el efecto ingreso versus el efecto sustitución en las decisiones de optimización de las firmas agregadoras de energía, lo que va en línea con [17], [19] y [22]. Lo anterior se tiene ya que el precio agregado de la energía $P_{i,t}$ en cualquiera de los casos anteriormente definidos, disminuye al incluir estos energéticos exportables, lo que genera un aumento en la cantidad de energía agregada demandada $E_{i,t}$, lo que a su vez, genera una mayor demanda de todos los tipos de energía, incluyendo los combustibles fósiles contaminantes. Lo que finalmente se traduce en que cambia la composición de la matriz energética global a una más renovable, pero en términos absolutos la cantidad de combustibles fósiles utilizados es mayor al caso sin exportaciones cuando no se encarece el costo de estos.

Por otro lado, la Figura 5.2 muestra los resultados económicos globales⁶ para los casos expuestos anteriormente. El eje vertical muestra el porcentaje de consumo de bienes finales con respecto al caso sin exportaciones⁷, por lo que valores mayores a un 100 % corresponden a ganancias económicas y el caso contrario para valores menores a 100 %. Además, las líneas punteadas corresponden a los mismos resultados sólo que en el caso que el desarrollo de las exportaciones se retrase 50 años⁸.

⁵ Típicamente un subsidio, ya que bajo nuestro ambiente implementar un subsidio a las energías renovables sería análogo a una reducción de precios que ya se mostró que no tienen efectos climáticos.

⁶ Entiéndase global como la suma no ponderada de todas las regiones.

⁷ Las curvas cafés que corresponden al caso sin exportaciones por lo que las curvas son horizontales e igual al 100 %.

⁸ Cabe destacar que no se observaron diferencias en las curvas que describen la evolución temporal para temperatura en los diferentes escenarios (Figura 5.1), por esta razón no se incluyeron las líneas punteadas en los gráficos.

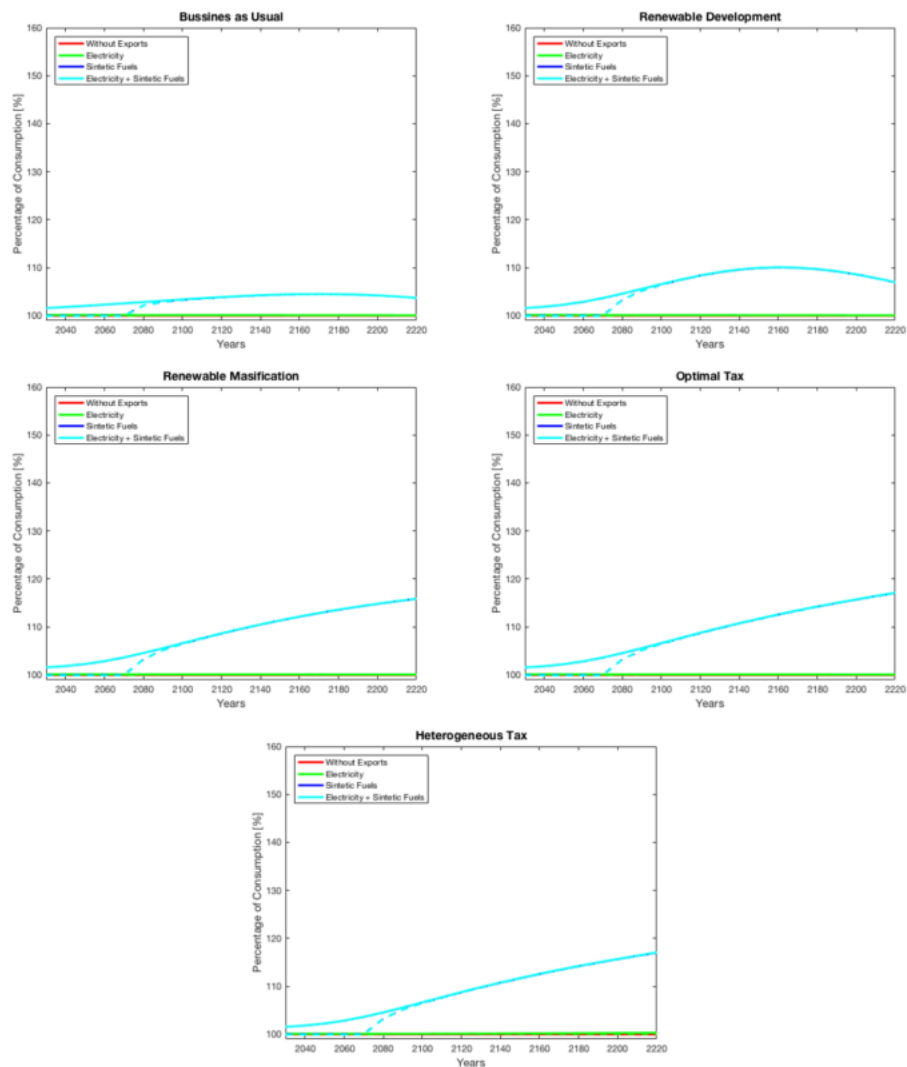


Figura 5.2: Resultados económicos.

De la Figura 5.2, podemos ver que la exportación de electricidad entre Latam y EEUU, tiene nulos efectos en el bienestar agregado con respecto al caso sin exportaciones en los primeros 100 años, y que estos se mantienen prácticamente constantes en el período de evaluación, independiente del escenario futuro. Por otro lado, podemos ver que para todos los casos la exportación de combustibles sintéticos y de ambos tipos de exportación al mismo tiempo, genera beneficios tanto en el corto como largo plazo a nivel global, en donde en el escenario *Desarrollo Renewable* se produce una reducción en los posibles beneficios económicos de largo plazo, llegando a un máximo en aproximadamente en el año 2150.

Este fenómeno de largo plazo se deben a que como vimos en la Figura 5.1, la exportación tanto de electricidad como de combustibles sintéticos aumenta la temperatura a nivel global si es que no se produce un aumento del precio de los combustibles fósiles, ya sea exógenamente como en el escenario de *Masificación Renewable* o mediante la aplicación de impuestos, y por tanto, aumenta el factor γ_i para todas las regiones lo que disminuye la productividad agregada de las regiones según la ecuación (2.20) generando una disminución en la producción y por tanto en el consumo de bienes finales.

A su vez, el retraso en la implementación de las exportaciones generaría una pérdida del beneficio potencial que se podría obtener no sólo en los años en que se retrasaron la implementación de exportaciones, sino que en los siguientes 20 años debido a que la dinámica de ajuste del capital no es instantánea.

Es importante recalcar, que los beneficios económicos mostrados anteriormente son la suma no ponderada de los beneficios de cada una de las regiones que componen esta economía, por lo que las ganancias y/o pérdidas que se generan no son las mismas para todas regiones. Esto se ve en las Figuras C.1 - C.7 de la sección de anexos, que muestran los beneficios económicos obtenidos para todas las regiones de forma particular.

Como se puede apreciar en estos gráficos, todos siguen el mismo comportamiento descrito anteriormente para los beneficios económicos globales, pero podemos observar que el nivel de beneficios obtenidos difiere entre regiones. Por ejemplo, para las regiones de LATAM y América del Norte, se puede ver que existen beneficios económicos considerables a corto plazo por tener exportaciones de electricidad.

Sumado a lo anterior, dado el carácter exportador de LATAM, los beneficios económicos son 6 veces mayores en relación a los beneficios globales para los primeros 100 años del horizonte de estudio, y 2,7 veces mayores para el resto del horizonte. Este no es el caso de la región Asia-Pacífico, que, si bien sus beneficios económicos aumentan en relación con los beneficios globales, lo hacen solo 2 veces durante los primeros 100 años y 1,3 veces durante el resto del período. Esto se debe a que el aumento del consumo derivado del ingreso extra por exportaciones, que es igual para ambas regiones, corresponde a una proporción menor para Asia Pacífico que para LATAM dado su nivel inicial de desarrollo y consumo.

Por otro lado, si bien hemos desarrollado y mostrado argumentos a favor de la efectividad climática y económica de la aplicación de impuestos a las emisiones, queremos enfatizar que esta no es la única forma de lograr resultados económicos y climáticos favorables a largo plazo.

Esto se debe a que la forma en que se construyó el impuesto pigouviano de acuerdo con las ecuaciones (2.14) y (2.15), solo tiene efectos sobre la preferencia de los tipos de combustible y no sobre la riqueza de los hogares, por lo que una política de naturaleza regulatoria como la prohibición de la operación de industrias basadas en combustibles fósiles tendría efectos análogos a los del impuesto, excepto que la naturaleza *óptima* del instrumento no sería tan directa.

Por lo tanto, aunque la exportación de energía renovable desde América Latina y/o Asia Pacífico a otras regiones del mundo no resuelve por sí sola el problema del cambio climático, si se combina con otras políticas públicas orientadas a reducir el uso de combustibles fósiles, se obtendrán escenarios virtuosos en los que se reduzca el calentamiento global junto con un aumento del bienestar económico no solo para las regiones exportadoras sino para todas las regiones del mundo.

Capítulo 6

Análisis de Sensibilidad

6.1. Diferentes Niveles de Impuesto

Como se mostró en el capítulo anterior, la combinación de exportaciones de energía renovable en conjunto con la aplicación de impuestos para todas las regiones generan escenarios de considerables ganancias económicas y reducción de la temperatura a nivel global. Es por esto que en esta sección queremos evaluar cuales serán los resultados ambientales y económicos si se aplican diferentes niveles de impuesto para el escenario *Desarrollo Renovable*.

Específicamente consideramos impuestos homogéneos para todas las regiones partiendo con $\tau_{i,0} = \tau_0 = 0$ hasta $\tau_0 = 250[USD/tC]$, incrementando $5[USD/tC]$ en cada simulación¹. Además nos definimos el beneficio económico ΔW_t^x al año t de realizar el tipo de exportación x como la diferencia medida en porcentajes entre el valor presente de los consumos al año t de realizar la exportación de energía de tipo x con respecto al valor presente de los consumos al no realizar exportaciones de energía (SE), matemáticamente corresponde a

$$\Delta W_t^x = \frac{VPC_t^x - VPC_t^{SE}}{VPC_t^{SE}} \quad (6.1)$$

con

$$VPC_t^i = \sum_{j=2020}^t \beta^{j-2020} \sum_k C_{j,k}^i \quad (6.2)$$

donde i representa el tipo de exportación a realizar, con NE en el caso de no exportar, k es la región, j el año correspondiente y los resultados se muestran en la Figura 6.1. Los ejes corresponden al aumento de la temperatura, el beneficio económico medido en valor presente definido en (6.1) y el nivel de impuesto, donde se destaca en rojo el nivel de impuestos óptimos (5.1).

¹ Cabe destacar que todos los impuestos siguen el mismo comportamiento del impuesto óptimo propuesto por [15], es decir, parten en los diferentes valores mencionados y crecen a una tasa del 2.2% anual.

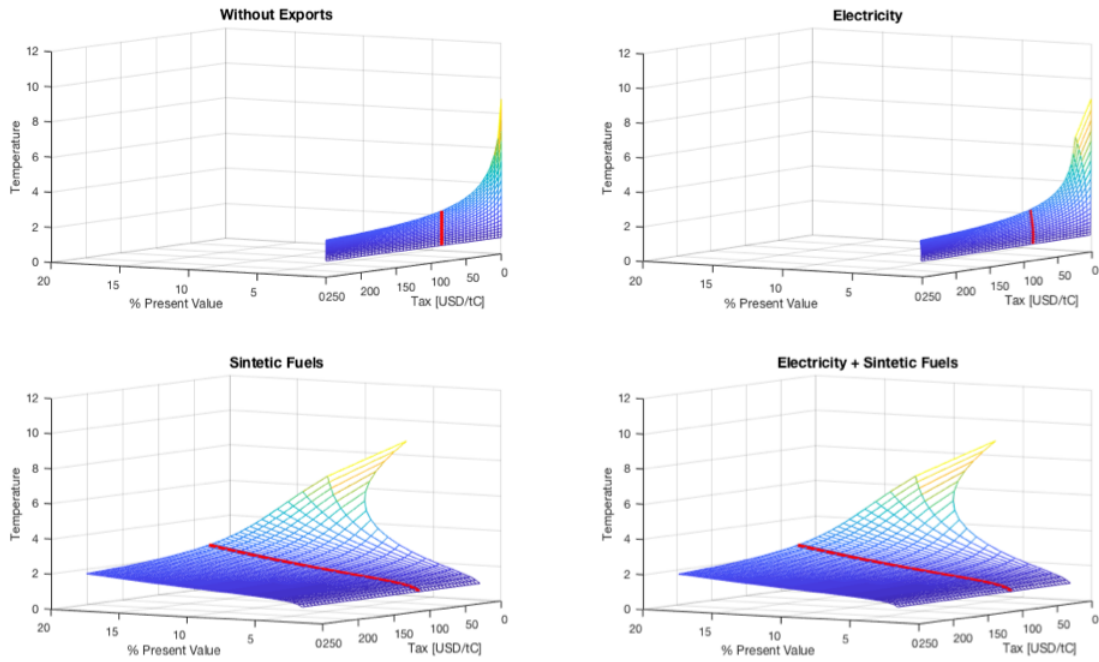


Figura 6.1: Resultados globales para diferentes niveles de impuestos.

Con respecto al análisis de la temperatura, podemos observar como el ir incrementando el nivel de impuestos genera una reducción en el incremento de la temperatura a largo plazo, independiente del tipo de exportación que se haga, pero que el beneficio marginal² es decreciente, por lo que hace sentido que el impuesto óptimo coincida con el momento en el que el beneficio marginal es cercano a cero. Por otro lado, podemos ver que la aplicación de diferentes niveles de impuestos no tiene efectos en el corto plazo, lo que vuelve a poner en discusión, el carácter intergeneracional del problema climático.

Con respecto a los beneficios económicos, podemos ver que prácticamente no hay diferencias para el caso de Exportaciones Eléctricas, ya que debido a que su beneficio marginal es prácticamente constante como se ve en la Figura 5.2. Ahora bien, podemos ver para el caso de las exportaciones de combustibles sintéticos, como para ambos tipos de exportaciones, si existen beneficios económicos al aplicar niveles de impuestos mayores, donde nuevamente el beneficio marginal es decreciente y se tiene el mismo análisis expuesto anteriormente para el impuesto óptimo.

Estos resultados los podemos ver para años específicos como se muestra en la Figura 6.2, en donde se muestran en el eje vertical el aumento de la temperatura y en el eje horizontal el beneficio económico para los diferentes tipos de exportación en los años 2070, 2120, 2170 y 2220. Además, cabe destacar los puntos superiores de cada curva corresponden a los casos en que se parte con $\tau_0 = 0$, los puntos intermedios corresponden a ir incrementando el valor inicial en $5[USD/tC]$ hasta $200[USD/tC]$ y los puntos destacados corresponden al nivel de impuesto óptimo de $85[USD/tC]$.

² Entiéndase Beneficio Marginal como la reducción de temperatura adicional por aumentar el nivel de impuesto.

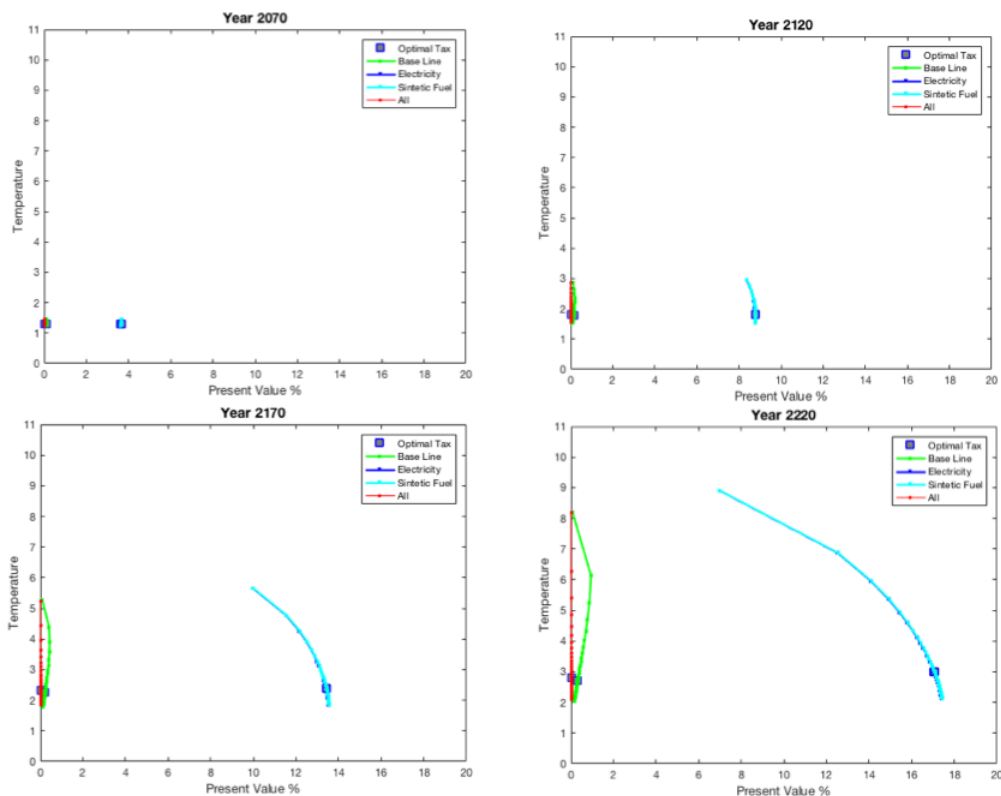


Figura 6.2: Resultados globales para diferentes niveles de impuestos por año

Podemos ver que para los 50 primeros años, y en línea con lo expuesto anteriormente, no se generan cambios sustanciales en el aumento de la temperatura ni en los beneficios económicos, no así para los siguientes años donde la aplicación de diferentes niveles de impuesto, si bien tienen un pequeño efecto en la disminución de la temperatura y bienestar económico, genera grandes beneficios a los 200 años tanto climáticos como económicos, independiente de la decisión de exportación de energía.

Ahora bien, podemos ver como la *estrategia* de exportación de ambos tipos de energéticos renovables *domina* a las estrategias de sólo exportaciones de electricidad o sin exportaciones. Esto se puede ver ya que los mejores resultados se ubican en la esquina inferior derecha (menor aumento de temperatura y mayor beneficio económico) en donde para el mismo impuesto no se ven diferencias sustanciales en el aumento de la temperatura pero si en los beneficios económicos tanto de corto plazo (aumento de un 4%) como de largo plazo (aumento de casi 18%).

Finalmente, cabe señalar que, al igual que en la sección ref Sec: Result, se tiene la misma conclusión de *dominancia* de la estrategia de ambas exportaciones, cuando se combina con una política de reducción de emisiones equivalente a la aplicación de impuestos. Por lo tanto, este análisis podría verse como un análisis para diferentes niveles de reducción de emisiones en lugar de una discusión a nivel de impuestos.

6.2. Análisis de Robustez

Hasta el momento, toda la descripción que ha hecho se basa en un modelo neoclásico determinístico en donde los precios de los energéticos, a excepción del petróleo, evolucionan de manera exógena. Además, hay ciertos parámetros del modelo que no hay un acuerdo certero en cuanto a sus valores, como por ejemplo, la elasticidad de sustitución entre energéticos, que según [52] es igual a 0.95, en cambio [46] utilizando datos de panel sectoriales entre países argumentan que dicha elasticidad de sustitución debería ser mayor a la unidad y cercana a 1.25.

Esta estocacidad entre las posibles evoluciones de los precios de los energéticos, sumada a la estocacidad de los parámetros estructurales del modelo, podrían cambiar las decisiones de inversión de los agentes. Por tanto, dada el buen desempeño computacional del modelo que se ha desarrollado³ una alternativa para entender como afectaría esta estocacidad a la evolución de la temperatura y los posibles beneficios económicos de realizar exportaciones de energía es mediante la realización simulaciones de montecarlo.

Estas simulaciones corresponden a sortear las realizaciones de las variables estocásticas estructurales del modelo al comienzo de cada simulación, y sortear período a período las posibles evoluciones de los precios de los energéticos. Las variables que incluimos en este análisis como el tipo de estocacidad, como distribuye y la forma en que evolciona se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Parámetros Estocásticos

Parámetros	Función	Distribución	Media	σ_i
Elasticidad de Sustitución	$\rho = \bar{\rho} + \varepsilon_1$	Normal	0	0.05
Eficiencia Relativa Energéticos	$\lambda_2 = \bar{\lambda}_2 - \varepsilon_2$ $\lambda_3 = \bar{\lambda}_3 + \varepsilon_2$	Normal	0	0.005
Crecimiento de largo plazo de $A_{t,i}$	$g^{A_{i,L,P}} = \bar{g}^{A_{i,L,P}} + \varepsilon_3$	Normal	0	0.02
Productividad Inicial Asintótica	$\hat{z}_{i,0} = \bar{z}_{i,0} + \varepsilon_4$	Normal	0	0.005
Crecimiento de la Población	$g_L = \bar{g}_L + \varepsilon_5$	Normal	0	0.001
Decrecimiento Precio Energía Renovable	$g_{p_3} = \bar{g}_{p_3} + \varepsilon_{6,t} + 0.2\varepsilon_{6,t-1}$	Normal	0	0.02
Decrecimiento Precio Electricidad Exportable	$g_{p_4} = \bar{g}_{p_4} + \varepsilon_{7,t} + 0.2\varepsilon_{7,t-1} + \varepsilon_{6,t} + 0.2\varepsilon_{6,t-1}$	Normal	0	0.01
Decrecimiento Precio Combustibles Sintéticos	$g_{p_H} = \bar{g}_{p_H} + \varepsilon_{8,t} + 0.2\varepsilon_{8,t-1} + \varepsilon_{6,t} + 0.2\varepsilon_{6,t-1}$	Normal	0	0.01

Ahora bien, antes de mostrar los resultados obtenidos es necesario mencionar que la metodología de simulaciones de montecarlo no es robusta frente a la *Crítica de Lucas* [33]⁴, por lo que los hogares podrían tener ahorro precautorio para cubrirse de esta estocacidad cambiando la función de política de las proposiciones anteriores y preferir tecnologías maduras como las fósiles para suavizar su curva de consumo. Sin embargo [42] utiliza esta metodología en un modelo RICE para encontrar intervalos de confianza para el costo social del carbono,

³ Recordar que la solución en cada período del tiempo, independiente de los escenarios y del tipo de exportación que se esté estudiando, corresponde a resolver una ecuación algebraica que limpia el mercado del petróleo.

⁴ Dado que los hogares son adversos al riesgo, es decir las funciones de utilidad son cóncavas se tiene

$$\underbrace{\max_{\{c_t\}_{t=0}^{\infty}} \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(\mathbb{E}_t[c_t])}_{\text{Caso Actual con Simulaciones de Montecarlo}} \leq \underbrace{\max_{\{c_t\}_{t=0}^{\infty}} \mathbb{E}_0 \left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t) \right]}_{\text{Caso Robusto a la Crítica de Lucas}}$$

como también el modelo neoclásico de crecimiento con shocks de productividad estocásticos propuesto por [12] que bajo los mismos utilizados⁵ también se tiene una tasa de ahorro constante para todos los períodos. Por lo anterior, es que consideraremos los resultados obtenidos como un equivalente cierto del problema que es robusto a la *Crítica de Lucas*.

Para nuestros resultados usamos una cantidad de $n = 1.000$ simulaciones de montecarlo en donde los resultados se muestran en la Figuras 6.3 y 6.4. Estas Figuras muestra como evoluciona la temperatura bajo los diferentes escenarios de exportación para los casos sin y con impuesto óptimo respectivamente, donde las curvas azules representan la media de las temperaturas temporales y las curvas naranjas muestran el espacio de posibilidad resultados al 99 %⁶

De la Figura 6.3 podemos ver que se sigue manifestando la predominancia del efecto ingreso sobre el efecto sustitución en la exportación de energía renovable, ya que tanto los valores medios como las bandas de estocacidad para las exportaciones de energía renovable son mayores al caso sin exportaciones. Además, podemos observar que en los 100 primeros años la banda de estocacidad es muy pequeña, no así en el largó plazo, donde dependiendo del escenario la banda de posibilidades para la temperatura puede oscilar entre 4 a 5 grados Celcius.

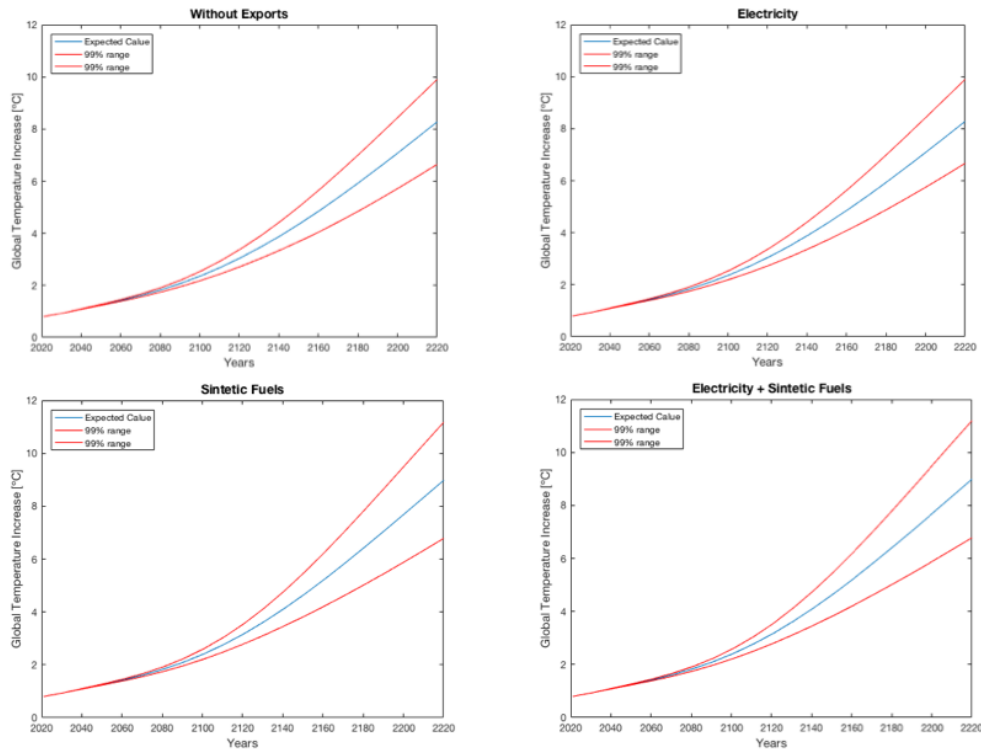


Figura 6.3: Resultados Simulaciones de Montecarlo - Evolución de la Temperatura sin Impuestos

Por otro lado, en la Figura 6.4 podemos ver que además de ser efectivo el impuesto en

⁵ Utilidad logarítmica y tasa de depreciación unitaria

⁶ Esto se hace asumiendo que los resultados distribuyen de forma normal, por lo que se calcula la desviación estándar para cada uno de los períodos, para posteriormente sumar y restar 3 veces este valor a la media para obtener las curvas naranjas.

reducir la temperatura promedio en el largo plazo para todos los escenarios, reduce considerablemente las banda de posibles resultados para la evolución de la temperatura para todos los escenarios de exportación. Así es como la banda de posibilidades se reduce de 4 a sólo 1 grado Celcius para el caso sin exportaciones y con exportaciones de electricidad, y de 5 a sólo 2 grados celcius para las exportaciones de combustibles sintéticos y de ambos tipos.

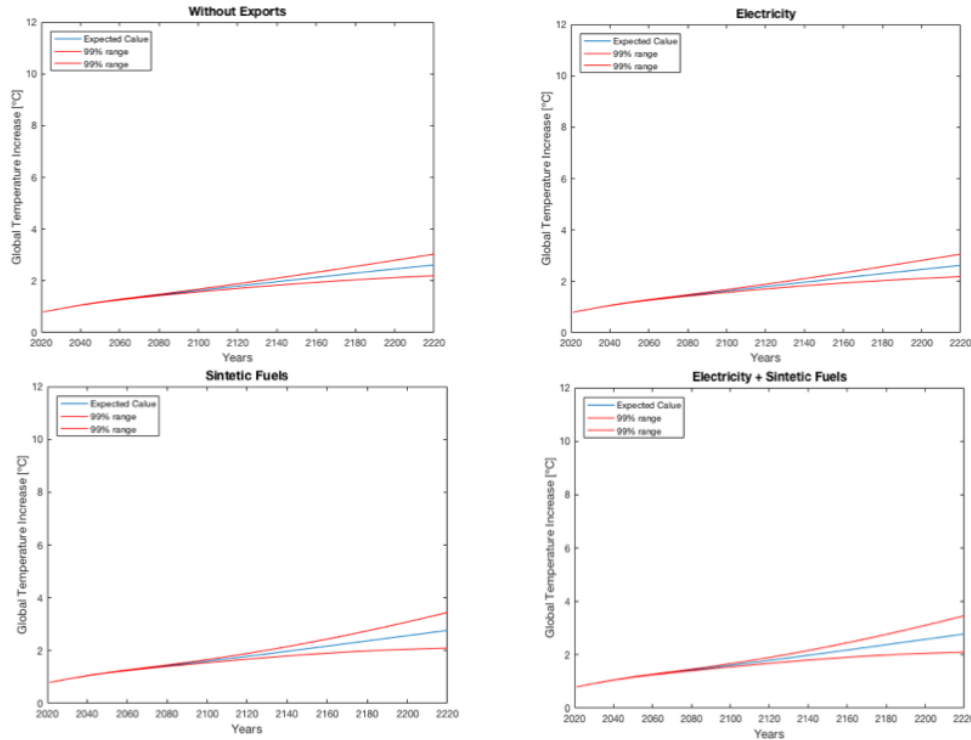


Figura 6.4: Resultados Simulaciones de Montecarlo - Evolución de la Temperatura con Impuestos

Los resultados anteriores vuelven a reforzar la idea de la aplicación de un impuesto a nivel global, ya que independiente de los posibles de evolución de los precios o de los parámetros estructurales del modelo, al aplicar este instrumento no sólo se reduce el valor promedio de la temperatura sino que sirve de seguro frente a la estocasticidad de las posibles realizaciones de las variables aleatorias que podrían originar escenarios en la se intensifiquen los efectos negativos en el medio ambiente.

Además de lo anterior, la Figura 6.5 muestra como evoluciona la participación promedio de las energías renovables⁷ en la matriz energética mundial y la volatilidad de esta, para el caso sin impuestos (líneas continuas) y con impuestos (líneas punteadas). Como era de esperarse, la aplicación del impuesto acelera y aumenta la participación de la energía renovable para todos los escenarios de exportación, pero a su vez, disminuye considerablemente la volatilidad de este valor.

⁷ Entiéndase energía renovable como la suma de la energía renovable producida en cada región y la exportaciones de electricidad y combustibles sintéticos.

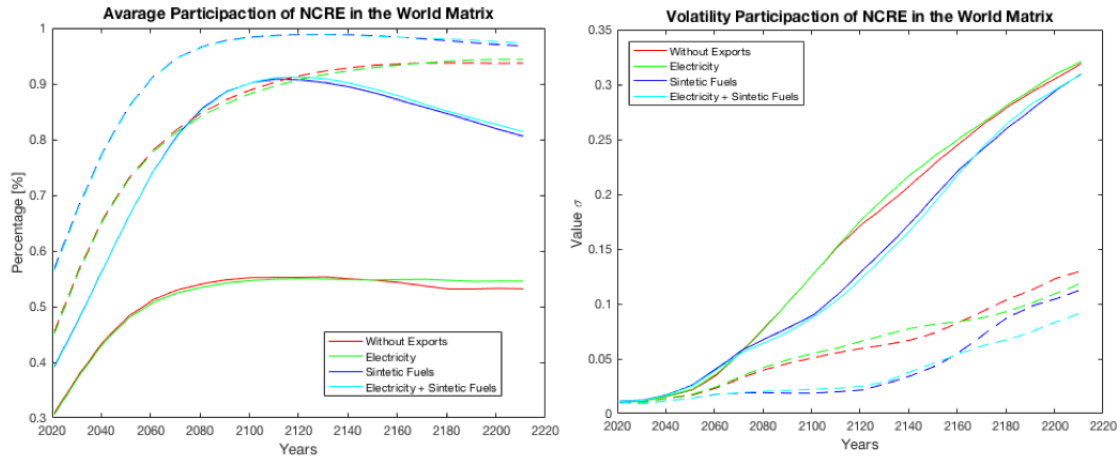


Figura 6.5: Evolución de la composición promedio y volatilidad de la matriz energética mundial

Este resultado indica que bajo la aplicación del impuesto, las tecnologías renovables son robustas frente a los posibles escenarios futuros, por lo que daría certeza a los agentes a invertir en este tipo de tecnologías. Esto está en línea con los resultados de los modelos de crecimiento endógeno propuestos por [1], [2], [3], [4], [5] y [19], en donde argumentan que la aplicación de impuestos a las emisiones permite redirigir el cambio tecnológico hacia tecnologías limpias.

A su vez, y en línea con análisis anteriores, no solo la aplicación de impuestos pigouvianos permitiría reorientar el cambio tecnológico, o en su defecto, la inversión en tipos de tecnología, sino que cualquier política que genere incentivos para reducir las emisiones de carbono tendría el mismo efecto.

Esto se puede ver en el caso chileno, donde el acuerdo para el retiro de las centrales termoeléctricas a carbón⁸, impulsó sustancialmente la inversión en tecnologías renovables (principalmente solar y eólica), que ha crecido un 30% para Chile, frente a un crecimiento promedio del 20% para el resto de países de LATAM.

Por lo tanto, la implementación de políticas de reducción de emisiones no solo es efectiva para reducir la temperatura global y aumentar los beneficios económicos de las exportaciones de energía renovable como se vio en la sección anterior, sino que también permite protegerse contra escenarios que conducen a un mayor aumento de las temperaturas globales y como un instrumento de señalización para la inversión en tecnologías renovables.

⁸ Ver documento en: [37]

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

Existe un gran consenso a nivel mundial en que estamos en un momento crucial para poder frenar el cambio climático y las energías renovables son una gran alternativa para poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En esta línea, este trabajo mostró mediante un modelo de evaluación integrada, cuales serían los beneficios económicos y climáticos, de mediano y largo plazo, si se aprovechara el potencial energético renovable que existe en Latinoamérica. En donde el mensaje central es que la exportación de energía renovable por si sola no es capaz de frenar el cambio climático, incluso podría ser un agravante en ciertos escenarios.

Sin embargo, si estas exportaciones de energía renovable se realizan en escenarios donde se aplican políticas que desalientan el uso de tecnologías contaminantes, ya sea a través de impuestos pigouvianos o enfoques regulatorios, se generarán escenarios virtuosos en los que es posible frenar el cambio climático y aumentar los beneficios económicos a mediano y largo plazo para todas las regiones del mundo. Además, dada la naturaleza exportadora de LATAM, sus beneficios económicos son hasta 5 veces los beneficios de las otras regiones.

Por otro lado, y en línea con la literatura existente, la aplicación de impuestos al carbono es altamente efectiva para disminuir el calentamiento global, y a su vez, es efectiva para incrementar los beneficios económicos a largo plazo. Sin embargo, es importante señalar que la efectividad de los impuestos disminuye cuando se fija un valor por encima del nivel óptimo. Además, mediante un análisis de simulación estocástica se mostró que la aplicación de impuestos permite reducir algunos de los riesgos que implica el desarrollo de energías renovables, ya que la aplicación de impuestos reduce la volatilidad de la proporción de energía renovable en la composición de la Matriz energética global.

A su vez, al estudiar el retraso en el desarrollo de las exportaciones de energía se mostró que si bien no existe un efecto visible de los resultados climáticos, los beneficios económicos potenciales no solo disminuyen por el hecho del retraso, sino también en los períodos posteriores al inicio de las exportaciones, lo que se debe a la dinámica de ajuste de capital.

En cuanto a posibles trabajos futuros, surge la pregunta de entender las causas detrás de la evolución exógena de los precios de la energía, para ello una extensión directa es extender la metodología actual a un modelo de crecimiento endógeno para comprender la dinámica de inversión entre tipos de energía, y así ser capaz de evaluar otros tipos de instrumentos de mercado como la subvención de tecnologías renovables. Otra posible extensión es modelar la región productora de petróleo de una manera más estratégica, es decir, levantar el supuesto de oferta inelástica.

Por otro lado, desde el punto de vista del modelo climático, resulta interesante estudiar si

el modelo climático simplificado afecta las conclusiones sobre la evolución de la temperatura a largo plazo en un contexto de exportación de energías renovables. Para ello, una posible extensión sería comparar diferentes modelos climáticos, el modelo del ciclo del carbono del modelo DICE, o versiones más complejas que rescaten el hecho de la retroalimentación entre el ciclo de temperatura y el clima como se propone en [36].

Cabe destacar que el desafío de posicionar a LATAM como exportador global requiere de un claro trabajo colaborativo entre los diferentes países que conforman la región, a fin de aprovechar todas las sinergias que puedan existir, y así poder aprovechar la mayor cantidad del potencial existente, en donde quienes cuentan con mayores recursos renovables están llamados a tomar la iniciativa en esta materia.

Finalmente, podemos argumentar que el problema de la descarbonización de la matriz energética mundial no es una cuestión de escasez de suministro de energía renovable, sino más bien la falta de ser más agresivos en abordar la externalidad negativa provocada por el uso de combustibles fósiles, lo que se refuerza por el hecho de que los diferentes tipos de energía no son sustitutos perfectos. Además, dado que el proceso de emisión de carbono es un proceso lento, se requiere una visión a largo plazo para comprender y gestionar adecuadamente sus consecuencias en un contexto de cambio climático.

Bibliografía

- [1] Daron Acemoglu, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, and David Hemous. The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1):131–66, February 2012. doi: 10.1257/aer.102.1.131. URL <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.102.1.131>.
- [2] Daron Acemoglu, Philippe Aghion, and David Hémous. The environment and directed technical change in a North–South model. *Oxford Review of Economic Policy*, 30(3):513–530, 2014. URL <https://ideas.repec.org/a/oup/oxford/v30y2014i3p513-530..html>.
- [3] Daron Acemoglu, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley, and William Kerr. Transition to clean technology. *Journal of Political Economy*, 124(1):52–104, 2016. doi: 10.1086/684511. URL <https://doi.org/10.1086/684511>.
- [4] Daron Acemoglu, David Hemous, Lint Barrage, and Philippe Aghion. Climate change, directed innovation, and energy transition: The long-run consequences of the shale gas revolution. 2019 Meeting Papers 1302, Society for Economic Dynamics, 2019. URL <https://EconPapers.repec.org/RePEc:red:sed019:1302>.
- [5] Philippe Aghion, Antoine Dechezleprêtre, David Hémous, Ralf Martin, and John Van Reenen. Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, 124(1):1–51, 2016. doi: 10.1086/684581. URL <https://doi.org/10.1086/684581>.
- [6] David Anthoff and Richard S.J. Tol, 2020. URL <http://www.fund-model.org/>.
- [7] Kenneth J. Arrow and Gerard Debreu. Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica*, 22(3):265–290, 1954. ISSN 00129682, 14680262.
- [8] Lenin H. Balza, Ramon Espinasa, and Tomas Serebrisky. Lights on? energy needs in latin america and the caribbean to 2040. Technical report, Inter-American Development Bank, Bracknell, United Kingdom, 2016.
- [9] Robert J Barro and Xavier Sala-i Martin. Convergence. *Journal of Political Economy*, 100(2):223–251, April 1992. doi: 10.1086/261816. URL <https://ideas.repec.org/a/ucp/jpolec/v100y1992i2p223-51.html>.
- [10] Carlos Benavides, Luis Gonzales, Manuel Diaz, Rodrigo Fuentes, Gonzalo García, Rodrigo Palma-Behnke, and Catalina Ravizza. The impact of a carbon tax on the chilean electricity generation sector. *Energies*, 8(4):2674–2700, 2015. ISSN 1996-1073. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/4/2674>.
- [11] BP. Statistical review of world energy. Technical report, British Petroleum Company, London, 2020.

- [12] William A Brock and Leonard J Mirman. Optimal economic growth and uncertainty: The discounted case. *Journal of Economic Theory*, 4(3):479 – 513, 1972. ISSN 0022-0531. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-0531\(72\)90135-4](https://doi.org/10.1016/0022-0531(72)90135-4). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022053172901354>.
- [13] Paul Brockway, Matthew Heun, João Santos, and John Barrett. Energy-extended ces aggregate production: Current aspects of their specification and econometric estimation. *Energies*, 10:1–22, 03 2017. doi: 10.3390/en10020202.
- [14] Lawrence J. Christiano, Martin Eichenbaum, and Charles L. Evans. Nominal rigidities and the dynamic effects of a shock to monetary policy. *Journal of Political Economy*, 113(1):1–45, 2005. ISSN 00223808, 1537534X. URL <http://www.jstor.org/stable/10.1086/426038>.
- [15] Mikhail Golosov, John Hassler, Per Krusell, and Aleh Tsyvinski. Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1):41–88, 2014.
- [16] John Hassler, Per Krusell, and Conny Olovsson. Energy-Saving Technical Change. Discussion Papers 1529, Centre for Macroeconomics (CFM), November 2015. URL <https://ideas.repec.org/p/cfm/wpaper/1529.html>.
- [17] John Hassler, Per Krusell, and Conny Olovsson. The consequences of uncertainty: Climate sensitivity and economic sensitivity to the climate. *Annual Review of Economics*, 10(1):189–205, 2018.
- [18] John Hassler, Per Krusell, Conny Olovsson, and Michael Reiter. Integrated Assessment in a Multi-region World with Multiple Energy Sources and Endogenous Technical Change. Working Paper. 2019.
- [19] John Hassler, Per Krusell, Conny Olovsson, and Michael Reiter. On the effectiveness of climate policies. 2020.
- [20] Harold Hotelling. The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 39(2):137–175, 1931.
- [21] I4CE. Global carbon accounts 2020. Technical report, Institute for Climate Economics, Paris, 2020.
- [22] IMF. World Economic Outlook: A Long and Difficult Ascent. Technical report, International Monetary Fund, October 2020.
- [23] Ken-ichi Inada. On a Two-Sector Model of Economic Growth: Comments and a Generalization. *Review of Economic Studies*, 30(2):119–127, 1963.
- [24] IPCC. Climate change: The ipcc 1990 and 1992 assessments. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change, Bracknell, United Kingdom, 1992.
- [25] IPCC. *Summary for Policymakers*, chapter SPM, page 1–30. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. ISBN ISBN 978-1-107-66182-0.
- [26] IPCC. *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate povert.* 2018.

- [27] IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [28] IRENA. Renewable power generation costs in 2019. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [29] Christopher M. Kellett, S. Weller, T. Faulwasser, L. Grüne, and W. Semmler. Feedback, dynamics, and optimal control in climate economics. *Annu. Rev. Control.*, 47:7–20, 2019.
- [30] Martin Kristiansen, Francisco Munoz, Shmuel Oren, and Magnus Korpås. Efficient allocation of monetary and environmental benefits in multinational transmission projects: North sea offshore grid case study. 2017.
- [31] Lars Ljungqvist and Thomas J. Sargent. *Recursive Macroeconomic Theory*. The MIT Press, 2004.
- [32] Xi Lu, Michael B. McElroy, and Juha Kiviluoma. Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(27):10933–10938, 2009. ISSN 0027-8424. doi: 10.1073/pnas.0904101106. URL <https://www.pnas.org/content/106/27/10933>.
- [33] Robert Jr Lucas. Econometric policy evaluation: A critique. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 1(1):19–46, January 1976. URL <https://ideas.repec.org/a/eee/crcspp/v1y1976ip19-46.html>.
- [34] Lionel W. McKenzie. On the existence of general equilibrium for a competitive market. *Econometrica*, 27(1):54–71, 1959. ISSN 00129682, 14680262.
- [35] Juan Pablo Medina and Claudio Soto. The Chilean Business Cycles Through the Lens of a Stochastic General Equilibrium Model. Working Papers Central Bank of Chile 457, Central Bank of Chile, December 2007. URL <https://ideas.repec.org/p/chb/bcchwp/457.html>.
- [36] R. J. Millar, Z. R. Nicholls, P. Friedlingstein, and M. R. Allen. A modified impulse-response representation of the global near-surface air temperature and atmospheric concentration response to carbon dioxide emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(11):7213–7228, 2017. doi: 10.5194/acp-17-7213-2017. URL <https://acp.copernicus.org/articles/17/7213/2017/>.
- [37] Ministry of Energy. Exento decree n°50: coal-fired thermoelectric power plant retirement agreement", 2019. http://https://energia.gob.cl/sites/default/files/decreto_exento_n_50.pdf.
- [38] William Nordhaus. Dice/rice models - william nordhaus: Yale economics, 2020. URL <https://sites.google.com/site/williamdnordhaus/dice-rice>.
- [39] William Nordhaus and Zili Yang. A regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate-change strategies. *American Economic Review*, 86:741–65, 02 1996.
- [40] William D. Nordhaus. Rolling the ‘dice’: an optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Resource and Energy Economics*, 15(1):27 – 50, 1993. ISSN 0928-7655.
- [41] William D. Nordhaus. Economic aspects of global warming in a post-copenhagen environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26):11721–11726, 2010.

- [42] William D Nordhaus. Estimates of the social cost of carbon: Background and results from the rice-2011 model. Working Paper 17540, National Bureau of Economic Research, October 2011. URL <http://www.nber.org/papers/w17540>.
- [43] William D. Nordhaus and Joshep Boyer. *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. The MIT Press, 2000.
- [44] OECD. *Making the green recovery work for jobs, income and growth*. 2020.
- [45] Raúl O’Ryan, Shahriyar Nasirov, and Andrés Álvarez Espinosa. Renewable energy expansion in the chilean power market: A dynamic general equilibrium modeling approach to determine co2 emission baselines. *Journal of Cleaner Production*, 247:119645, 12 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119645.
- [46] Chris Papageorgiou, Marianne Saam, and Patrick Schulte. Substitution between clean and dirty energy inputs: A macroeconomic perspective. *The Review of Economics and Statistics*, 99(2):281–290, 2017. doi: 10.1162/REST_a_00592. URL https://doi.org/10.1162/REST_a_00592.
- [47] A.C. Pigou. *The Economics of Welfare*. Macmillan and Co., 1920.
- [48] Hannah Ritchie. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?, 2020. URL <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.
- [49] Paul M. Romer. Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94(5):1002–1037, 1986. ISSN 00223808, 1537534X. URL <http://www.jstor.org/stable/1833190>.
- [50] SOLARGIS. *Global Normal Irradiation*. 2020. URL <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>.
- [51] Robert M. Solow. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1):65–94, 1956. URL <https://ideas.repec.org/a/oup/qjecon/v70y1956i1p65-94..html>.
- [52] David I. Stern. Interfuel substitution: A meta-analysis. *Journal of Economic Surveys*, 26(2):307–331, 2012. doi: 10.1111/j.1467-6419.2010.00646.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-6419.2010.00646.x>.
- [53] Nicholas Stern. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007. doi: 10.1017/CBO9780511817434.
- [54] Joseph Stiglitz. Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths¹². *The Review of Economic Studies*, 41(5):123–137, 12 1974. ISSN 0034-6527. doi: 10.2307/2296377. URL <https://doi.org/10.2307/2296377>.
- [55] Nancy L. Stokey, Robert E. Lucas, and Edward C. Prescott. *Recursive Methods in Economic Dynamics*. Harvard University Press, 1989. ISBN 9780674750968.
- [56] T. W. Swan. Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, 32(2):334–361, 1956. doi: 10.1111/j.1475-4932.1956.tb00434.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-4932.1956.tb00434.x>.
- [57] UN. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto, 1998.

- [58] UN. *Paris Agreement*. Paris, France, 2015.
- [59] UN. *World Population Prospects 2019*. New York, USA, 2019.
- [60] UN. *COVID-19: Towards an inclusive, resilient and green recovery —building back better through regional cooperation*. 2020.
- [61] WB. Databank - world development indicators. Technical report, The World Bank, Washington, DC, 2019.

Anexo A

Derivación de Resultados

A.1. Ecuación (2.4):

Planteando el problema de los hogares representativos de las regiones consumidoras de petróleo de forma recursiva, y reemplazando la ecuación de la dinámica del capital en la restricción presupuestaria se tiene $\forall i \in \{2, \dots, r\}$

$$V(K_{i,t}) = \max_{c_{i,t}, K_{i,t+1}} \{u_i(c_t) + \beta V(K_{i,t+1})\}$$
$$s.a. \quad c_{i,t} + K_{i,t+1} - (1 - \delta)K_{i,t} = (1 + \Gamma_{i,t})(w_{i,t}L_{i,t} + r_{i,t}K_{i,t}) \quad (\mu_{i,t})$$

Imponiendo condiciones de primer orden se tiene

$$c_{i,t} : \quad \frac{\partial u_i(c_{i,t})}{\partial c_{i,t}} - \mu_{i,t} = 0$$
$$K_{i,t+1} : \quad \beta V'(K_{i,t+1}) - \mu_{i,t} = 0$$

Aplicando el Teorema de la Envolvente se tiene:

$$\frac{\partial V(K_{i,t})}{\partial K_{i,t}} = \mu_{i,t}(1 + \Gamma_{i,t})r_{i,t}$$

Juntando este resultado (adelantándolo un período) con las condiciones de primer orden se obtiene la siguiente ecuación de Euler

$$\frac{\partial u_i(c_{i,t})}{\partial c_{i,t}} = \beta \frac{\partial u_i(c_{i,t+1})}{\partial c_{i,t+1}} (1 + \Gamma_{i,t+1})(r_{i,t+1} + 1 - \delta) \quad (\text{A.1})$$

que corresponde a la ecuación (2.4).

A.2. Ecuación (2.9):

Análogo al problema anterior, planteamos el problema de manera recursiva, es decir, planteamos la siguiente ecuación de Bellman

$$V(R_t) = \max_{c_{1,t}, R_{t+1}} \{u_1(c_{1,t}) + \beta V(R_{t+1})\}$$

$$s.a. \quad c_{1,t} = p_{1,t}(R_t - R_{t+1}) \quad (\mu_{1,t})$$

Imponiendo condiciones de primer orden se tiene

$$c_{1,t} : \quad \frac{\partial u_1(c_{1,t})}{\partial c_{1,t}} - \mu_{1,t} = 0$$

$$R_{t+1} : \quad \beta V'(R_t) - \mu_{1,t} p_{1,t} = 0$$

Aplicando el Teorema de la Envolvente se tiene:

$$\frac{\partial V(R_t)}{\partial R_t} = \mu_{1,t} p_{1,t}$$

Lo cual junto con las condiciones de primer orden se obtiene la siguiente ecuación de Euler

$$\frac{\partial u_1(c_{1,t})}{\partial c_{1,t}} = \beta \frac{\partial u_1(c_{1,t+1})}{\partial c_{1,t+1}} \frac{p_{1,t+1}}{p_{1,t}} \quad (\text{A.2})$$

A.3. Proposición 2.1

Partimos resolviendo el problema de las firmas agregadoras de energía, el cual corresponde al siguiente problema estático mediante la formulación del Lagrangeano

$$\min_{e_{k,i,t}} \sum_{k=1}^n \hat{p}_{k,i,t} \cdot e_{k,i,t} - \Lambda_{i,t} \left(\left(\sum_{k=1}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} - E_{i,t} \right)$$

con $\Lambda_{i,t}$ es multiplicador de Lagrange asociado a la restricción (2.11), y que a su vez es el precio del agregado de servicios energéticos definido anteriormente como $P_{i,t}$ ya que corresponde al costo asociado de proveer una unidad adicional de el servicio energético $E_{i,t}$.

Imponiendo condiciones de primer orden con respecto a la variable de control $e_{k,i,t}$ y el multiplicador de Lagrange $P_{i,t}$ al problema anterior se obtiene

$$e_{k,i,t} : \quad \hat{p}_{k,i,t} - P_{i,t} \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho \right)^{\frac{1-\rho}{\rho}} \frac{1}{\rho} \lambda_k (e_{k,i,t})^{\rho-1} = 0$$

$$P_{i,t} : \quad \left(\sum_{k=1}^n \lambda_k (e_{k,i,t})^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}} - E_{i,t} = 0$$

juntando ambas ecuaciones y despejando la demanda del energético primario se tiene

$$e_{k,i,t} = E_{i,t} \left(\frac{P_{t,i} \lambda_k}{\hat{p}_{k,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho}} \quad \forall k \in \{1, \dots, n\} \quad (\text{A.3})$$

Reemplazando este resultado en la ecuación de gastos, se obtiene la siguiente relación para el precio de la agregación de energía, dados los precios de producción energética por tecnología

$$P_{i,t} = \left(\sum_{k=1}^n \hat{p}_{k,i,t}^{\frac{\rho}{\rho-1}} \lambda_k^{\frac{1}{1-\rho}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{A.4})$$

Por otro lado, resolviendo el problema para las firmas representativas de bienes finales cuando la tecnología es del tipo Cobb-Douglas se tiene

$$\max_{L_{i,t}, K_{i,t}, E_{i,t}} A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^{\alpha} E_{i,t}^{\nu} - w_{i,t} L_{i,t} - r_{i,t} K_{i,t} - P_{i,t} E_{i,t}$$

Imponiendo condiciones de primer orden, asumiendo como conocido $P_{i,t}$ se obtiene

$$\begin{aligned} E_{k,i,t} : \quad & \frac{\nu A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^{\alpha}}{E_{i,t}} - P_{i,t} = 0 \\ L_{k,i,t} : \quad & \frac{(1-\alpha-\nu) A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^{\alpha}}{L_{i,t}} - w_{i,t} = 0 \\ K_{k,i,t} : \quad & \frac{\alpha A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^{\alpha}}{K_{i,t}} - r_{i,t} = 0 \end{aligned}$$

De aquí entonces, se obtiene la demanda de servicios energéticos, los salarios y rentas de capital para las diferentes zonas como

$$E_{k,i,t} = \left(\frac{\nu A_{i,t} L_{i,t}^{1-\alpha-\nu} K_{i,t}^{\alpha}}{P_{i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} \quad (\text{A.5})$$

$$w_{i,t} = (1-\alpha-\nu) \frac{Y_{i,t}}{L_{i,t}} \quad (\text{A.6})$$

$$r_{i,t} = \alpha \frac{Y_{i,t}}{K_{i,t}} \quad (\text{A.7})$$

Ahora bien, definimos el el producto neto disponible como

$$\hat{Y}_{i,t} = (1-\nu) Y_{i,t} \quad (\text{A.8})$$

que representa la fracción del producto total que no corresponde al sector energético. Utilizando esta definición y las ecuaciones (A.7) y (A.6) obtenemos que $\hat{Y}_{i,t} = r_{i,t} K_{i,t} + w_{i,t} L_{i,t}$.

Ahora bien, planteando el problema de los hogares importadores de petróleo representa-

tivos de forma recursiva, tenemos¹

$$V(K_{i,t}) = \max_{K_{i,t+1}} \left\{ \ln \left(\widehat{Y}_{i,t}(1 + \Lambda_{i,t}) - K_{i,t+1} \right) + \beta V(K_{i,t+1}) \right\}$$

Ahora bien resolveremos el problema mediante el procedimiento *Guess-and-Verify*², ya que asumiremos una forma funcional de la función valor $V(K_{i,t})$ y encontraremos la expresión de los coeficientes asociados. Específicamente suponemos una forma funcional $V(K_{i,t}) = a_0 + a_1 \ln(K_{i,t})$, por lo que reemplazándola en el problema de maximización tenemos

$$V(K_{i,t}) = \max_{K_{i,t+1}} \left\{ \ln \left(\widehat{Y}_{i,t}(1 + \Gamma_{i,t}) - K_{i,t+1} \right) + \beta(a_0 + a_1 \ln(K_{i,t+1})) \right\}$$

Imponiendo condiciones de primer orden obtenemos

$$K_{i,t+1} = \frac{\beta a_1 \widehat{Y}_{i,t}}{1 + \beta a_1} \quad (\text{A.9})$$

Por tanto basta con encontrar la expresión para a_1 tal que la condición (A.9) se cumpla. Por lo tanto reemplazandola en el problema de maximización tenemos que encontrar los valores de a_0 y a_1 que satisfacen

$$a_0 + a_1 \ln(K_{i,t}) = \ln \left(\widehat{Y}_{i,t}(1 + \Gamma_{i,t}) - \frac{\beta a_1 \widehat{Y}_{i,t}}{1 + \beta a_1} \right) + \beta \left(a_0 + a_1 \ln \left(\frac{\beta a_1 \widehat{Y}_{i,t}}{1 + \beta a_1} \right) \right)$$

Desarrollando algebraica la igualdad obtenemos

$$a_1 = \alpha(1 - \beta a_1) \Rightarrow a_1 = \frac{\alpha}{1 - \alpha\beta} \quad (\text{A.10})$$

Reemplazando (A.10) en (A.9) obtenemos que la función de política es

$$K_{i,t} = \alpha\beta\widehat{Y}_{i,t} \iff K_{i,t} = \frac{\alpha\beta}{1 - \nu} Y_{i,t} \quad (\text{A.11})$$

Por lo tanto, podemos definir la tasa de ahorro $s_{i,t} = \frac{\alpha\beta}{1 - \nu}$ para todo t .

Por otro lado, para la región productora de petróleo asumimos que sus ingresos vienen dados únicamente por la venta de éste, el consumo se define como $c_{1,t} = p_{1,t}(R_t - R_{t+1})$ y por tanto planteando el problema de manera recursiva para este agente se tiene

$$V(R_t) = \max_{c_{1,t}, R_{t+1}} \left\{ \ln c_{1,t} + \beta V(R_{t+1}) \right\}$$

$$s.a. \quad c_{1,t} = p_{1,t}(R_t - R_{t+1}) \quad (\mu_{1,t})$$

¹ Esto es reemplazando la restricción presupuestaria en la función objetivo y reemplazando las formas funcionales y valores de la proposición.

² Tambin llamado Método de los Coeficientes Indeterminados

Imponiendo condiciones de primer orden se tiene

$$\begin{aligned} c_{1,t} : \quad & \frac{1}{c_{1,t}} - \mu_{1,t} = 0 \\ R_{t+1} : \quad & \beta V'(R_t) - \mu_{1,t} p_{1,t} = 0 \end{aligned}$$

Aplicando el Teorema de la Envolvente se tiene:

$$\frac{\partial V(R_t)}{\partial R_t} = \mu_{1,t} p_{1,t}$$

Lo cual juntanto con las condiciones de primer orden se obtiene la siguiente ecuación de Euler

$$\frac{c_{1,t+1}}{c_{1,t}} = \beta \frac{p_{1,t+1}}{p_{1,t}}$$

Lo que reemplazando las formas funciones del consumo se obtiene

$$\frac{1}{R_t - R_{t+1}} = \beta \frac{1}{R_{t+1} - R_{t+2}} \quad (\text{A.12})$$

Esta última ecuación deriva en que la tasa que se ocupa las reservas es $(1 - \beta)$ es decir,

$$R_{t+1} = \beta R_t \quad (\text{A.13})$$

$$c_{1,t} = p_{1,t}(1 - \beta)R_t \quad (\text{A.14})$$

Con lo anterior, las exportaciones de petróleo deben cumplir

$$\sum_i e_{1,i,t} = (1 - \beta)R_t \quad \forall t \quad (\text{A.15})$$

que corresponde a la condición de limpieza de mercado (oferta igual a demanda).

□

A.4. Proposición 3.1

Dado que el único problema que cambia es la decisión de las firmas agregadoras de energía que resuelven un problema estático, basta con resolver el problema definido en (??), por lo que planteando el Lagrangeano se tiene

$$\min_{e_{3,j,i,t}} \left[\sum_{k=1}^n \hat{p}_{3,j,i,t} \cdot e_{3,j,i,t} \right] - \Lambda_{i,t}^R \left(l \left(\sum_{j=1}^l \lambda_{3,j} (e_{3,j,i,t})^{\rho_r} \right)^{\frac{1}{\rho_r}} - \mathbf{R}_{i,t} \right)$$

Siguiendo la misma metodología descrita para la firma agregadora de energía descrita en A.3 se tiene

$$e_{3,j,i,t} : \quad \widehat{p}_{3,j,i,t} - \Lambda_{i,t}^R l \left(\sum_{j=1}^l \lambda_{3,j} (e_{3,j,i,t})^{\rho_r} \right)^{\frac{1-\rho_r}{\rho_r}} \frac{1}{\rho_r} \lambda_k (e_{3,j,i,t})^{\rho_r-1} \rho_r = 0$$

$$\Lambda_{i,t}^R : \quad \left(\sum_{j=1}^l \lambda_{3,j} (e_{3,j,i,t})^{\rho_r} \right)^{\frac{1}{\rho_r}} - \mathbf{R}_{i,t} = 0$$

Definiendo $\Lambda_{i,t}^R = P_{t,i}^R$ como el precio del agregado renovable se tiene que las demandas de energéticos renovables quedan

$$e_{3,j,i,t} = \frac{\mathbf{R}_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^R l \lambda_{3,j}}{\widehat{p}_{3,j,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho_r}} \quad (\text{A.16})$$

Con esto, y reemplazando este resultado en la ecuación de gastos de la firma agregadora de energías renovables se tiene

$$P_{i,t}^R = l^{-1} \left(\sum_{j=1}^l (\lambda_{3,j})^{\frac{1}{1-\rho_r}} (\widehat{p}_{3,j,i,t})^{\frac{\rho_r-1}{\rho_r}} \right)^{\frac{\rho_r-1}{\rho_r}} \quad (\text{A.17})$$

Ahora bien, dado que el problema de la firma agregadora de energía no cambia y recibe como input las decisiones de $e_{3,j,i,t}$ y $P_{i,t}^R$ se tiene que la demanda por el agregado de energías renovables $\mathbf{R}_{i,t}$ queda determinada por

$$\mathbf{R}_{i,t} = E_{i,t} \left(\frac{P_{t,i} \lambda_3}{P_{i,t}^R} \right)^{\frac{1}{1-\rho}} \quad (\text{A.18})$$

y el precio del agregado de energía se redefine con el precio del agregado de energía renovable, es decir, está determinado por

$$P_{i,t} = \left(\sum_{k \neq 3}^n (\widehat{p}_{k,i,t})^{\frac{\rho}{\rho-1}} (\lambda_k)^{\frac{1}{1-\rho}} + (\lambda_3)^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{i,t}^R)^{\frac{\rho}{\rho-1}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{A.19})$$

lo que sumado a la condición de limpieza de mercado

$$\sum_{i \in exp} e_{4,i,t} = \sum_{i \in imp} \frac{\mathbf{R}_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^R l \lambda_{3,2}}{\widehat{p}_{3,2,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho_r}} \quad (\text{A.20})$$

demuestra la Proposición 3.1.

□

A.5. Proposición 3.2

La demostración de esta proposición es idéntica a la expuesta en A.4 sólo que cambiando $\mathbf{R}_{i,t}$ por $\mathbf{O}_{i,t}$ que corresponde al agregado de petróleo y el índice de los energéticos, ya que para nuestra convención $k = 1$ corresponde al petróleo por lo que se tiene

$$P_{i,t}^O = l^{-1} \left(\sum_{j=1}^l (\lambda_{1,j})^{\frac{1}{1-\rho H}} (\widehat{p}_{1,j,i,t})^{\frac{\rho H}{\rho H-1}} \right)^{\frac{\rho H-1}{\rho H}} \quad (\text{A.21})$$

$$\mathbf{O}_{i,t} = E_{i,t} \left(\frac{P_{t,i} \lambda_1}{P_{i,t}^O} \right)^{\frac{1}{1-\rho}} \quad (\text{A.22})$$

$$e_{1,j,i,t} = \frac{\mathbf{O}_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^O l \lambda_{1,j}}{\widehat{p}_{1,j,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho r}} \quad (\text{A.23})$$

$$P_{i,t} = \left((\lambda_1)^{\frac{1}{1-\rho}} (P_{i,t}^O)^{\frac{\rho}{\rho-1}} + \sum_{k=2}^n (\widehat{p}_{k,i,t})^{\frac{\rho}{\rho-1}} (\lambda_k)^{\frac{1}{1-\rho}} \right)^{\frac{\rho-1}{\rho}} \quad (\text{A.24})$$

$$\sum_{prod} e_{5,i,t} = \sum_{i=2}^r \frac{\mathbf{O}_{i,t}}{l} \left(\frac{P_{t,i}^O l \lambda_{1,2}}{\widehat{p}_{1,2,i,t}} \right)^{\frac{1}{1-\rho H}} \quad (\text{A.25})$$

□

Anexo B

Parametrización del Modelo

Tabla B.1: Parámetros Función de Daño

Región	Lineal ϕ_1	Cuadrático ϕ_2
Norte América	$0.000 \cdot 10^{-2}$	$0.1414 \cdot 10^{-2}$
Europa	$0.000 \cdot 10^{-2}$	$0.1591 \cdot 10^{-2}$
China	$0.0758 \cdot 10^{-2}$	$0.1259 \cdot 10^{-2}$
Africa	$0.3410 \cdot 10^{-2}$	$0.1983 \cdot 10^{-2}$
Asia Sur	$0.4385 \cdot 10^{-2}$	$0.1689 \cdot 10^{-2}$
Asia Pacífico	$0.0785 \cdot 10^{-2}$	$0.1259 \cdot 10^{-2}$
Latinoamérica	$0.000 \cdot 10^{-2}$	$0.1259 \cdot 10^{-2}$

Tabla B.2: Productividades Iniciales

Región	$z_{i,0}$
Norte América	4.55
Europa	3.9
China	3.62
África	2.87
Asia Sur	2.9
Asia Pacífico	3.65
Latinoamérica	3.55

Tabla B.3: Porcentaje de Brecha con respecto a Norte América.

Región	Porcentaje
Europa	90 %
China	80 %
África	60 %
Asia Sur	70 %
Asia Pacífico	80 %
Latinoamérica	70 %

Tabla B.4: Precios Iniciales por tipo de Energía.

Región	Carbón	Energías Renovables	Combustibles Sintéticos	Electricidad Exportable
Norte América	0.1148	0.939	-	-
Europa	0.1148	1.248	-	-
China	0.1148	0.676	-	-
África	0.1148	0.898	-	-
Asia Sur	0.1148	0.966	-	-
Asia Pacífico	0.1148	1.152	0.579	-
Latinoamérica	0.1148	0.631	0.579	0.7850

Anexo C

Resultados Económicos por Región

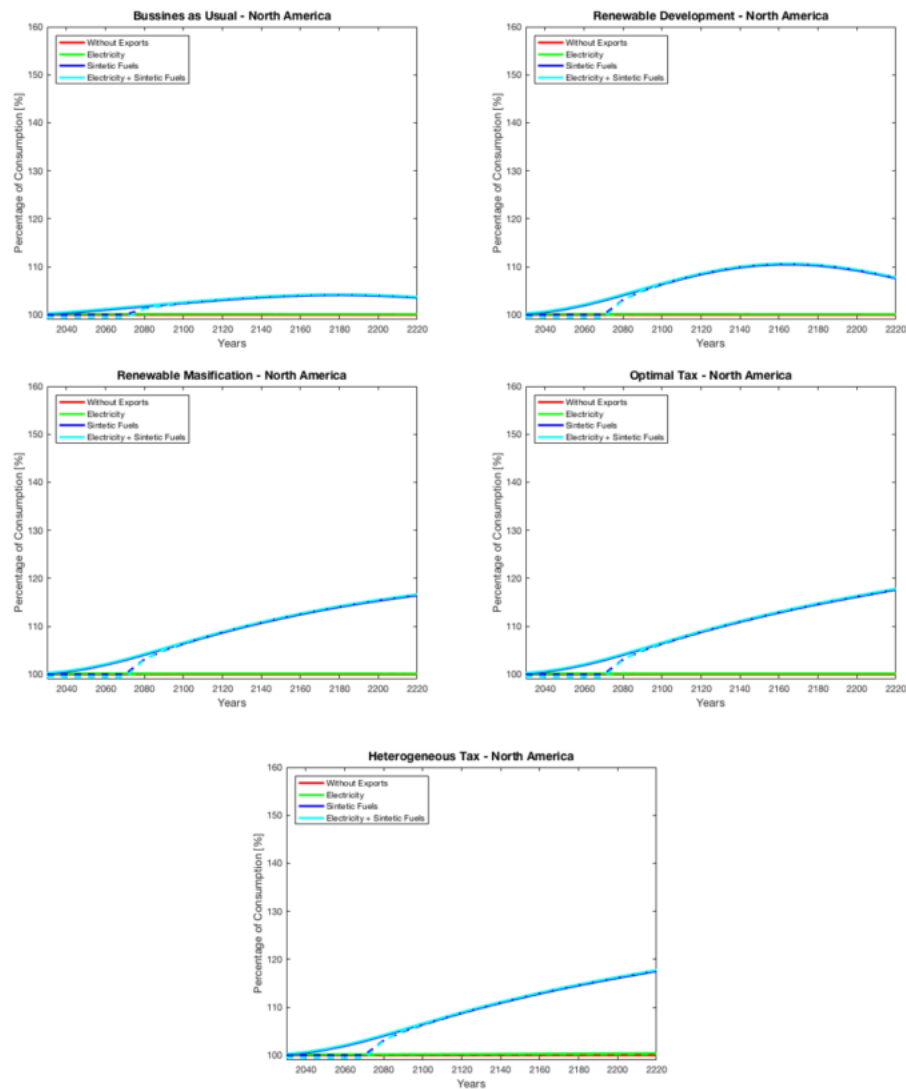


Figura C.1: North America Economic results.

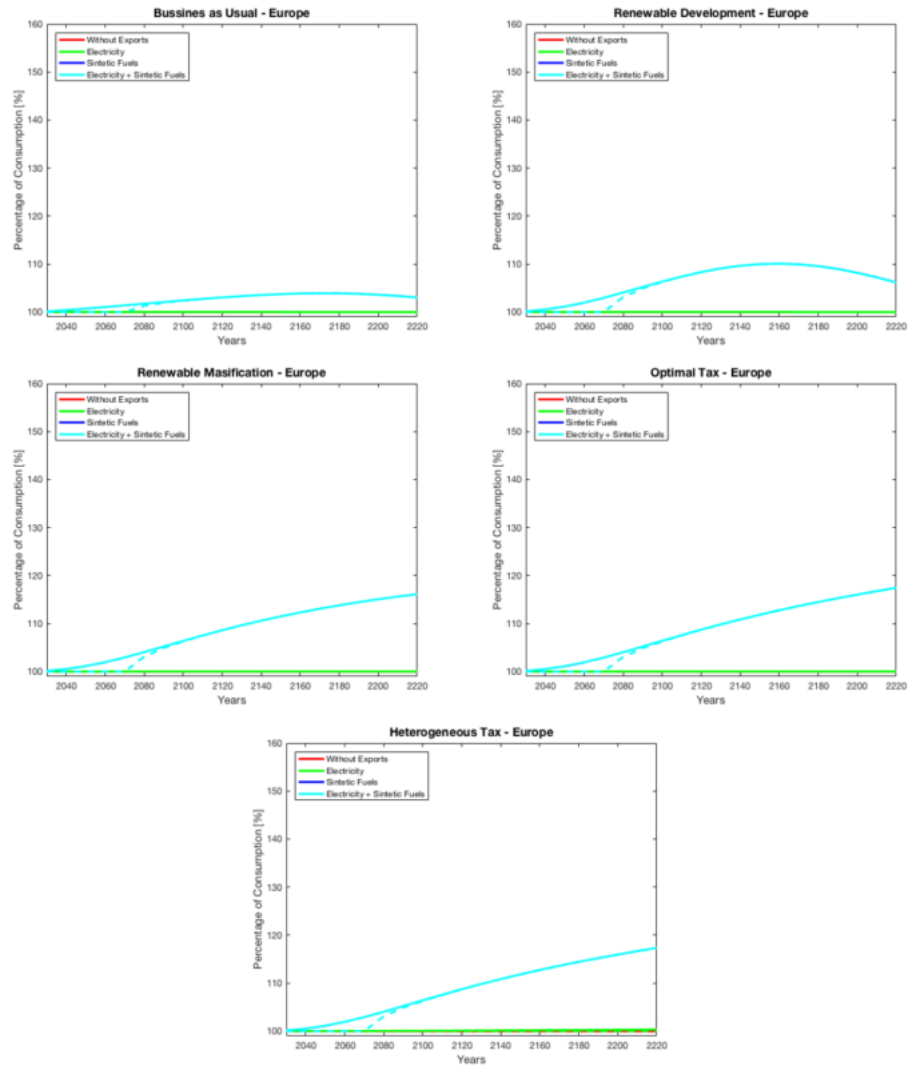


Figura C.2: Europe Economic results.

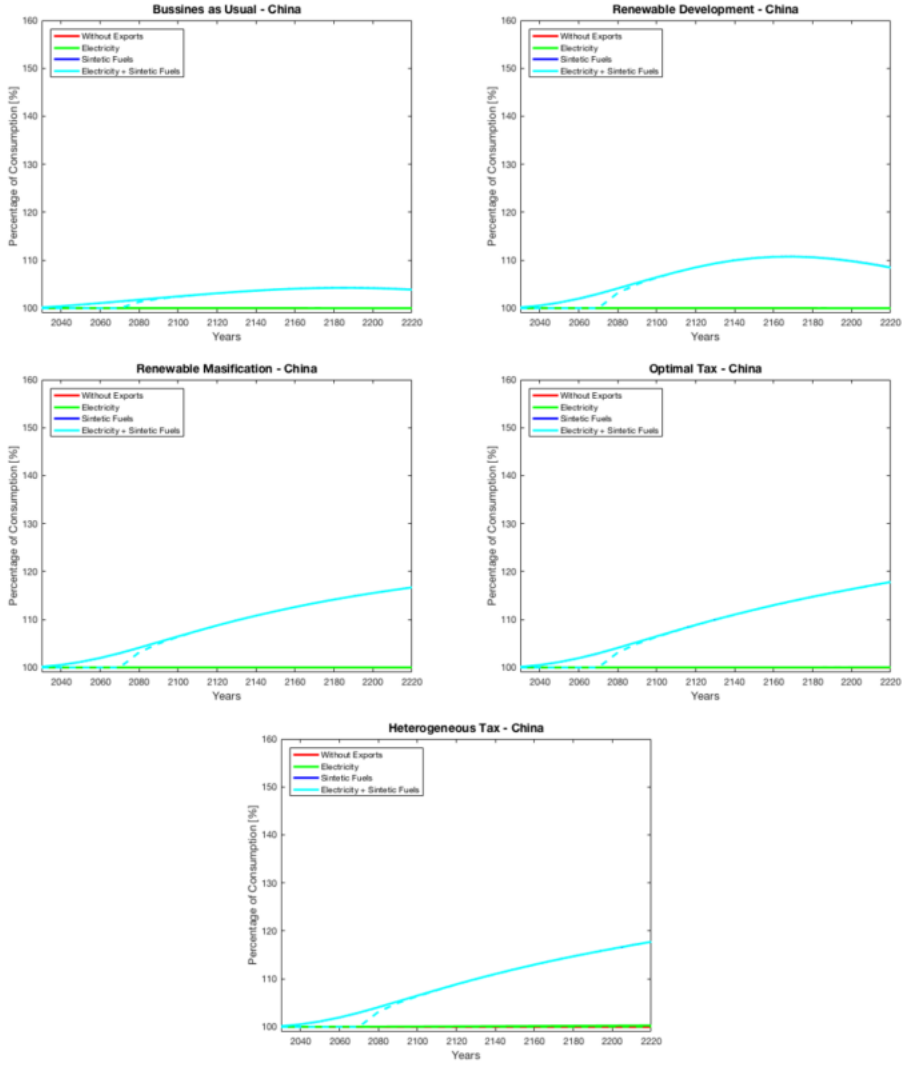


Figura C.3: China Economic results.

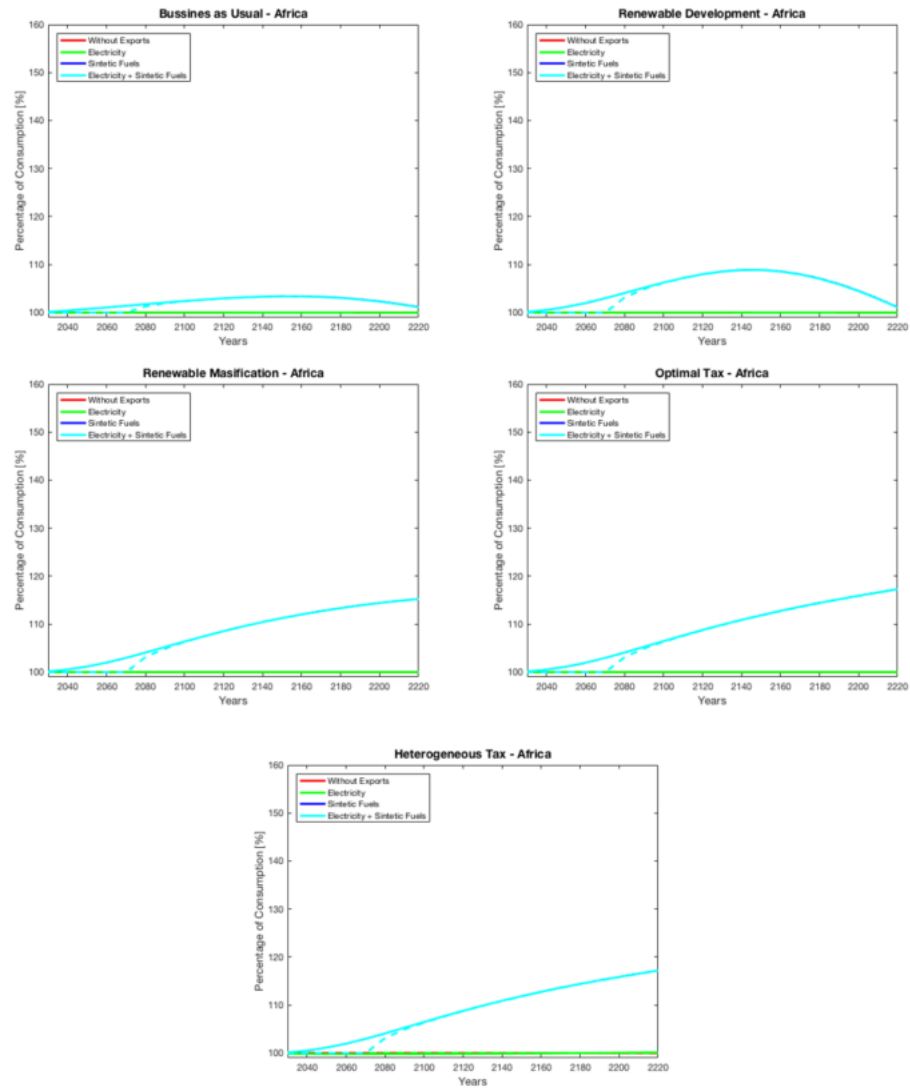


Figura C.4: Africa Economic results.

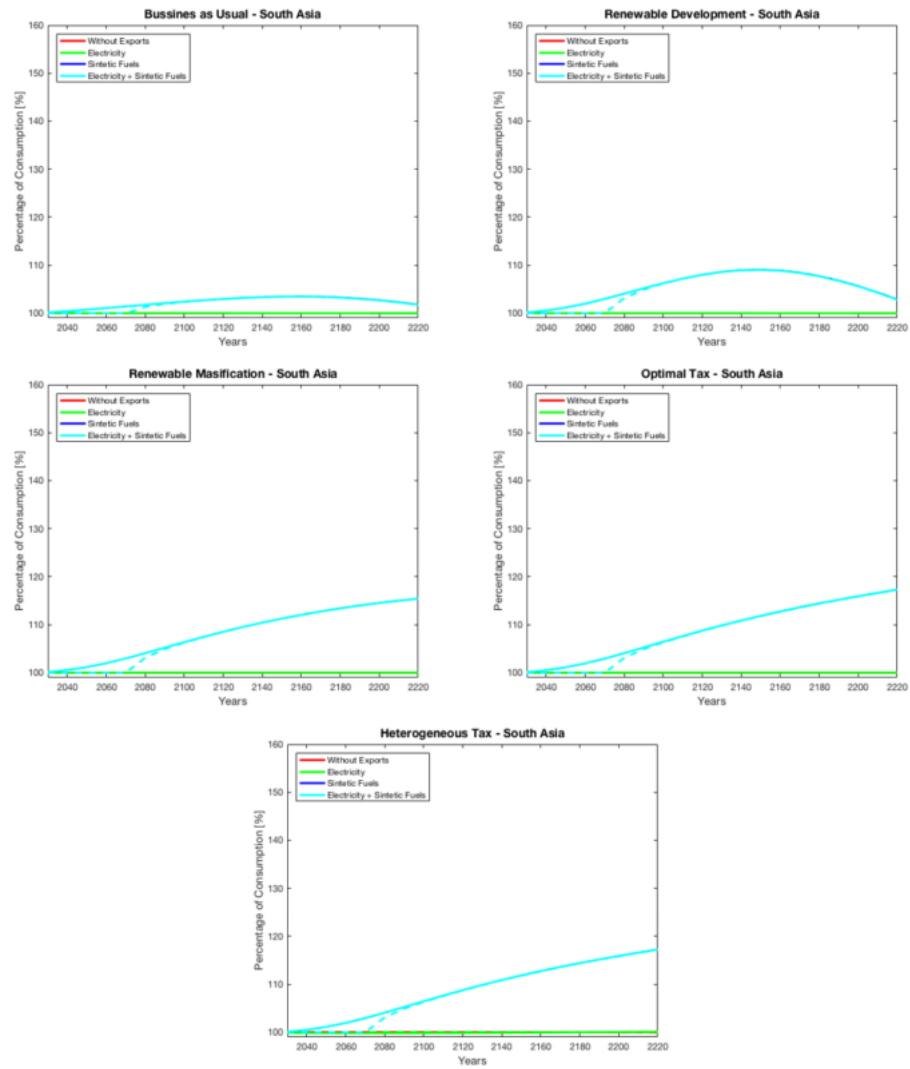


Figure C.5: South Asia Economic results.

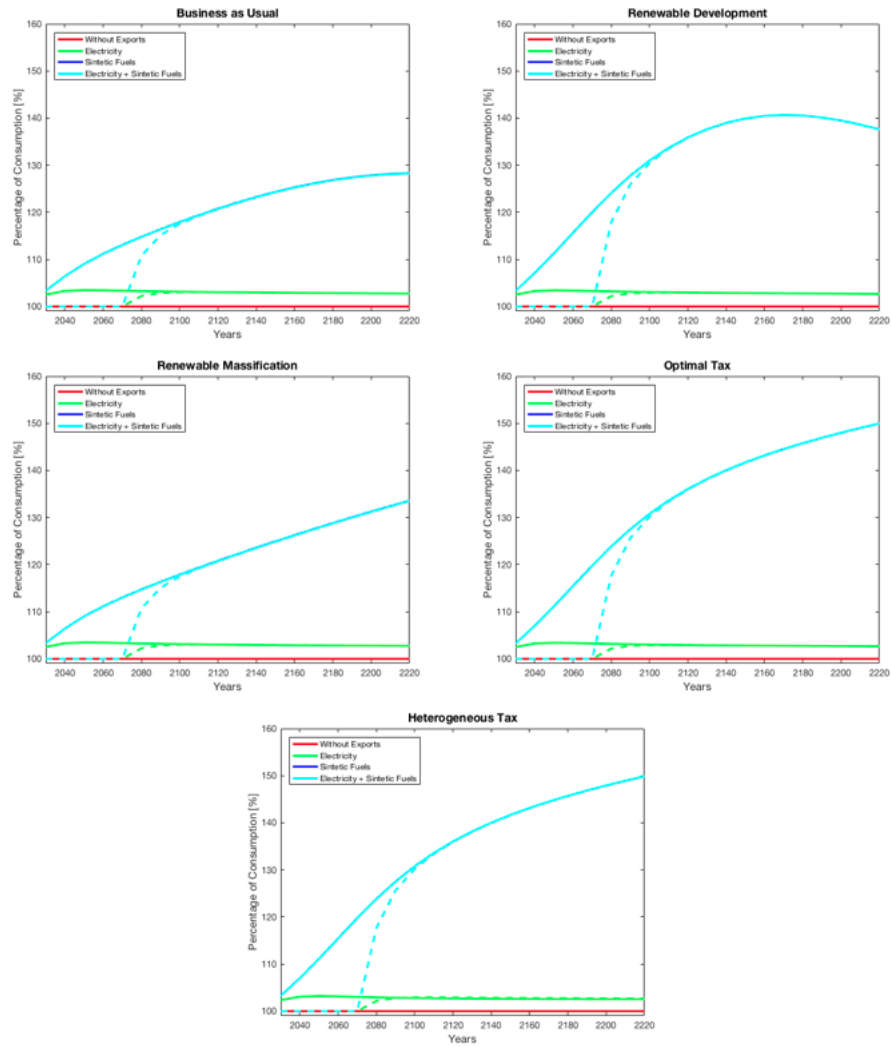


Figura C.6: LATAM Economic results.

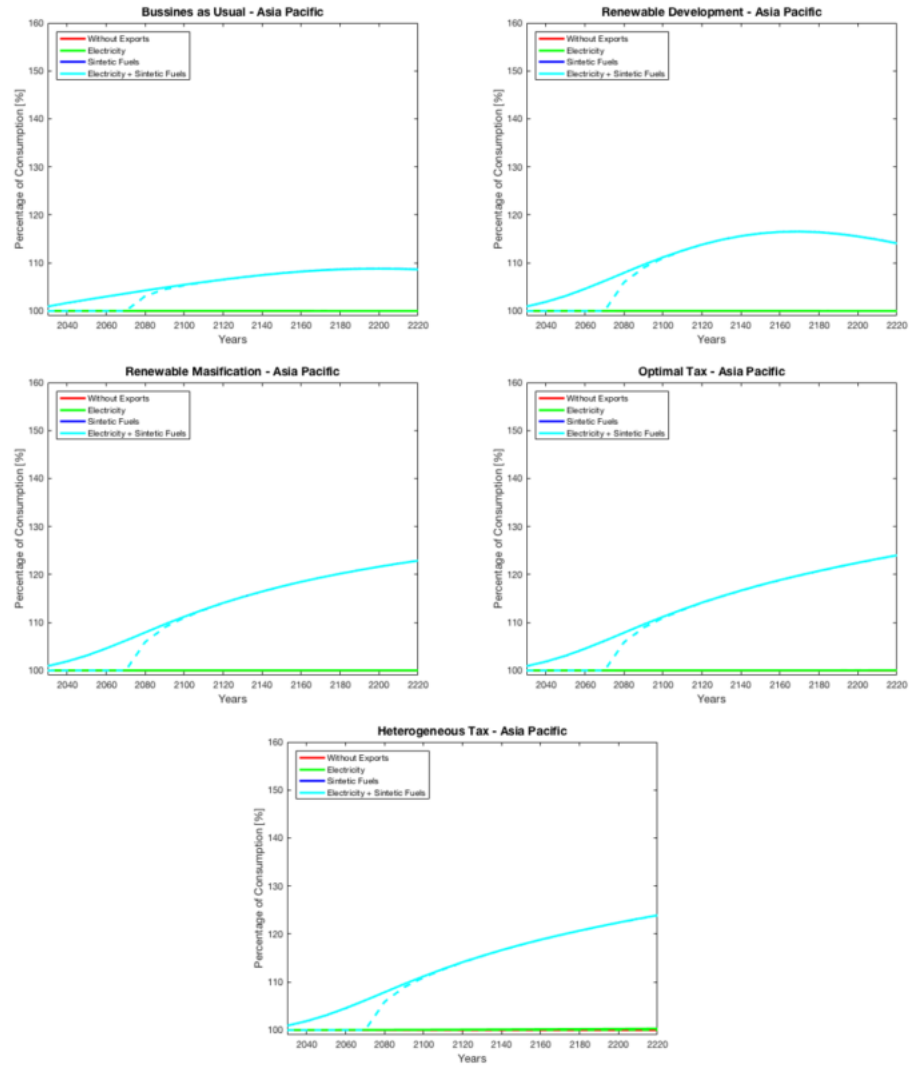


Figura C.7: Asia Pacific Economic results.