EL COLEGIO DE MÉXICO
CENTRO DE ESTUDIOS ECONÓMICOS

MAESTRÍA EN ECONOMÍA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ECONOMÍA

FIRMAS DE TECNOLOGÍA PRODUCTORAS DE AEE ANTE LA INTRODUCCIÓN DE LA REP EN EL MARCO DE COMPETENCIA OLIGOPÓLICA: EL ROL DE LA INVERSIÓN EN I+D

ANA SILVIA ROMERO GONZÁLEZ

PROMOCIÓN 2018-2020

ASESOR:

ADRIANA GAMA VELÁZQUEZ

SEPTIEMBE 2020

A mis padres, Silvia y Jesús,
y a mi hermana, Lorena.

Agradecimientos

En estas líneas, quiero expresar mi profundo agradecimiento a cada una de las personas que me han acompañado, impulsado y apoyado para concluir este trabajo de investigación.

A mi asesora, Adriana Gama Velázquez, por su tiempo, dedicación, apoyo, conocimiento, acertadas correcciones y observaciones. Es un gran pilar de este trabajo, mi admiración y respeto por su compromiso.

A los profesores del Centro de Estudios Económicos de El Colegio de México, por trasmitirme su conocimiento con esmero. El conocimiento adquirido en cada clase es invaluable para mi.

A mis compañeros, por las tardes de estudio, por la amistad, la honestidad y el apoyo que me brindaron. Reconozco y admiro su perseverancia y esfuerzo.

A mi familia, por el apoyo y motivación recibida, son un ejemplo de empeño y superación. En especial, a mis tías, María Isabel, Ana Irma, Bertha Luz y Daniela, por tanto amor.

A Juan Carlos, sin él este trabajo no hubiera sido posible, su apoyo, comprensión y amor tienen un valor incalculable en mi corazón.

A mi hermana Lorena y a mi hermosa sobrina Emma, por ser fuente de alegría en mi vida.

A mi padre, Jesús, por hacerme creer desde pequeña que todo es posible con esfuerzo y dedicación, por toda la confianza que infundió en mi ser.

Finalmente a mi madre, Silvia, el pilar de mi vida. Gracias por ser un refugio para mi, por todas tus palabras de aliento, por tu confianza, por tu amor incondicional, pero sobre todo por tu ejemplo de vida. Te admiro. Este trabajo es gracias a ti.

Resumen

Modelo, en un juego en dos etapas dentro de un contexto de competencia en cantidad, la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) por medio de un mecanismo de recolección de residuos que utiliza como instrumento un cupón que las firmas pagan a los consumidores por su residuo. Utilizando este mecanismo, las firmas invierten en Investigación y Desarrollo (I+D) de forma diferenciada, en el modelo r invierten para disminuir el costo marginal de reciclaje y en el modelo p para disminuir el costo marginal de producción. Encuentro que, para cierto nivel de parámetros dados, el modelo p es superior en producir un mayor nivel de producto, inversión, cupón y bienestar social. Sin embargo, el modelo r produce, en todos los escenarios, un mayor nivel de beneficios por firma, tasa de reciclaje y mejor desempeño ambiental.

Índice general

Introducción **1**

1. Revisión de literatura **4**

1.1. Modelos de logística inversa 4

1.2. Modelos de reducción de emisiones 6

1.3. Modelos de autorregulación ambiental 7

2. Responsabilidad Extendida del Productor **10**

2.1. Principales objetivos de la REP sobre la industria productora de AEE 12

2.2. Modelación de la REP en firmas de tecnología productoras de AEE 13

3. Modelo **15**

3.1. Preliminares 15

3.2. Modelo r: inversión en I+D en el proceso de reciclaje 18

3.3. Modelo p: inversión en I+D en el proceso de producción 20

4. Resultados **23**

4.1. Comparativo entre el modelo r y el modelo p 23

4.1.1. Cambios en el parámetro δ 24

4.1.2. Cambios en el parámetro γ 27

4.1.3. Cambios en el parámetro a 30

4.2. Ejemplo: Apple Trade In 33

4.3. Ejemplo: Tasa de recolección de RAEE en la Unión Europea 36

Conclusiones **39**

Apéndice A: Supuestos sobre los parámetros **41**

Apéndice B: Demostraciones **43**

Referencias **53**

Introducción

A partir de inicios del S.XXI, la preocupación sobre cuestiones ambientales se ha incrementado a nivel mundial y han pasado a formar parte de la agenda política de los países desarrollados. De la mano con este creciente interés, las investigaciones sobre estos temas han tomado relevancia y uno de los problemas ambientales en los que se ha puesto mayor atención, es en la generación de residuos.

Debido al incremento en la generación de residuos, es necesario implementar planes o políticas de recolección y reciclaje que sean eficientes y disminuyan el daño ambiental. En esta dirección es que realizamos este trabajo, el propósito es contribuir al análisis teórico sobre un mecanismo de recolección y reciclaje.

Los residuos que han tenido un mayor crecimiento son los provenientes de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), es evidente que los AEE se han modernizado y extendido a gran parte de la población mundial. Por ejemplo, el Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos 2017, calculó que en 2016 se generaban en el mundo 44,7 millones de toneladas métricas de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), de los que sólo se recicló el 20 % a través de canales adecuados, lo que implica 6.1kg por habitante, y estiman que para 2021 se generen 52.8 toneladas métricas y 6.8kg por habitante. Lo preocupante es que las medidas para el tratamiento de los RAEE se quedan obsoletas, son insuficientes o, en el peor de los casos, inexistentes en los países en vías de desarrollo. El daño ambiental generado por la extracción, producción, venta, uso y deshecho de los AEE es considerable y, aunque se han empezado a tomar medidas como la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y programas gubernamentales de recolección, esto no ha sido suficiente.

Los RAEE tienen una particularidad que los distingue de los demás residuos, debido a los materiales con los que son fabricados, contienen valor en sí mismos, no son sólo un residuo que genera gastos de reciclaje; de ellos pueden obtenerse materiales de gran valor

que disminuyan el costo de producción de un nuevo AEE. Además, esto contribuye por dos vías a la disminución del daño ambiental, primero, disminuye la extracción de recursos naturales no renovables y segundo, genera un incentivo para su recolección.

Dentro de la literatura ambiental se han investigado los motivos por los cuales una firma elegiría autorregularse, esto es relevante en la medida en que no todos los países tienen legislaciones que regulen este tipo de residuos. Y es que, debido a la particularidad de los RAEE se esperaría que esto fuera posible. Además, la literatura de emisiones sobre los incentivos de la inversión en Investigación y Desarrollo (I+D) para disminuir el costo de abatimiento ha demostrado que la inversión genera un efecto estratégico (Montero, 2002). Otras razones son: una mejora de la imagen de la firma con niveles positivos de Responsabilidad Corporativa Social (RCS) que incrementen la demanda de los consumidores con preferencias ambientales y sociales (Baron, 2008), o una elección prudente de un nivel de autorregulación ambiental esperando evitar una regulación estricta en el futuro[1] (Maxwell *et al.* 2000).

Un obstáculo para reciclar los RAEE es su alto costo en las últimas etapas del reciclaje (separación de los metales pesados y preciosos), es por ello que la inversión en I+D para disminuir este costo juega un rol fundamental dentro del desarrollo de los mecanismos para incrementar la tasa de recolección y reciclaje.

En el presente trabajo modelamos un mecanismo de recolección de RAEE para firmas de tecnología que implementan la REP, en el cual las firmas pagan al consumidor por su RAEE un cupón que puede ser utilizado para la compra de un nuevo AEE. Es importante notar que dentro de este modelo se asume que las firmas realizan el proceso de producción, recolección y reciclaje sin delegar ninguna actividad a un tercero, como es usual modelarlo en la literatura de logística inversa. Además, las firmas invierten en I+D con el propósito de disminuir sus costos.

Las inversión en I+D tiene un rol fundamental dentro de los modelos que desarrollamos. Ambos modelos utilizan el mismo mecanismo de recolección de RAEE: el cupón; lo que los distingue es el propósito de la inversión en I+D. En el primer modelo, modelo r, la

[1] Maxwell *et al.* (2000) alude únicamente a las corporaciones con intereses ambientales, ya sean firmas privadas o corporaciones pro-ambientales sin fines de lucro. En cambio, Baron (2008), hace referencia a la Responsabilidad Corporativa Social (RCS), que incluye la responsabilidad ambiental y otras dimensiones de responsabilidad social como la ética y el desarrollo social.

inversión tiene como objetivo disminuir el costo marginal del reciclaje, es decir, se invierte en el proceso de reciclaje. En el segundo modelo, modelo p, la inversión tiene como objetivo disminuir el costo marginal de producción, es decir, se invierte en el proceso productivo.

Los modelos se desarrollan como un juego en dos etapas que es resuelto por inducción hacia atrás. En la primera etapa las firmas eligen el nivel de inversión en I+D y del cupón, en la segunda etapa las firmas compiten en cantidad y eligen su nivel de producción. Para cada modelo se halla un equilibrio único simétrico perfecto en subjuegos que es evaluado fijando algunos parámetros que permiten que las soluciones sean económicamente significativas. Además, se demuestra que es posible que las firmas se autorregulen, en otras palabras, que su cupón sea positivo.

Se realiza estática comparativa sobre parámetros de especial interés y se encuentra que, en general, el modelo p es superior en producir un mayor nivel de producto, inversión en I+D, cupón y bienestar social. En contraste, el modelo r es superior en los beneficios por firma que genera, tasa de recolección de RAEE y tiene un mejor desempeño ambiental.

Este tipo de mecanismo ha sido implementado por Apple, con su programa de reciclaje Apple Trade In, para el cual se realiza un ejercicio en términos del cupón como porcentaje del precio con el fin de mostrar al lector los niveles del cupón que actualmente ofrece Apple. Es interesante apuntar que, este programa tiene una gran similitud con el modelo r, pues Apple ha invertido en la disminución de su costo de reciclaje desarrollando un robot, Daisy.

Una de las medidas más importantes para los reguladores que eligen aplicar alguna política sobre los RAEE, es la tasa de recolección. Por ejemplo, la Directiva de RAEE de la Unión Europea fija metas sobre esta medida a ser evaluadas en el futuro; además, tiene un reporte muy detallado sobre el desempeño en la materia de cada país miembro, del cual tomamos los datos de la tasa de recolección para el periodo 2010-2014, con el fin de mostrar información oficial sobre RAEE.

El resto del documento esta organizado de la siguiente forma. En el capítulo 1 se aborda una breve revisión de literatura. La REP, sus objetivos y la forma en que se modela se describe en el capítulo 2. En el capítulo 3 se desarrollan los modelos r y p por medio de un juego de dos etapas. Los principales resultados y dos ejercicios empíricos son analizados en el capítulo 4. El último capítulo muestra las conclusiones. Los desarrollos matemáticos y las demostraciones se pueden consultar en el apéndice B.

Capítulo 1

Revisión de literatura

Dentro de la literatura ambiental microeconómica, no se ha modelado la aplicación de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), como aquí se pretende. El trabajo se basa en 3 tipos de literatura: modelos de logística inversa, modelos de reducción de emisiones y modelos de autorregulación. Del primero, proviene la idea primitiva de modelar la remanufactura de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) aprovechando sus componentes, del segundo, cómo introducir la variable de inversión en I+D en una firma que adopta una regulación ambiental y, del último, la posibilidad de autorregulación.

1.1. Modelos de logística inversa

Los modelos de logística inversa, consideran principalmente 4 tipos de agentes: la firma productora, los consumidores, los recolectores y las remanufacturas o recicladoras, las últimas dos funciones las puede realizar la firma productora. El proceso es el siguiente: la firma vende a los consumidores su producto, al término de su vida útil desechan el producto usado que la firma de recolección se encarga de recuperar y trasladar a la firma de reciclaje o a la firma productora para que se procesen y/o remanufacturen de forma adecuada. Si la firma productora decide que un tercero se encargue de los procesos de recolección y reciclaje, el costo de esto es absorbido por ella debido a la responsabilidad legal y financiera que tienen sobre el bien que producen desde la extracción de los insumos, hasta el final de su vida útil.

Sobre este proceso de cadena inversa de suministro, Savaskan *et al.* (2004) resaltan la importancia del recolector y analizan tres opciones que la firma productora tiene para

recoger los productos usados y reciclarlos o remanufacturarlos en un sistema descentralizado de toma de decisiones. Los canales para la recolección son: 1) recogerlos él mismo directamente de los consumidores, 2) ofrecer incentivos adecuados a un minorista existente (que ya tiene un canal de distribución) para inducir la recogida, o 3) subcontratar la actividad de recogida a un tercero. Savaskan *et al.* (2004) modelan las opciones asumiendo que la firma productora es el líder en Stackelberg y encuentran que, el vendedor minorista, es el encargado más eficaz para recoger el producto usado debido a su cercanía con los consumidores, todo esto asumiendo que el producto ya se encuentra en el mercado. Además, demuestran que se pueden diseñar mecanismos para que los beneficios de esta cadena inversa de suministro sean del mismo nivel que en un sistema de coordinación centralizado en el cual se maximizan las funciones del productor, recolector y remanufacturador como una sola firma que realiza e internaliza todos los procesos.

En el contexto de investigación de cadenas de logística inversa, los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) han adquirido mayor importancia debido su crecimiento y a la preocupación, por parte de algunos países, de legislar sobre su proceso de reciclaje, tal es el caso de la Unión Europea, Canadá, Japón y algunos estados de Estados Unidos. Para ello, se han implementado diversas legislaciones, Toyasaky *et al.* (2011) abordan dos de ellas, la recolección por medio de una entidad no lucrativa que proporciona a los recicladores los RAEE para su procesamiento y la recolección competitiva entre las empresas de reciclaje, el regulador fija una tasa de recolección y reciclaje que es pagada por las firmas productoras como responsables de todo el ciclo de vida del bien que producen.

En el trabajo de Toyasaky *et al.* (2011), en el modelo monopolístico, los costos de reciclaje son calculados por el promedio del costo unitario entre los recicladores y este costo es cobrado por la organización sin fines de lucro a las firmas productoras. En el modelo competitivo, las firmas pagan directamente a las recicladoras por el servicio de reciclaje. Ambos modelos se resuelven mediante un juego de dos etapas: en la primera, los recicladores eligen el precio que cobran a las firmas productoras por reciclar, y en la segunda las firmas eligen el precio del producto. Toyasaky *et al.* (2011) demuestran que el esquema competitivo es superior en términos de un menor precio del producto para los consumidores y mayores beneficios para las firmas productoras y recicladoras.

En esta misma dirección, las políticas sobre RAEE tienen como objetivo incrementar la tasa de recolección para disminuir la contaminación ocasionada por su contenido peligroso cuando son vertidos en los depósitos de basura comunes de forma incorrecta o en mercados

inseguros de reciclaje, como los existentes en India o China, es decir, que los movimientos de RAEE así como su reciclaje o eliminación se realicen de acuerdo con el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación (2014) adoptado por 181 países.

Una de las formas para incrementar la tasa de recolección y reciclaje es que los consumidores sean conscientes del daño ambiental que causan los RAEE y, en esta línea, Guo *et al.* (2018) centran su atención en los esfuerzos en publicidad para incrementar la tasa de recolección y reciclaje. Analizan los esfuerzos en publicidad con un modelo de teoría de juegos con tres opciones: 1) gastos en publicidad a cargo de la firma productora, 2) gastos a cargo del reciclador, o 3) maximizar la suma de sus beneficios sobre los esfuerzos en publicidad y ambos agentes aporten. Sus resultados demuestran que el bienestar aumenta en el caso en el que se toma una decisión centralizada, es decir, en el que la firma productora y el reciclador cooperan en los esfuerzos de publicidad.

1.2. Modelos de reducción de emisiones

Existe abundante literatura sobre reducción de emisiones y los instrumentos que pueden ser empleados para inducir a las firmas a disminuir su nivel de emisiones, sin embargo, este trabajo está basado en los modelos que incluyen inversión en I+D como una variable de elección para la firma.

Montero (2002) modela cuatro instrumentos de política ambiental: normas de emisión absolutas, estándares relativos, subasta de permisos y permisos comerciables, los primeros dos de comando y control y los últimos dos basados en el mercado. Compara, sin utilizar una forma funcional específica, los incentivos en inversión en I+D para cada uno de estos instrumentos distinguiendo el efecto estratégico y el efecto directo[1] que esta variable tiene sobre las firmas cuando compiten en cantidad en un oligopolio. Demuestra que los instrumentos de comando y control pueden superar, en generación de incentivos en

[1] De acuerdo con Montero (2002) p. 24, en la que hace referencia al trabajo de Tirole (1988) p. 323-336, el incentivo de las firmas para invertir en I+D tiene dos efectos: efecto directo y efecto estratégico. El efecto directo del incentivo es la reducción del costo, lo que representa un aumento en los beneficios de la firma, esto no afecta a la elección sobre el nivel de producto de las firmas rivales. En un contexto de competencia perfecta es el único efecto que se presenta. En cambio, el efecto estratégico es el que tiene como resultado una influencia de la elección de inversión en I+D sobre el nivel de producto de las firmas rivales, es decir, la influencia sobre las correspondencias de mejor respuesta.

inversión en I+D, a los instrumentos basados en el mercado; esta conclusión se basa en que las políticas de comando y control siempre tienen efectos estratégicos positivos, mientras que las basadas en el mercado pueden tener efectos negativos.

Continuando con esta línea de investigación sobre los incentivos a la inversión en I+D, Amir *et al.* (2018) analizan, con formas funcionales definidas, únicamente los instrumentos de comando y control en términos de nivel de producto y bienestar social, incluyendo una función de daño ambiental.

Presentan un análisis específico sobre dos formas de regulación de emisiones de comando y control, absolutas y estándar por unidad, bajo una competencia oligopólica *à la* Cournot con un modelo de demanda lineal, costos cuadráticos de abatimiento y una función cuadrática de daño ambiental. Comparan ambas políticas en un juego de dos etapas: en la primera etapa los competidores eligen el monto en inversión en I+D y en la segunda, la cantidad a producir. Para calcular la propensión de las firmas a invertir en I+D y el equilibrio de la industria resuelven el juego por inducción hacia atrás y concluyen que ninguno de los dos instrumentos es totalmente superior al otro en términos de generar más I+D y nivel de producto, los resultados para el bienestar social son igual de ambiguos y dependen en gran medida del parámetro que hace referencia a la cota que el regulador impone a la proporción de contaminación que una empresa puede emitir por unidad de producción.

Amir *et al.* (2018), extienden el modelo de dos etapas e introducen a un regulador que elige el nivel máximo de emisiones. Para analizarlo utilizan un juego de tres etapas: en la etapa cero, el regulador elige la cota de emisiones, en la primera, las firmas eligen su inversión en I+D y en la segunda, su nivel de producción. El equilibrio perfecto en subjuegos no se puede expresar de forma explícita y no es analíticamente tratable para el instrumento que impone un estándar de emisiones por unidad, pero establecen soluciones numéricas para analizar los resultados. Concluyen que el bienestar es mayor con la intervención del regulador utilizando la política de emisiones estándar por unidad.

1.3. Modelos de autorregulación ambiental

Los modelos de autorregulación permiten conocer las condiciones bajo las cuales las firmas estarían dispuestas a autoimponerse una regulación ambiental. En los trabajos

citados a continuación se concluye que la autoregulación es posible y que, algunas de las principales razones por las que existe son: las firmas pretenden aumentar su reputación ante los consumidores para incrementar su demanda como en Mc Williams y Siegel (2001)[2] y Baron (2008)[3], las asociaciones de firmas temen la presión y boicot de los activistas contra su producto como argumenta Baron (2001), las firmas prefieren una autorregulación sensata a tiempo, que una regulación estricta en el futuro como Maxwell *et al.* (2000) o, como argumentan Hirose *et al.* (2020), incluso si ninguna de las razones anteriores fueran el motivo de la autoregulación, las firmas la adoptarían debido al efecto que tiene sobre la disminución de la competencia.

Es de especial interés para este trabajo de investigación las últimas dos visiones sobre la autorregulación debido a la forma de modelarla. Maxwell *et al.* (2000), presentan un modelo de teoría de juegos en tres etapas para elegir el nivel de abatimiento de emisiones. En la primera etapa las firmas eligen un nivel de reducción de emisiones voluntario, en la segunda etapa se analiza la entrada de los consumidores por medio de una organización pro-ambiental a un juego de influencia en el que, tanto consumidores como firmas, destinan recursos para influir en el proceso político de elección sobre nivel de abatimiento obligatorio impuesto por regulador, en la última etapa se compite *à la* Cournot. Una de las principales conclusiones del artículo es que, que el juego de influencia no se realice en la segunda etapa, es decir, que los consumidores decidan no entrar, es Pareto superior a la realización del mismo, por lo que, para evitar una regulación de emisiones más estricta la firma elegirá un nivel voluntario de emisiones tal que bloquee la entrada de los consumidores en el juego de influencia, es decir, se autorregula.

Hirose *et al.* (2020) analizan, por medio de un juego de dos etapas y competencia en precio y cantidad, si hay niveles positivos de autorregulación de forma cooperativa o no cooperativa. Si las firmas dentro de una asociación industrial se coluden para fijar un nivel de autoregulación, dicho con sus palabras, un nivel de Responsabilidad Social Corporativa Ambiental (RSCA), el nivel es positivo, bajo un compromiso de emisiones absoluto en competencia en precio y cantidad. En cambio, cuando lo hacen de forma no cooperativa, se obtienen niveles positivos únicamente bajo competencia en precios. El resultado para el

[2] En el trabajo de Mc Williams y Siegel (2001) plantean que existen muchos factores para determinar el nivel de Responsabilidad Corporativa Social (RCS), sin embargo, la demanda de la RCS esta basada fundamentalmente en la demanda de los consumidores.

[3] Enfatiza el hecho de que los consumidores pueden recompensar a la firma que tiene niveles positivos de RCS estando dispuestos a pagar más por un bien que proviene de una empresa de este tipo.

instrumento con un límite de emisiones por unidad, es un nivel de RSCA no positivo bajo competencia en cantidad ya sea de forma cooperativa o no cooperativa. Esta diferencia es explicada por los autores debido al efecto, diferenciado en ambos instrumentos y tipos de competencia, sobre el nivel del producto y los precios, es decir, en los modelos en los que se alcanza un nivel positivo de RSCA aumenta el precio o disminuye la cantidad, lo que provoca un incremento de los beneficios de las firmas, esta es la razón de la adopción de la autorregulación.

Capítulo 2

Responsabilidad Extendida del Productor

En la segunda mitad del S. XX, comenzaron los esfuerzos por cuantificar y comprender el impacto que un producto tenía en el medio ambiente en todo su ciclo de vida, es decir, durante las siguientes etapas: adquisición de materias primas, proceso y fabricación, distribución y transporte, uso, reutilización y mantenimiento, reciclaje y gestión de residuos. Por ejemplo, en 1969 el Midwest Research Institute realiza el primer Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para Coca-Cola (Romero, 2003).

El ACV ha sido una herramienta para conocer y gestionar el impacto de un producto durante su ciclo de vida. Se encuentra estandarizado por el International Organization for Standardization (ISO), su definición y objetivo se encuentran en la norma ISO 14040. Particularmente, la norma ISO 14040:1997 lo define como "una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto". Además de conocer el impacto de un producto, el ACV puede ayudar a identificar mejoras ambientales, proporcionar información relevante para la toma de decisiones empresariales o gubernamentales.

Sin embargo, estos esfuerzos por conocer el impacto ambiental de un producto no son suficientes si no van acompañados de medidas para fincar responsabilidades sobre este impacto, enfatizando en las etapas de reciclaje y gestión de residuos, y no sólo durante su proceso de producción. Es por ello que, la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) adquiere relevancia para gestionar el impacto de las últimas etapas del ciclo de vida de un producto.

La REP es una medida para disminuir la contaminación ambiental, ocasionada por los residuos de los productos al final de su vida útil, que pretende fincar responsabilidad a algún agente, ante un vacío legal y económico, sobre quién es responsable del residuo. La idea central es que las firmas son responsables de los residuos que su producción y consumo generen, así como del residuo del producto. La firma puede hacerse responsable de los residuos de distintas formas: directa o indirectamente. Si se hace responsable de forma directa se encarga de recolectar, procesar y reciclar los residuos ella misma o contrata a un tercero que realiza esas acciones. Si se hace responsable de forma indirecta, el etiquetado y publicidad sobre el daño ambiental puede ser suficiente. También es común que se combinen ambos tipos.

La REP puede ser aplicada sobre todas las industrias, sin embargo, en el presente documento es de especial interés su aplicación en la industria tecnológica productora de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), por dos principales motivos: actualmente son los residuos con una mayor tasa de crecimiento y, debido a los materiales con que son hechos, de estos residuos pueden extraerse insumos valiosos, es decir, su reciclaje no sólo conlleva un costo, también puede implicar un beneficio tanto económico como ambiental.

La forma más usual de que las firmas se responsabilicen directamente de sus Residuos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), es que contraten a una empresa externa encargada de la recolección a la cual le pagan por sus servicios, tal como se ha modelado en la literatura sobre logística inversa.

Ambas formas de REP implican impactos en las firmas y sus beneficios. Si las firmas se hacen cargo del RAEE de forma directa pueden internalizar las decisiones de inversión en I+D y el mecanismo para la recolección, de lo contrario, pagan por el servicio que la firma externa les brinda.

En las firmas productoras de AEE existe una tendencia a internalizar estas decisiones, como el programa de Apple Trade In que, en conjunción con Daisy (robot que desensambla distintos modelos de iPhone) recolectan, reciclan y reutilizan los insumos recuperados. Para implementar este programa la firma invirtió en I+D y diseñó un mecanismo de recolección del RAEE, estos son algunos de los principales objetivos que tiene la REP.

2.1. Principales objetivos de la REP sobre la industria productora de AEE

La REP es una consecuencia de delimitar las responsabilidades que el gobierno, las firmas y los consumidores tienen sobre los residuos. El gobierno debe brindar un marco jurídico adecuado para el procesamiento de los diversos tipos de residuos, los consumidores deben estar informados sobre el impacto ambiental del producto que consumen y ser conscientes de que ese consumo genera un residuo. La responsabilidad de las firmas no termina en el momento de la venta del producto, esta responsabilidad se extiende hasta el final de la vida útil del bien que producen, cuando es procesado y reciclado correctamente.

Debido al rápido crecimiento de los RAEE a partir de inicios del S.XXI, algunos países crearon organismos para disminuir los daños ambientales y a la salud humana ocasionados por este tipo de residuos. La organización pionera en esta materia es la Directiva de RAEE de la Unión Europea creada en 2002, entró en vigor en febrero de 2003, su principal objetivo era incrementar la tasa de reciclaje y reuso por medio de la creación de mecanismos para la recolección de RAEE que no tuvieran costo alguno para los consumidores.

De acuerdo con lo publicado por el *Official Journal of the European Union* el 24 de Julio del 2012 sobre los acuerdos tomados por la directiva de RAEE en la Unión Europea en junio del 2012, uno de los principales objetivos es mejorar el proceso de recolección, incrementar la reutilización y reciclaje de los AEE para disminuir el volumen de RAEE mal procesados y promover el uso de los insumos recuperados para incrementar la eficiencia de los recursos.

Debido al gran volumen de exportaciones ilegales de RAEE, otro de los objetivos es limitar este tipo de exportaciones desde la Unión Europea, cumpliendo con el Convenio de Basilea.

En el documento publicado por la Directiva de RAEE de la Unión Europea en 2012, se fijan cuotas mínimas de recolección en un plazo de 4 años, es decir, para 2016 los Estados miembros deberán recolectar anualmente un promedio del 45 % del peso de los AEE comercializados en sus naciones y, 3 años después el compromiso es que la tasa de recolección alcance el 65 %.

Además, la Directiva de RAEE enfatiza sobre la REP para fomentar el rediseño y procesos de producción que tengan en cuenta que los AEE deben ser reparados, pueden ser reutilizados y al fin de su vida útil, desmontados y reciclados. En otras palabras, las firmas deben tener en cuenta el proceso al que son sometidos los RAEE, para su correcto reciclaje, y deben facilitarlo por medio del rediseño del producto.

También, se incluye un acuerdo en el que los RAEE muy pequeños (menos de 25 cm) deben ser recogidos por los comercios minoristas (con al menos 400 m^2 de superficie) sin cargo alguno para los consumidores.

Teniendo en cuenta cuáles son los objetivos de la REP sobre la industria de los AEE, este trabajo pretende modelar firmas que internalicen las decisiones de recolección e inversión en I+D.

2.2. Modelación de la REP en firmas de tecnología productoras de AEE

La REP de firmas productoras de AEE puede ser modelada de dos formas: internalizando las elecciones sobre el mecanismo de recolección y reciclaje, o subrogando el servicio de reciclaje y recolección a una firma externa. En el presente documento estudiamos el caso en el cual la firma es productora, recolectora y recicladora, con base en los resultados de la literatura de logística inversa. Además, asumimos que la firma se autorregula y elige implementar la REP. Los motivos por los cuales decide implementarla no son objeto de esta investigación, sin embargo, debido a la estructura del modelo las razones por las que lo hace se apegan a la teoría sobre anticipar una regulación más estricta o disminuir la competencia. Debido a que este tipo de residuos contienen un valor en sí mismos la autorregulación podría surgir también de esta particularidad.

Comparamos dos modelos en los cuales las firmas utilizan un mismo mecanismo de recolección pero invierten en I+D en procesos distintos. El mecanismo de recolección por firma, para ambos modelos, es el siguiente: la firma otorga un cupón al consumidor por devolver su RAEE que puede ser canjeado en la compra de un nuevo producto de la firma, los consumidores únicamente pueden devolver los RAEE que fueron producidos por esa firma. El mecanismo es similar al empleado por Apple en su programa Apple Trade In.

Una vez que la firma ha recolectado el RAEE por medio de un cupón, éste es reciclado y procesado por ella misma. De este proceso, la firma obtiene materiales valiosos que puede utilizar en su proceso de producción para la fabricación de un nuevo producto, esto implica que hay una disminución en el costo de producción debido a la reutilización de insumos.

La variable de decisión que distingue a los modelos es la inversión en I+D. En el modelo r, la firma invierte en I+D para disminuir los costos de reciclaje, por ejemplo, invierte en un robot que sistematice el proceso de desensamble o en el diseño del producto con la intención de que su desensamble sea menos costoso. En el modelo p, la firma invierte en I+D con la intención de disminuir su costo de producción, por ejemplo, invierte en el diseño de un nuevo proceso productivo, una línea de producción más eficiente o en el diseño de un nuevo producto con un menor uso de materiales costosos.

Estos modelos pueden tener grandes costos iniciales, sin embargo, el internalizar instrumento y reciclaje permite la recuperación de insumos valiosos. La firma invierte una gran suma para desarrollar los mecanismos y cadenas de desensamble para el reciclaje, esta acción le permite elegir el instrumento para la recolección que maximice sus beneficios, además, debido a que los RAEE no son como los residuos ordinarios (sin gran valor por su contenido) el reciclaje le permite a la firma recuperar insumos valiosos que disminuyen sus costos de producción. Es por ello que la tendencia de la industria tecnológica es la de recuperar sus productos al término de su vida útil para desensamblarlos, reciclarlos y aprovechar los materiales y componentes valiosos para la producción de un nuevo bien.

Por ejemplo, Apple ha invertido grandes recursos en una gran planta de reciclaje en Cupertino, y ha desarrollado robots para desensamblar varios modelos de iPhone. Daisy es el último robot creado por Apple que, de acuerdo al comunicado en su página oficial el 19 de abril de 2018, puede desensamblar hasta 200 iPhone por hora.

En el siguiente capítulo se detalla el mecanismo de los modelos.

Capítulo 3

Modelo

3.1. Preliminares

Estudiamos dos modelos: modelo r y modelo p, con primitivas idénticas. La distinción entre ambos es el propósito que tiene la inversión en I+D; en el modelo r permite reducir costos en el proceso de reciclaje, mientras que en el modelo p, reduce costos de producción.

Consideramos dos firmas simétricas maximizadoras de beneficio que compiten *à la* Cournot[1] y eligen autorregularse, por ejemplo para evitar una regulación estricta o por motivos estratégicos, por medio de la implementación de la REP directa. Sea la firma i que produce q_i, con $i, j \in \{1, 2\}$, $i \neq j$. La producción total de la industria es $Q = q_i + q_j$[2]. La función de demanda inversa del mercado esta dada por $P(Q) = a - bQ$, con $a, b > 0$. La función de costos de la firma i es lineal dada por $C(q_i) = cq_i$.

Para implementar la REP y recuperar los RAEE, la firma utiliza como instrumento el cupón z que paga al consumidor cuando devuelve el AEE al final de su vida útil. La oferta de RAEE es una función creciente en el cupón z_i, $w_i(z_i) = \alpha + \beta z_i$, con $\alpha, \beta > 0$, dónde α es la cantidad recolectada si $z_i = 0$ y β es la sensibilidad de la oferta ante cambios en z_i. El límite superior de esta oferta es q_i, es decir, los consumidores sólo pueden devolver como

[1] Usar un modelo de Cournot simplifica su solución y nos permite centrar el análisis sobre los cambios en los resultados del equilibrio como función de las variables de interés. Además, consideramos que para la industria que modelamos existen productos que son sustitutos muy cercanos, por ejemplo, dos modelos de celulares de alta gama tienen funciones muy similares.

[2] Al utilizar un dupolio de Cournot, se asume que los bienes producidos por ambas empresas son sustitutos perfectos, es por ello que la cantidad total de la industria es la suma de la cantidad por firma.

máximo toda la producción generada por la firma, por lo tanto, $w_i(z_i)$ es la cantidad que es devuelta por los consumidores si la firma i paga z_i, $0 < w_i(z_i) \leq q_i$. La cantidad total de RAEE recolectados por las firmas es $W = w_i + w_j$. Una importante medida sobre el éxito de la implementación de la REP es la tasa de recolección de RAEE, dada por $\frac{W}{Q}$.

La I+D es una variable de elección para la firma, similar en Amir *et al.* (2018) asumimos que el costo de reducir el costo de reciclaje marginal constante f está dado por x_i, en el modelo r, y en el modelo p reduce el costo marginal de producción c. El costo de la inversión en I+D está caracterizado por la función cuadrática $g(x_i) = \frac{\gamma x_i^2}{2}$, con $x_i \geq 0$ y $\gamma > 0$. Es decir, en el modelo r, la firma invierte en I+D para reducir el costo de reciclaje, por ejemplo, Apple invierte en Daisy, un robot que desensambla en serie hasta 200 iPhone por hora[3]. En el modelo p, la firma invierte en I+D para reducir el costo de producción, por ejemplo, Apple invierte en el rediseño del iPhone para que sea menos costoso de producir.

La función de costos de reciclaje de RAEE en el modelo r, para la firma i que utiliza como instrumento el cupón z_i, está dada por $F(z_i, x_i) = (f + z_i - x_i)w_i(z_i)$, dónde f es el costo marginal de reciclaje constante. $F(z_i)$ es creciente en f y z_i y decreciente en x_i. Si la firma i invierte en disminuir el costo marginal de producción c, la función de costos de reciclaje del modelo p es $F(z_i) = (f + z_i)w_i(z_i)$, creciente en sus argumentos.

Como consecuencia del proceso de reciclaje, los insumos que son recuperados disminuyen el costo marginal de producción c, en δz_i, $\delta > 0$. Es decir, δ es el parámetro que mide la recuperación de los insumos con base en el cupón, si $0 < \delta < 1$ la firma habrá recuperado sólo una parte de lo que pagó por el cupón, en cambio, si $\delta \geq 1$ los insumos recuperados igualan o superan en valor al cupón z_i.

Con base en las definiciones anteriores, los beneficios para el modelo r son $\pi(q_i, x_i, z_i) = q_i[a - b(q_i + q_j) - c + \delta z_i] - [f + z_i - x_i][\alpha + \beta z_i] - \frac{\gamma x_i^2}{2}$ y para el modelo p son $\pi(q_i, x_i, z_i) = q_i[a - b(q_i + q_j) - c + \delta z_i + x_i] - [f + z_i][\alpha + \beta z_i] - \frac{\gamma x_i^2}{2}$.

Con el fin de analizar el Bienestar Social (BS), definimos la función de daño ambiental que es una función decreciente en W y creciente en Q, dada por $D(Q, W) = \frac{\mu(Q-W)^2}{2}$. El incremento en la tasa de recolección de los RAEE disminuye el daño ambiental, por medio de dos vías: la recuperación y correcto manejo de RAEE altamente contaminantes y la no

[3]Apple Trade In https://www.apple.com/shop/trade-in

extracción de nuevos recursos utilizados como insumos. El BS para los modelos r y p, respectivamente, se definen como:

$$BS = \int_0^{2q} [a - b(t)]\mathrm{d}t - 2q[c - \delta z] - 2[f - x][\alpha + \beta z] - \gamma x^2 - 2\mu[q - w]^2$$

$$BS = \int_0^{2q} [a - b(t)]\mathrm{d}t - 2q[c - \delta z - x] - 2f[\alpha + \beta z] - \gamma x^2 - 2\mu[q - w]^2$$

Los modelos se analizan como un juego de dos etapas. En la primera etapa, ambas firmas eligen simultáneamente la inversión en I+D y el monto del instrumento z. En la segunda etapa, compiten *à la* Cournot para elegir el nivel de producción, una vez que han observado la decisión sobre el instrumento e inversión en I+D en la primera etapa. La solución de los modelos, en este trabajo, se limita al equilibrio perfecto en subjuegos, resuelto por inducción hacia atrás.

En la literatura sobre emisiones y autorregulación se han utilizado funciones sin una forma funcional específica, Montero (2002), Maxwell *et al.* (2000) o con funciones definidas, como en Amir *et al.* (2018). Debido a la ambigüedad de los resultados con algunas formas genéricas, utilizamos formas funcionales definidas para generar un criterio de comparabilidad entre los modelos.

Obtendremos el equilibrio perfecto en subjuegos vía inducción hacia atrás. En la segunda etapa las firmas compiten *à la* Cournot y eligen su nivel de producción; en la primera etapa, las firmas maximizan su función de beneficios respecto al precio del cupón z_i y a x_i, el nivel de I+D. Al elegir los niveles del instrumento y la inversión, se asume que las firmas han anticipado de forma correcta el equilibrio en el producto.

Además, asumimos que las soluciones son económicamente viables, es decir, que la cantidad del producto, el precio y el costo, una vez descontada la disminución por la inversión y los insumos recuperados, son positivos. Los supuestos necesarios para esta condición se encuentran en el apéndice A.

3.2. Modelo *r*: inversión en I+D en el proceso de reciclaje

El instrumento para la recolección es un cupón por medio del cual la firma productora de tecnología recupera el RAEE para desensamblarlo, procesarlo, reciclarlo y recuperar los insumos que puedan aprovecharse para la producción de un nuevo AEE. Estos insumos disminuyen el costo marginal de producción en δz_i al no ser comprados, sino reutilizados.

En la segunda etapa del juego las firmas compiten *à la* Cournot y eligen de forma simultánea su nivel de producción q_i, para la firma i, y q_j para su rival, con $i, j \in \{1, 2\}$, $i \neq j$. Por lo tanto, el problema de maximización de la firma i esta dado por:

$$\max_{q_i} q_i[a - b(q_i + q_j) - c + \delta z_i] - [f + z_i - x_i][\alpha + \beta z_i] \tag{3.1}$$

Con condición de primer orden:

$$a - 2bq_i - bq_j - c + \delta z_i = 0 \tag{3.2}$$

Condición de segundo orden:

$$-2b < 0$$

El producto de equilibrio de la firma i es:

$$q_i(z_i, z_j) = \frac{a - c + 2\delta z_i - \delta z_j}{3b} \tag{3.3}$$

En la primera etapa del juego, las firmas eligen simultáneamente el monto del cupón z_i y z_j y el nivel de inversión por medio de las variables x_i y x_j, $x_i, x_j \in [0, f + z_i]$, que disminuyen su costo de reciclaje f. Es decir, el problema de maximización de la firma i es:

$$\max_{z_i, x_i} q_i(z_i, z_j)[a - b(q_i(z_i, z_j) + q_j(z_i, z_j)) - c + \delta z_i] - [f + z_i - x_i][\alpha + \beta z_i] - \frac{\gamma x_i^2}{2} \tag{3.4}$$

Con condiciones de primer orden:

$$\frac{2\delta}{3b}[a - bq_j(z_i, z_j) - c + \delta z_i] - \beta[f + 2z_i - x_i] - \alpha = 0 \tag{3.5}$$

$$\alpha + \beta z_i - \gamma x_i = 0 \tag{3.6}$$

Condición de segundo orden:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{8\delta^2}{9b} - 2\beta & \beta \\ \beta & -\gamma \end{pmatrix}$$

El cual es definido negativo por supuesto 1 del apéndice A.

Por simetría, el equilibrio único del juego está caracterizado por q^r, x^r y z^r, se utiliza el superíndice r para hacer referencia al equilibrio en el modelo en el que la firma invierte en I+D para disminuir costos de reciclaje.

Los cálculos correspondientes a esta sección se encuentran en el apéndice B.

Lema 1. *Bajo el supuesto 1, existe un único equilibrio simétrico perfecto en subjuegos del juego de dos etapas bajo el modelo con cupón e inversión en reciclaje. Los niveles de producto, inversión en I+D, y precio del cupón que lo caracterizan son:*

$$q^r = \frac{3\beta(a-c)(2\gamma-\beta) - 3\delta(\beta - \alpha\beta + \alpha\gamma + f\beta\gamma)}{18b\beta\gamma - 9b\beta^2 - 4\gamma\delta^2}$$

$$x^r = \frac{4\beta\delta(a-c) + 4\delta^2(1-\alpha) - 9b(2\beta - \alpha\beta + f\beta^2)}{18b\beta\gamma - 9b\beta^2 - 4\gamma\delta^2}$$

$$z^r = \frac{4\gamma\delta(a-c) - 9b(\beta - \alpha\beta + \alpha\gamma + f\beta\gamma)}{18b\beta\gamma - 9b\beta^2 - 4\gamma\delta^2}$$

Además, $0 < x^r < f + z^r$ *y* $0 < w^r \leq q^r$*, donde* $w^r = \alpha + \beta z^r$*.*

Es de primordial interés comprobar que existen parámetros para los cuales los instrumentos z_i y z_j son positivos, es decir, comprobar si es posible que las firmas se autorregulen dentro de este contexto. Si no existen parámetros para los cuales z^r es positivo, la autorregulación no sería posible en estos modelos, corroborando la tesis de Hirose *et al.* (2019) bajo competencia en cantidad y sin asociación industrial. En el capítulo 4 se muestran parámetros para los cuales $z^r > 0$.

Lema 2. *Dada z^r del equilibrio único perfecto en subjuegos y los supuestos del apéndice A, $z^r > 0$ si:*

$$4\delta\gamma a > 4\delta\gamma c + 9b(\beta - \alpha\beta + \alpha\gamma + f\beta\gamma)$$

Esta condición arroja un poco de luz acerca de la magnitud de a, una medida del tamaño de mercado, para que los cupones sean positivos, este análisis se retoma en la sección 4.1.3.

3.3. Modelo *p*: inversión en I+D en el proceso de producción

En el modelo desarrollado a continuación, la firma i utiliza el instrumento z_i con la misma función: recuperar el RAEE y procesarlo correctamente. De esto obtiene insumos para reutilizar en el proceso productivo que disminuyen el costo marginal de producción en δz_i. La discrepancia con el modelo expuesto anteriormente es que, la firma invierte en I+D para disminuir el costo de producción, $x_i \in [0, c - \delta z_i]$.

En la segunda etapa del juego, las firmas compiten *à la* Cournot y eligen de forma simultánea su nivel de producción. Por lo tanto, el problema de maximización de la firma i esta dado por:

$$\max_{q_i} q_i[a - b(q_i + q_j) - c + \delta z_i + x_i] - [f + z_i][\alpha + \beta z_i] \tag{3.7}$$

Con condición de primer orden:

$$[a - 2bq_i - bq_j - c + \delta z_i + x_i] = 0 \tag{3.8}$$

Condición de segundo orden:

$$-2b < 0$$

El producto de equilibrio de la firma i es:

$$q_i(z_i, z_j, x_i, x_j) = \frac{a - c + 2\delta z_i - \delta z_j + 2x_i - x_j}{3b} \tag{3.9}$$

En la primera etapa del juego, las firmas eligen simultáneamente el monto del cupón z_i y z_j y el nivel de inversión por medio de las variables x_i y x_j, que disminuyen sus costos de reciclaje. El problema de maximización de la firma i es:

$$\max_{z_i,x_i} q_i(z_i,z_j,x_i,x_j)[a-b(q_i(z_i,z_j,x_i,x_j)+q_j(z_i,z_j,x_i,x_j))-c+\delta z_i+x_i]-[f+z_i][\alpha+\beta z_i]-\frac{\gamma x_i^2}{2} \tag{3.10}$$

Con condiciones de primer orden:

$$\frac{2\delta}{3b}[a-bq_j(z_i,z_j,x_i,x_j))-c+\delta z_i+x_i]-\beta[f+2z_i]-\alpha=0 \tag{3.11}$$

$$\frac{2}{3b}[a-bq_j(z_i,z_j,x_i,x_j))-c+\delta z_i+x_i]-\gamma x_i=0 \tag{3.12}$$

Condición de segundo orden:

$$H=\begin{pmatrix} \frac{8\delta^2}{9b}-2\beta & \frac{8\delta}{9b} \\ \frac{8\delta}{9b} & \frac{8}{9b}-\gamma \end{pmatrix}$$

El cual es definido negativo por supuesto 1 del apéndice A.

Por simetría, el equilibrio único del juego está caracterizado por q^p, x^p y z^p. El superíndice p denota que la inversión en I+D se realiza para disminuir el costo marginal de producción.

Los detalles de los cálculos se encuentran en el apéndice B.

Lema 3. *Bajo los supuestos del apéndice A, existe un único equilibrio simétrico perfecto en subjuegos del juego de dos etapas bajo el modelo con cupón e inversión en producción. Los niveles de producto, inversión en I+D, y precio del cupón que lo caracterizan son:*

$$q^p=\frac{6\beta\gamma(a-c)-3\gamma\delta(\alpha+f\beta)}{2(9b\beta\gamma-4\beta-2\gamma\delta^2)}$$

$$x^p=\frac{4\beta(a-c)-2\delta(\alpha+f\beta)}{9b\beta\gamma-4\beta-2\gamma\delta^2}$$

$$z^p = \frac{4\gamma\delta(a-c) - (\alpha + f\beta)(9b\gamma - 4)}{2(9b\beta\gamma - 4\beta - 2\gamma\delta^2)}$$

Además, $0 < x^p < c - \delta z^p$ *y* $0 < w^p \leq q^p$*, donde* $w^p = \alpha + \beta z^p$*.*

Al igual que en el modelo r nos interesa saber bajo qué condiciones las firmas en el modelo p se autorregulan, es decir, bajo que condiciones z^p es positivo.

Lema 4. *Dada* z^p *del equilibrio único perfecto en subjuegos y los supuestos del apéndice A,* $z^p > 0$ *si:*

$$4\delta\gamma a > 4\delta\gamma c + (\alpha + f\beta)(9b\gamma - 4)$$

Similar al lema 2, las condiciones para que z^p sea positivo implican un valor relativamente alto de a. En el capítulo 4 se muestran parámetros para los cuales $z^p > 0$.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se analizan los resultados del modelo r y del modelo p. Debido al número de parámetros, es necesario fijar algunos y analizar cambios en los parámetros de mayor interés para este trabajo. Además, se muestran datos sobre la aplicación de un programa de cupón para Apple en España, llamado Apple Trade In, y sobre las tasas de recolección de RAEE en la Unión Europea para los años 2010-2014.

4.1. Comparativo entre el modelo r y el modelo p

En esta sección se analizan los resultados de los lemas 1, 2, 3 y 4 obtenidos en el capítulo anterior. Para realizar una comparación significativa, en las siguientes dos secciones se fijan los parámetros $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $f = 0.5$, en el primer apartado, se analiza el cambio en δ como una medida de recuperación, $\gamma = 3$, $a = 10$, en el segundo, el parámetro que varía es γ como una medida del costo de la I+D, $\delta = 0.5$, $a = 10$, y en el último apartado de la sección se analiza el cambio de a como una medida del tamaño de mercado, $\gamma = 3$, $\delta = 0.5$.

Con el fin de verificar qué modelo es superior al otro, se realiza una comparación en términos de qué instrumentos proveen un mayor nivel de producto, cupón, inversión en I+D y de bienestar social. Además, se compara el cupón como proporción del precio y la tasa de recolección de RAEE. El cupón como proporción del precio es un indicador que proporciona mayor información que el nivel del cupón y nos permite hacer comparaciones con lo que sucede en la realidad. La tasa de recolección es importante debido a que es una medida de éxito de recolección y un instrumento que utilizan los reguladores. Un ejemplo

de esto son los acuerdos sobre tasas mínimas de recolección en la Directiva de RAEE de la Unión Europea.

4.1.1. Cambios en el parámetro δ

El parámetro δ puede ser considerado como una medida de recuperación, esto es, si $0 < \delta < 1$ la firma i recupera una parte del precio del cupón en insumos que disminuyen el costo de producción, si $\delta \geq 1$ la firma habrá recuperado la totalidad de lo que pagó por el cupón y un excedente.

Los niveles de los parámetros que nos interesan son aquellos que permiten que los lemas 1, 2, 3 y 4 se cumplan, en otras palabras, que la cantidad de producto, de inversión y el cupón sean positivos, además, que los costos marginales netos sean positivos y que la cantidad que se recupera de RAEE por firma sea menor que la producción por firma.

Sean $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, c=3, f=0.5, $\gamma = 3$, $a = 10$ y $\delta \in [0.05, 1.00]$; el umbral inferior de δ es el necesario para que x^r, z^r y z^p sean positivos y el umbral superior permite que se cumpla la condición del lema 3, $q^p \geq w^p$.

En la tabla 4.1, se observan los resultados de evaluar los equilibrios únicos simétricos especificados en los lemas 1 y 3, las estimaciones para el modelo con inversión en I+D en el proceso de reciclaje se observan en las columnas con **r** en la parte superior y las estimaciones para el modelo con inversión en I+D en el proceso de producción tienen en el encabezado la letra **p**. Además, se incluye el análisis de los beneficios por firma, el daño ambiental, el bienestar social, la tasa de recuperación de RAEE, definida como la proporción que es recuperada por las firmas de la producción total, y el cupón como porcentaje del precio, que puede ser una medida que proporcione un análisis referente al precio del bien.

Tabla 4.1. Cambios en los resultados del equilibrio como función de δ cuando $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $f = 0.5$, $\gamma = 3$ y $a = 10$.

	δ = **0.50**		δ =**0.65**		δ =**0.80**		δ =**1.00**	
Variables	**r**	**p**	**r**	**p**	**r**	**p**	**r**	**p**
Producción por firma	2.339	2.773	2.410	2.864	2.524	3.006	2.773	3.309
Cupón	0.036	0.174	0.353	0.491	0.715	0.853	1.318	1.456
Cupón como porcentaje del precio	0.70 %	3.90 %	6.80 %	11.5 %	14.4 %	21.4 %	29.6 %	43.0 %
I+D por firma	0.012	1.233	0.118	1.273	0.238	1.336	0.439	1.471
Beneficios por firma	4.930	4.620	4.791	4.294	4.610	3.852	4.202	2.901
Daño ambiental	3.399	5.113	2.233	3.770	1.308	2.658	0.413	1.455
Tasa de recolección de RAEE	44.3 %	42.3 %	56.1 %	52.1 %	68.0 %	61.6 %	83.6 %	74.2 %
Bienestar Social	17.479	19.919	19.920	22.689	23.109	26.283	29.479	33.394

En la tabla 4.1 se observa que la producción por firma es creciente en δ para ambos modelos, pero el producto del modelo p crece a una tasa mayor y supera al producto del modelo r en todos los escenarios.

Respecto al nivel de los cupones, el cupón del modelo p es superior, ambos son crecientes, es decir, un incremento en la recuperación de insumos aumenta lo que las firmas están dispuestas a pagar por el RAEE. Esta aseveración se observa de una forma más dramática en la fila del cupón como porcentaje del precio, pues si las firmas recuperan la mitad del cupón como insumos, el cupón representa únicamente el 0.7 % y el 3.9 %, mientras que si recupera la totalidad del cupón como insumos las firmas están dispuestas a pagar un 29.6 % y un 43.0 %, para el modelo r y p, respectivamente. Esto muestra que el cupón como porcentaje del precio es altamente sensible a cambios en δ.

La inversión en I+D es la variable que distingue a ambos modelos, hay que tener claro que en el modelo p tiene un efecto estratégico, lo que significa que la que la firma puede influir en la elección sobre el nivel de producción de su rival al elegir su nivel de I+D, en cambio, en el modelo r esta variable se puede optimizar en cualquier etapa del juego sin influir en la elección de producto o cupón de la firma rival. La reflexión anterior nos dice que en el modelo p la inversión en I+D es una variable de elección con mayor importancia que en el modelo r; consistente con ello, la inversión en I+D es superior para el modelo p.

El producto por firma es menor para el modelo r, sin embargo, esta diferencia es más que compensada por un precio mayor y los menores niveles de cupón e inversión. Como resultado, los beneficios por firma son mayores para este modelo en todos los escenarios. Es importante notar que los beneficios, para ambos modelos, son decrecientes en δ debido a la mayor disposición de las firmas a incrementar el nivel del cupón, a la disminución del precio y al costo de la inversión. No hay que perder de vista el efecto que el cupón tiene sobre los beneficios, es decir, la elección del cupón en la primera etapa modifica los beneficios por medio de dos vías: de forma directa los disminuye al ser un costo para la firma, disminución que es compensada al recuperar una parte, la totalidad o un excedente dependiendo del parámetro δ, y de forma estratégica modifica la elección del nivel del producto.

El daño ambiental causado por los residuos que no son devueltos a las firmas y procesados de forma correcta es superior para el modelo p debido a que su nivel de producción es mayor y la tasa de recuperación, aunque también superior, no es suficiente para compensar esta diferencia.

La tasa de recolección crece a tasa creciente ante un aumento en el parámetro δ; es evidente que si z^r y z^p son crecientes en δ, manteniendo sin cambios los parámetros de la oferta de RAEE, y con el producto creciendo a menor tasa, la tasa de recolección es creciente en δ también. Cuando las firmas recuperan la totalidad del cupón en insumos y otorgan un porcentaje mayor del precio como cupón la tasa de recolección puede ser de hasta el 83.6 % y 74.2 % para el modelo r y p, respectivamente.

El bienestar social es superior en todos los escenarios en el modelo p debido a que el excedente del consumidor supera el mayor daño ambiental y los menores beneficios obtenidos por las firmas en este modelo.

Del análisis anterior se deriva la siguiente proposición:

Proposición 1. *Sean* $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, *c=3, f=0.5,* $\gamma = 3$, $a = 10$ *y* $\delta \in [0.50, 1.00]$, *entonces:*

a) $q^r < q^p$ *y* q^r, q^p *crecientes en* δ.
b) $z^r < z^p$ *y* z^r, z^p *crecientes en* δ.
c) $\frac{z^r}{P^r} < \frac{z^p}{P^p}$ *y* $\frac{z^r}{P^r}$, $\frac{z^p}{P^p}$ *crecientes en* δ.
d) $x^r < x^p$ *y* x^r, x^p *crecientes en* δ.
e) $\pi^r > \pi^p$ *y* π^r, π^p *decrecientes en* δ.

f) $D^r < D^p$ *y* D^r, D^p *decrecientes en* δ.
g) $\frac{w^r}{q^r} > \frac{w^p}{q^p}$ *y* $\frac{w^r}{q^r}$, $\frac{w^p}{q^p}$ *crecientes en* δ.
h) $BS^r < BS^p$ *y* BS^r, BS^p *crecientes en* δ.

La proposición 1 demuestra que, bajo los parámetros dados, el modelo con inversión en I+D en el proceso de producción produce un mayor producto, cupón, I+D y bienestar social, todos ellos crecientes en una mayor recuperación de insumos, expresado en el aumento en δ. Sin embargo, los beneficios de la firma son decrecientes en δ y superiores en todos los escenarios para el modelo r. La demostración se incluye en el apéndice B.

La siguiente sección analiza los cambios en el parámetro γ, para dar robustez a las conclusiones de la proposición 1.

4.1.2. Cambios en el parámetro γ

El parámetro γ es una medida del costo de la inversión en I+D. En esta sección se estudia cómo varían el producto, el cupón y la inversión en I+D cuando el costo de la inversión cambia, bajo el modelo de inversión en I+D en el proceso productivo y en el proceso de reciclaje. Es importante recordar que la inversión en I+D juega un rol distinto para ambos modelos, en otras palabras, para el modelo r no influye en su nivel de producto y para el modelo p es importante por el efecto directo y estratégico que tiene.

Los niveles de los parámetros que nos interesan son aquellos que permiten que los lemas 1, 2, 3 y 4 se cumplan, es decir, que la cantidad de producto, de inversión y el cupón sean positivos, además, que los costos marginales netos sean positivos y que la cantidad que se recupera de RAEE sea menor que la producción.

Sean $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, c=3, $\delta = f = 0.5$, $a = 10$ y $\gamma \in [1.60, 7.60]$; el umbral inferior es el necesario para que se cumpla la condición del lema 3, $x^p < c - \delta z^p$, y el umbral superior es el que permite una comparación económicamente significativa.

Tabla 4.2. Cambios en los resultados del equilibrio como función de γ cuando $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$, y $a = 10$.

	γ = **1.60**		γ = **3.60**		γ = **5.60**		γ = **7.60**	
Variables	**r**	**p**	**r**	**p**	**r**	**p**	**r**	**p**
Producción por firma	2.341	3.313	2.339	2.690	2.339	2.553	2.339	2.493
Cupón	0.044	0.354	0.034	0.147	0.032	0.101	0.032	0.081
Cupón como porcentaje del precio	0.80 %	10.5 %	0.60 %	3.20 %	0.60 %	2.10 %	0.60 %	1.60 %
I+D por firma	0.027	2.760	0.010	0.996	0.006	0.608	0.004	0.437
Beneficios por firma	4.939	3.720	4.928	4.707	4.926	4.821	4.925	4.858
Daño ambiental	3.363	7.670	3.404	4.763	3.413	4.216	3.416	3.986
Tasa de recolección de RAEE	44.6 %	40.9 %	44.2 %	42.6 %	44.1 %	43.1 %	44.1 %	43.4 %
Bienestar Social	17.564	22.674	17.466	19.458	17.446	18.681	17.437	18.332

En la tabla 4.2 se observa que la producción por firma es decreciente en γ para ambos modelos, pero el producto del modelo r converge con mayor velocidad a 2.339 y $q^r < q^p$, para todos los casos. Esto puede explicarse por el efecto estratégico de la inversión en I+D en el modelo p.

Respecto al nivel de los cupones el cupón del modelo p es superior, ambos son decrecientes, es decir, un incremento en el costo de la inversión en I+D disminuye lo que las firmas están dispuestas a pagar por el RAEE. Al igual que para el producto, la velocidad de convergencia es mayor para el modelo r, pero z^r no es superior para ningún escenario a z^p, los porcentajes del cupón también convergen, sin embargo, la velocidad de convergencia es mayor para el modelo r hacia 0.6 % y el cupón como porcentaje del precio es inferior, en todos los casos expuestos, al modelo p que para el límite inferior de γ alcanza un 10.5 %.

Como ya se mencionó, la inversión en I+D es la variable que distingue a los dos modelos y consistente con la importancia que tiene para cada uno de ellos $x^r < x^p$ para $\gamma \in [1.60, 7.60]$. Tal como la teoría predice, el nivel de inversión es decreciente respecto a su costo, el modelo r decrece con mayor rapidez, para el modelo p la inversión en I+D tiene una función estratégica, dicha función no le permite decrecer con mayor velocidad ante un aumento en el costo.

Los beneficios para el modelo r superan, en todos los escenarios a los del modelo p,

dando robustez a la proposición 1. Es importante notar que los beneficios se comportan de forma opuesta respecto a γ, crecientes para el modelo p y decrecientes para el modelo r, pero tienden a converger. En el resultado anterior se observa claramente la diferencia de los efectos de la inversión en I+D para cada modelo, en el modelo r tiene un efecto directo disminuyendo los beneficios debido a que la disminución del costo marginal de reciclaje f no es suficiente para compensar el costo total de la inversión en I+D, contrariamente, para el modelo p este efecto negativo directo es superado por el efecto positivo estratégico que tiene la inversión en I+D y, como resultado, los beneficios son crecientes en γ.

El daño ambiental causado por los residuos que no son devueltos a las firmas y procesados de forma correcta tiene la dinámica opuesta a la de los beneficios, crecientes para el modelo r y decrecientes para el modelo p, además, es mayor para el modelo p. Esto se explica debido a $q^r < q^p$ y esta diferencia no es compensada con una tasa de recolección suficientemente alta.

La tasa de recolección de RAEE es decreciente respecto al parámetro γ. Si el cupón como porcentaje del precio es decreciente, a un mayor costo de la inversión en I+D, las firmas están dispuestas a pagar menos por el RAEE lo que resulta en una tasa de recolección decreciente, además, el producto también es decreciente en γ. A un costo alto en inversión la tasa de recolección no es muy sensible a cambios en γ en ningún modelo, la tasa de recolección del modelo r es superior consistente con un menor daño ambiental.

El bienestar social es decreciente en γ, es superior en todos los escenarios en el modelo p debido a que el excedente del consumidor supera el mayor daño ambiental y los menores beneficios obtenidos por las firmas en este modelo, consistente con la proposición 1.

Del análisis anterior se deriva la siguiente proposición:

Proposición 2. *Sean* $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$, $a = 10$ *y* $\gamma \in [1.60, 7.60]$, *entonces:*

a) $q^r < q^p$ *y* q^r, q^p *decrecientes en* γ.
b) $z^r < z^p$ *y* z^r, z^p *decrecientes en* γ.
c) $\frac{z^r}{P^r} < \frac{z^p}{P^p}$ *y* $\frac{z^r}{P^r}$, $\frac{z^p}{P^p}$ *decrecientes en* γ.
d) $x^r < x^p$ *y* x^r, x^p *decrecientes en* γ.
e) $\pi^r > \pi^p$, π^r *decrecientes en* γ *y* π^p *crecientes en* γ.
f) $D^r < D^p$, D^r *creciente en* γ *y* D^p *decreciente en* γ.

g) $\frac{w^r}{q^r} > \frac{w^p}{q^p}$ *y* $\frac{w^r}{q^r}$, $\frac{w^p}{q^p}$ *decrecientes en* γ.
h) $BS^r < BS^p$ *y* BS^r, BS^p *decrecientes en* γ.

La proposición 2 da robustez a la proposición 1 y demuestra que, bajo los parámetros dados, el modelo con inversión en I+D en el proceso de producción conduce a un mayor producto, cupón, I+D y bienestar social. Además, los beneficios de las firmas para el modelo r son superiores a los del modelo p. La demostración es similar a la de la proposición 1 en el apéndice B.

La siguiente sección analiza los cambios en el parámetro a.

4.1.3. Cambios en el parámetro *a*

El parámetro a es una medida del tamaño de mercado. En esta sección se estudia cómo varían el producto, el cupón y la inversión en I+D cuando el tamaño del mercado cambia, bajo el modelo de inversión en I+D en el proceso productivo y en el proceso de reciclaje.

Recordando los lemas 2 y 4, como condición necesaria para que $z^r, z^p > 0$, el valor del parámetro a debe ser relativamente alto, es decir, para que las firmas elijan autorregularse por medio de un cupón, el tamaño de mercado debe ser grande. Sean $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$, $\gamma = 3$ y $a \in [9.8, 16.50]$; el umbral inferior es el necesario para que $x^r > 0$ y $z^r > 0$ y el umbral superior es el que permite que se cumpla la condición del lema 3, $x^p < c - \delta z^p$, es relevante apuntar que el valor de a para que se cumpla que la inversión en I+D y el instrumento sean positivos en p es relativamente alto, en comparación con otros estudios que han dado valores a los parámetros en la función de beneficios. Por ejemplo, en Amir *et al.* (2018) se realiza una comparación del equilibrio para $a \in [2.3, 3.3]$, sin embargo, en los modelos r y p se requiere de un tamaño de mercado mayor para cumplir las condiciones de los lemas 1, 2, 3 y 4.

A continuación, se muestran los resultados del cambio en el tamaño del mercado para ambos modelos.

Tabla 4.3. Cambios en los resultados del equilibrio como función de a cuando $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$ y $\gamma = 3$.

	a = 9.80		**a = 12.00**		**a = 14.20**		**a = 16.50**	
Variables	**r**	**p**	**r**	**p**	**r**	**p**	**r**	**p**
Producción por firma	2.268	2.690	3.054	3.610	3.839	4.531	4.661	5.494
Cupón	0.007	0.147	0.321	0.453	0.636	0.760	0.964	1.081
Cupón como porcentaje del precio	0.10 %	3.30 %	5.50 %	9.50 %	9.70 %	14.8 %	13.4 %	19.6 %
I+D por firma	0.002	1.195	0.107	1.605	0.212	2.014	0.321	2.442
Beneficios por firma	4.635	4.349	8.363	7.787	13.162	12.231	19.322	17.951
Daño ambiental	3.179	4.762	6.001	9.305	9.711	15.356	14.541	23.294
Tasa de recolección de RAEE	44.4 %	42.6 %	43.3 %	40.3 %	42.6 %	38.9 %	42.1 %	37.9 %
Bienestar Social	16.392	18.739	30.224	33.659	48.172	52.850	71.336	77.481

En la tabla 4.3 se observa, como se espera, que la producción por firma es creciente en a para ambos modelos. Consistente con las proposiciones 1 y 2, $q^r < q^p$ para todos los escenarios.

Respecto al nivel de los cupones, al igual que en los análisis anteriores, el cupón como porcentaje del precio es mayor en el modelo p, es decir, $z^r < z^p$. A un mayor tamaño de mercado las firmas estarían dispuestas a pagar más por el RAEE en términos absolutos y relativos al precio. El porcentaje máximo que alcanza el cupón es de 13.4 % para el modelo r y 19.6 % para el modelo p, si comparamos los resultados obtenidos ante cambios en δ se observa que esta variable es más sensible ante la parte de insumos que se recupera que ante el tamaño de mercado.

La inversión en I+D es la variable que distingue a los dos modelos y consistente con ello, $x^r < x^p$, reafirmando las proposiciones 1 y 2 para todos los valores de $a \in [9.8, 16.5]$, debido a que, al incrementarse el tamaño del mercado el factor estratégico de la inversión en I+D en el modelo p adquiere mayor relevancia.

Los beneficios de las firmas en el modelo r superan, en todos los escenarios a los del modelo p, dando robustez a las proposiciones 1 y 2; que los beneficios de la firma para el modelo r sean siempre superiores otorgan incentivos a las firmas a aplicar este modelo de inversión en I+D en el proceso de reciclaje en lugar de invertir en el proceso de producción.

Al incrementarse el tamaño del mercado y la producción, el daño ambiental aumenta debido a que el incremento en los niveles del cupón no impulsan en la misma medida los niveles de recolección. Como $q^r < q^p$, es congruente que $D^r < D^p$.

La tasa de recolección es creciente respecto al tamaño de mercado debido a que las firmas, en ambos modelos, están dispuestas a incrementar el monto del cupón lo que permite que, invariantes los parámetros de la oferta de RAEE, la tasa de recuperación aumente. Es importante resaltar que las tasas máximas de recolección de RAEE son de 27.4 % en el modelo r y de 37.8 % en el modelo p, por los resultados de la sección 4.1.1 se deriva que es significativamente más sensible ante cambios en δ que ante cambios en el tamaño de mercado. Esta observación es relevante, desde el punto de vista de los reguladores ya que la tasa de recuperación de RAEE es una medida importante de avance en las políticas de aplicación de RAEE, por lo tanto, para incrementarla un factor clave es δ.

El bienestar social es creciente en a, es superior en todos los escenarios en el modelo p debido a que el excedente del consumidor supera el mayor daño ambiental y los menores beneficios obtenidos por las firmas en este modelo, consistente con las proposiciones 1 y 2.

Del análisis anterior se deriva la siguiente proposición:

Proposición 3. *Sean* $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$, $\gamma = 3$ *y* $9.80 \leq a \leq 16.5$, *entonces:*

a) $q^r < q^p$ *y* q^r, q^p *crecientes en* a.
b) $z^r < z^p$ *y* z^r, z^p *crecientes en* a.
c) $\frac{z^r}{P^r} < \frac{z^p}{P^p}$ *y* $\frac{z^r}{P^r}$, $\frac{z^p}{P^p}$ *crecientes en* a.
d) $x^r < x^p$ *y* x^r, x^p *crecientes en* a.
e) $\pi^r > \pi^p$ *y* π^r, π^p *crecientes en* a.
f) $D^r < D^p$ *y* D^r, D^p *creciente en* a.
g) $\frac{w^r}{q^r} > \frac{w^p}{q^p}$ *y* $\frac{w^r}{q^r}$, $\frac{w^p}{q^p}$ *crecientes en* a.
h) $BS^r < BS^p$ *y* BS^r, BS^p *crecientes en* a.

La proposición 3 corrobora lo que las proposiciones 1 y 2 establecen, se demuestra que para los parámetros dados y la variación en los parámetros δ, γ y a, el modelo p es superior en el nivel de producto, cupón, inversión en I+D y bienestar social, sin embargo, el modelo

r es superior en los beneficios por firma y con menor daño ambiental para todos los escenarios. Es decir, las firmas elegirían el modelo de inversión con mayores beneficios pero con menor bienestar social, sin embargo, esta elección sería la de menor impacto ambiental.

4.2. Ejemplo: Apple Trade In

En esta sección realizamos un ejercicio empírico que pretende dar al lector una idea de las cifras observadas en la realidad sobre RAEE en la Unión Europea y comparar los resultados obtenidos en las tablas 4.1-4.3 con el programa de reciclaje de Apple, llamado Apple Trade In.

Apple Trade In es un programa de reciclaje de Apple por medio del cual los consumidores cambian su dispositivo (RAEE) por un descuento en su próxima compra o por una tarjeta de regalo para utilizar en el Apple Store. No todos los dispositivos son aceptados en este programa, sin embargo, aunque el RAEE no se encuentre dentro del programa, los consumidores pueden llevarlo a la tienda de Apple más cercana para que sea reciclado sin ningún costo.

Dentro de los dispositivos que son aceptados en el programa se encuentran: iPhone, iPad, MacBook, MAC, iWatch, entre otros dispositivos de la marca; además, el programa no es restrictivo para dispositivos Apple, también aceptan RAEE de cualquier otra marca, siempre y cuando cumplan con las condiciones para entrar en el programa (modelo y condiciones del equipo).

Apple Trade In no es el único programa de reciclaje que tiene Apple pero es de nuestro interés debido a la similitud que tiene con los modelos anteriormente expuestos, además, como particularidad es congruente con los resultados de Savaskan *et al.* (2004) en los cuales la forma más eficiente de recolectar el bien es por medio de las tiendas minoristas existentes, como lo hace Apple en este programa por medio de las Apple Store.

De acuerdo con la página oficial de Apple sobre los programas nacionales de reciclaje que la compañía ofrece, Apple Trade In se encuentra únicamente en 25 de los 97 países en los cuales Apple tiene algún programa de reciclaje. Está disponible en la mayoría de los

países de la Unión Europea, Canadá, Estados Unidos, Japón, entre otros[1]. En esta sección analizaremos el programa Apple Trade In en España, únicamente para iPhone.

La página de Apple en España permite realizar el canje del iPhone por medios electrónicos y de correspondencia, es por ello que da una estimación del cupón de acuerdo al modelo y las condiciones del dispositivo, las estimaciones fueron hechas con datos del día 10 de mayo del 2020 suponiendo que los modelos sujetos al programa se encontraban en perfectas condiciones.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados en valores absolutos, es decir, el nivel del cupón, y en las tablas 4.5 y 4.6 se presentan los cupones como porcentaje del precio del bien. En estas estimaciones se comparan entre sí modelos de iPhone de, aproximadamente, la misma gama, por ejemplo, el cupón que otorga el iPhone 8 de 64GB (RAEE) en buenas condiciones, como porcentaje del precio de un iPhone 11 de 64GB nuevo.

Tabla 4.4. Cupón, programa Apple Trade In (€).

Modelo	**16GB**	**32GB**	**64GB**	**128GB**	**256GB**	**512GB**
iPhone Xs Max	-	-	*360*	-	*400*	*430*
iPhone Xs	-	-	*320*	-	*360*	*380*
iPhone Xr	-	-	*250*	*260*	*300*	-
iPhone X	-	-	*260*	-	*300*	-
iPhone 8 Plus	-	-	*180*	*200*	*220*	-
iPhone 8	-	-	*140*	*160*	*170*	-
iPhone 7 Plus	-	*130*	-	*140*	*150*	-
iPhone 7	-	-	*70*	*90*	*90*	-
iPhone 6s Plus	*60*	*60*	-	*80*	*90*	-
iPhone 6s	*40*	*40*	*50*	*60*	-	-
iPhone 6 Plus	*40*	-	*50*	*50*	-	-
iPhone 6	*30*	*30*	*30*	*40*	-	-

Datos obtenidos de https://www.apple.com/es. Las estimaciones fueron hechas con datos del día 10 de mayo del 2020 suponiendo que los modelos sujetos al programa se encontraban en perfectas condiciones.

En la tabla 4.4 se observan todos los modelos de iPhone que son sujetos de evaluación para entrar al programa de Apple Trade In. El modelo más antiguo que aceptan es el

[1] En México no se encuentra disponible.

iPhone 6, por el cual otorgan como máximo 40€ si está en perfecto estado y el modelo más reciente es el iPhone X (en todas sus gamas) que es el inmediato anterior del último lanzamiento, el iPhone 11, por el cual el cupón asciende como máximo a 430€ si está en perfecto estado. Debido a que tomamos el máximo de la valuación para cada modelo, el cupón como porcentaje del precio es una cota superior.

Tabla 4.5. Cupón como porcentaje del precio de los dispositivos de 64GB

Modelo	*iPhone 11 Pro Max*	*iPhone 11 Pro*	*iPhone 11*
iPhone Xs Max	*28.59 %*	*31.06 %*	*44.50 %*
iPhone Xs	*25.42 %*	*27.61 %*	*39.56 %*
iPhone Xr	*19.86 %*	*21.57 %*	*30.90 %*
iPhone X	*20.65 %*	*22.43 %*	*32.14 %*
iPhone 8 Plus	*14.30 %*	*15.53 %*	*22.25 %*
iPhone 8	*11.12 %*	*12.08 %*	*17.31 %*

Datos obtenidos de https://www.apple.com/es. Las estimaciones fueron hechas con datos del día 10 de mayo del 2020 suponiendo que los modelos sujetos al programa se encontraban en perfectas condiciones.

Tabla 4.6. Cupón como porcentaje del precio de los dispositivos de 256GB

Modelo	*iPhone 11 Pro Max*	*iPhone 11 Pro*	*iPhone 11*
iPhone Xs Max	*27.99 %*	*30.10 %*	*40.86 %*
iPhone Xs	*25.19 %*	*27.09 %*	*36.77 %*
iPhone Xr	*20.99 %*	*22.57 %*	*30.64 %*
iPhone X	*20.99 %*	*22.57 %*	*30.64 %*
iPhone 8 Plus	*15.40 %*	*16.55 %*	*22.47 %*
iPhone 8	*11.90 %*	*12.79 %*	*17.36 %*

Datos obtenidos de https://www.apple.com/es. Las estimaciones fueron hechas con datos del día 10 de mayo del 2020 suponiendo que los modelos sujetos al programa se encontraban en perfectas condiciones.

En las tablas 4.5 y 4.6, en la columna 1 se presentan los modelos que los consumidores devuelven y en la parte superior los modelos por los cuales el consumidor podría canjear el cupón. Los modelos que elegimos para hacer la comparación generan un criterio de comparabilidad debido a que tienen la misma capacidad de memoria, 64GB para la tabla 4.5 y 256GB para la tabla 4.6.

Un resultado a resaltar es que ambas tablas contienen porcentajes muy parecidos de cupón, es decir, que se conserva la proporción entre modelos con distinta capacidad de memoria. Recordemos que, lo que nos arrojan las tablas son cotas superiores sobre los cupones. El porcentaje mínimo de cupón se observa cuando el consumidor desea devolver el dispositivo de más antiguo y de baja gama (iPhone 8) y cambiarlo por el más reciente de alta gama (iPhone 11 Pro Max), el cupón representa el 11.12 % para los de 64GB y 11.90 % para los de 256GB. Estos escenarios son similares a los obtenidos por el modelo r en la tabla 4.1 cuando $\delta \in [0.65, 0.80]$ y en la tabla 4.3 cuando $a = 14.20$ y por modelo p en la tabla 4.1 cuando $\delta = 0.65$, en la tabla 4.2 cuando $\delta = 1.60$ y en la tabla 4.3 cuando $a = 12$, sin embargo, para corroborarlo es necesaria una estimación econométrica.

El valor máximo de los cupones se alcanza, evidentemente, cuando el consumidor devuelve el modelo más reciente de mayor gama (iPhone Xs Max) y desea comprar el nuevo modelo de menor precio (iPhone 11), 44.50 % para los de 64GB y 40.86 % para los de 256GB.

El programa de Apple Trade In se asemeja al modelo r en cuanto al propósito en la inversión en I+D, Daisy es un robot que pretende reducir el costo marginal de reciclaje. Una extensión interesante del modelo sería considerar un duopolio de Apple y Samsung, y estimar econométricamente el cupón y la tasa de recolección de RAEE.

En la siguiente sección mostramos datos observados de la tasa de recolección de RAEE de los países de la Unión Europea para el periodo 2010-2014.

4.3. Ejemplo: Tasa de recolección de RAEE en la Unión Europea

En esta sección mostramos las tasas de recolección de RAEE en la Unión Europea para el periodo 2010-2014. Utilizamos datos del *Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) compliance promotion exercise, Final report (2017)* de la Comisión Europea que es un reporte sumamente detallado sobre el desempeño por país en materia de RAEE, sobre los avances en la región de 2010 a 2014. Este reporte es gran utilidad debido a que existen pocos datos confiables acerca de los RAEE.

En la tabla 4.7 se observan las tasas de recolección de RAEE de la Unión Europea de

2010 a 2014, la tasa de recolección fue calculada de una forma muy similar a la calculada en el modelo; es la proporción de RAEE que son recolectados en comparación con los AEE que fueron puestos en el mercado tres años antes. Debido a la forma de calcularla, una extensión del modelo podría ser desarrollarlo en dos periodos.

En la Unión Europea existe una gran rango de tasas de recolección durante este periodo que van desde el 10.80 %, hasta el 81.60 %. El promedio de la Unión Europea por año de 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014 fue de 32.56 %, 35.63 %, 37.57 %, 40.21 % y 43.58 %, respectivamente y con medianas por año de 31.65 %, 35.30 %, 36.05 %, 37.10 % y 40.20 %, observamos una mejora en las tasas. Los países con mayores tasas de recolección en 2014, como Lituania y Bulgaria, no tienen un aparato económico tan grande como el de Reino Unido, Alemania o Francia, es decir, la base del cálculo para la tasa de recolección de RAEE es menor.

Para la Unión Europea, las cuestiones en materia ambiental son parte de la agenda de gobierno, es por ello que, los estados miembro son de los pocos países que cuentan con estadísticas confiables, esto resalta la gravedad de la situación en los países en vías en desarrollo en los cuales la legislación es laxa al respecto. Por ejemplo, en China e India existen una gran cantidad de basureros electrónicos que ponen en grave riesgo la salud de las personas alrededor.

Tabla 4.7. Tasas de recolección de RAEE[1] en la Unión Europea 2010-2014.

MS	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**
Alemania	*45.20 %*	*40.40 %*	*40.90 %*	*42.20 %*	*42.90 %*
Austria	*44.70 %*	*45.50 %*	*47.70 %*	*47.60 %*	*49.10 %*
Bélgica	*37.30 %*	*39.30 %*	*39.40 %*	*38.80 %*	*37.00 %*
Bulgaria	*51.90 %*	*57.90 %*	*72.80 %*	*67.80 %*	*78.80 %*
Chipre	*14.40 %*	*14.60 %*	*14.10 %*	*14.50 %*	-
Croacia	-	-	-	-	*37.20 %*
Dinamarca	*48.30 %*	*55.50 %*	*52.50 %*	*50.10 %*	*50.80 %*
Eslovaquia	*40.50 %*	*45.60 %*	*48.30 %*	*47.30 %*	*48.70 %*
Eslovenia	*26.90 %*	*31.20 %*	*33.00 %*	*29.70 %*	*33.70 %*
España	*19.40 %*	*20.80 %*	*22.50 %*	*31.70 %*	-
Estonia	*36.60 %*	*47.90 %*	*42.40 %*	*32.90 %*	*35.60 %*
Finlandia	*32.30 %*	*34.60 %*	*36.30 %*	*40.30 %*	*47.10 %*
Francia	*26.70 %*	*29.00 %*	*29.00 %*	*29.40 %*	*32.50 %*
Grecia	*21.90 %*	*21.00 %*	*20.50 %*	*24.60 %*	*33.00 %*
Hungría	*31.00 %*	*28.80 %*	*35.90 %*	*45.60 %*	*54.80 %*
Irlanda	*37.70 %*	*38.60 %*	*42.30 %*	*45.60 %*	*50.10 %*
Italia	*46.40 %*	*46.90 %*	*48.40 %*	*43.60 %*	-
Letonia	*16.00 %*	*23.60 %*	*30.20 %*	*30.30 %*	*29.30 %*
Lituania	*23.50 %*	*39.40 %*	*58.30 %*	*62.10 %*	*81.60 %*
Luxemburgo	*38.50 %*	*35.60 %*	*31.80 %*	*33.40 %*	*40.20 %*
Malta	*13.90 %*	*12.30 %*	*10.80 %*	*12.20 %*	*11.90 %*
Países Bajos	-	-	-	*78.00 %*	*61.10 %*
Polonia	*21.10 %*	*28.10 %*	*36.20 %*	*34.70 %*	*29.00 %*
Portugal	*26.80 %*	*35.60 %*	*28.70 %*	*37.10 %*	*49.10 %*
Reino Unido	*38.90 %*	*35.00 %*	*33.00 %*	*33.10 %*	*35.80 %*
República Checa	*26.80 %*	*29.90 %*	*30.40 %*	*31.40 %*	*33.00 %*
Rumanía	*14.20 %*	*12.10 %*	*17.20 %*	*24.20 %*	*24.40 %*
Suecia	*65.60 %*	*77.30 %*	*74.10 %*	*77.50 %*	*62.70 %*

[1] Calculada como la proporción de RAEE recolectados comparados con los AEE puestos en el mercado tres años antes. Tabla tomada del *WEEE compliance promotion exercise. Final report (2017)* p.48.

Conclusiones

Este trabajo presenta un análisis sobre un mecanismo para implementar la REP de forma voluntaria, en el cual la firma internaliza las decisiones sobre los procesos de producción, recolección y reciclaje del bien que fabrica, además, profundiza sobre el papel de la inversión en I+D en los procesos de reciclaje y producción en un contexto oligopólico con competencia en cantidad.

Este mecanismo es un cupón que la firma otorga al consumidor cuando devuelve su RAEE, la elección sobre el nivel del cupón es internalizada por la firma y esto permite que, al ser elegida antes del nivel de producción, tenga efectos directos y estratégicos, es decir, que afecte las correspondencias de mejor respuesta cuando compiten en cantidad.

Los modelos que utilizamos para presentar la diferencia entre los incentivos de inversión en I+D en los procesos de reciclaje y producción indican la posibilidad que el instrumento sea positivo, es decir, bajo el modelo r y el modelo p la autorregulación de las firmas firmas es posible, sin embargo, para que esta condición se cumpla se requiere que el tamaño del mercado sea relativamente grande.

Los modelos r y p tienen distinto comportamiento frente a cambios en el costo de la inversión, debido a que el modelo r no presenta un efecto estratégico y el modelo p sí; en general, los cambios para el modelo p ante cambios en el costo de la inversión son más suaves.

Los resultados de las proposiciones 1-3 indican que el producto, la inversión, el nivel del cupón y el bienestar social son superiores para el modelo p en todos los escenarios, es decir, que la elección de inversión en I+D en el proceso productivo supera a la de invertir en el proceso de reciclaje. Una explicación a estos resultados, tiene que ver con que la inversión en el proceso de producción afecta a la totalidad del producto, mientras que la inversión en el proceso de reciclaje afecta exclusivamente a los RAEE que son recolectados por las

firmas y reciclados.

Un resultado importante, debido al crucial papel del daño ambiental en los objetivos de la REP es que, a pesar de que el bienestar social sea mayor para el modelo p, el daño ambiental que genera también lo es, por lo que se infiere que las tasas de recolección que produce no son suficientes para compensar la diferencia en la cantidad de producto entre los modelos.

La conclusión más relevante desde la perspectiva de las firmas es que, bajo todos los escenarios, los beneficios de las firmas en el modelo r son superiores, por lo que, a pesar de que el modelo p genere mayor bienestar social pueden tener incentivos a elegir invertir en I+D en el proceso de reciclaje. Además, la tasa de recolección de RAEE es siempre mayor para el modelo r, generando menor daño ambiental, en este sentido, los intereses de las firmas y un menor el daño ambiental, se alinean.

Empíricamente, mostramos dos ejemplos con datos reales sobre el cupón como porcentaje del precio y la tasa de recolección. Para el primer ejercicio utilizamos datos del programa Apple Trade In en España, con un mecanismo de recuperación muy similar al que modelamos y una inversión en I+D sobresaliente sobre el proceso de reciclaje. Para el segundo, utilizamos las tasas de recolección de RAEE en los estados miembros de la Unión Europea de 2010 a 2014, y observamos una gran rango de tasas de recolección; lo sobresaliente son los extensos y precisos datos que se tienen al respecto, pues, en los países en vías de desarrollo estas estadísticas son poco confiables o inexistentes.

De acuerdo con los objetivos de la REP y la Directiva de RAEE de la Unión Europea una medida relevante para su evaluación es la tasa de recolección de RAEE, dentro de los modelos r y p, se alcanzan las mayores tasas cuando la firma recupera la totalidad del cupón. Es decir, de los parámetros analizados en este trabajo, el parámetro con mayor relevancia es el que mide la recuperación de los insumos.

De este trabajo surgen varias preguntas, aún sin resolver, que pueden ser posibles extensiones, por ejemplo: debido a la importancia del parámetro que mide la recuperación de los insumos, éste podría ser una función de la inversión en I+D, realizar estimaciones econométricas, modelos de varios periodos o agregar una etapa 0, en la cual el regulador maximiza el BS con respecto al instrumento, y comparar los niveles del cupón.

Apéndice A: Supuestos sobre los parámetros

En este apéndice presentamos los supuestos necesarios para que las soluciones sean económicamente significativas, es decir, que el nivel de producción, inversión en I+D y precio sean positivos, así como que la cantidad recolectada sea menor que el nivel de producción y que los costos netos, tanto de reciclaje como de producción sean positivos.

Supuesto 1. *Permite que las condiciones de segundo orden se cumplan.*

$$18b\beta\gamma - 8\gamma\delta^2 > \text{máx}\{16\beta, 9\beta^2\}$$

Supuesto 2. *Condición para que los niveles de producto en el modelo r sean positivo, es decir,* $q^r > 0$.

$$(a-c)(2\gamma\beta - \beta^2) - \delta(\beta - \alpha\beta + \alpha\gamma + f\beta\gamma) > 0$$

Supuesto 3. *Condición para que los niveles de inversión en I+D sean positivo y menor a los costos de reciclaje en el modelo r, es decir,* $0 < x^r < f + z^r$.

$$-4\delta^2(1-\alpha)+9b(2\beta-\alpha\beta+f\beta^2) < 4\beta\delta(a-c) < 4\delta\gamma(a-c)-4\delta^2(1-\alpha+f\gamma)+9b(\beta-\alpha\gamma+f\beta\gamma)$$

Supuesto 4. *Condición para que la cantidad de RAEE recolectados sea menor o igual que la cantidad producida, es decir,* $w^r \leq q^r$.

$$(a-c)[4\beta\delta\gamma - 3\beta(2\gamma-\beta)] + 3\delta(\beta + \alpha\beta + \alpha + f\beta\gamma) - 9b\beta(2\beta - \alpha\gamma - \alpha\beta + f\beta\gamma) - 4\alpha\gamma\delta^2 \leq 0$$

Supuesto 5. *Condición para que los niveles de producto en el modelo p sean positivo, es decir,* $q^p > 0$.

$$3\beta\gamma(a-c) - \delta\gamma(\alpha + f\beta) > 0$$

Supuesto 6. *Condición para que los niveles de inversión en I+D sean positivos y menores a los costos de producción en el modelo p, es decir,* $0 < x^p < c - \delta z^p$.

$$4\delta(\alpha + f\beta) < 8\beta(a-c) < -4\gamma\delta^2 + (\alpha + f\beta)(9\beta\delta\gamma)$$

Supuesto 7. *Condición para que la cantidad de RAEE recolectados sea menor o igual que la cantidad producida, es decir,* $w^p \leq q^p$.

$$(a-c)(4\beta\delta\gamma - 6\beta\gamma) - (\alpha + f\beta)(9b\beta - 4\beta - 3\delta\gamma) + 2\alpha(9b\beta\gamma - 4\beta - 2\gamma\delta^2) \leq 0$$

Apéndice B: Demostraciones

Demostración lema 1. En la segunda etapa, la decisión sobre I+D y sobre z_i ya han sido tomadas, por lo que el problema de maximización de la firma i es:

$$\max_{q_i} q_i[a - b(q_i + q_j) - c + \delta z_i] - [f + z_i - x_i][\alpha + \beta z_i] \tag{1}$$

CPO:

$$a - 2bq_i - bq_j - c + \delta z_i = 0 \tag{2}$$

CSO:

$$-2b < 0$$

La función de mejor respuesta de la firma i, está dada por:

$$q_i(q_j, z_i) = \begin{cases} \frac{a-c-bq_j+\delta z_i}{2b} & \text{si } q_j \leq \frac{a-c+\delta z_i}{b} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Resolviendo para ambas firmas la función de reacción distinta de cero:

$$q_i(z_i, z_j) = \frac{a - c + 2\delta z_i - \delta z_j}{3b} \tag{3}$$

En la primera etapa, la firma i elige el cupón que paga a los consumidores por su RAEE y el nivel de inversión en I+D en el proceso de reciclaje. Dado $q_i(z_i, z_j)$, la firma i se enfrenta al siguiente problema de maximización en esta etapa:

$$\max_{z_i, x_i} q_i(z_i, z_j)[a - b(q_i(z_i, z_j) + q_j(z_i, z_j)) - c + \delta z_i] - [f + z_i - x_i][\alpha + \beta z_i] - \frac{\gamma x_i^2}{2} \tag{4}$$

CPO:

$$\frac{2\delta}{3b}[a - 2bq_i(z_i, z_j) - bq_j(z_i, z_j) - c + \delta z_i] - \beta[f + 2z_i - x_i] - \alpha + \frac{4\delta}{3} q_i(z_i, z_j) = 0 \tag{5}$$

$$\alpha + \beta z_i - \gamma x_i = 0 \tag{6}$$

CSO:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{8\delta^2}{9b} - 2\beta & \beta \\ \beta & -\gamma \end{pmatrix}$$

El cual es definido negativo por Supuesto 1 del apéndice A.

Sustituyendo (3) en (5), utilizando que el primer término de la CPO en (5) es igual a cero por (2) y la simetría de las firmas, se obtienen los niveles de equilibrio z, x y q.

$$z^r = \frac{4\gamma\delta(a-c) - 9b(\beta - \alpha\beta + \alpha\gamma + f\beta\gamma)}{18b\beta\gamma - 9b\beta^2 - 4\gamma\delta^2}$$

$$x^r = \frac{4\beta\delta(a-c) + 4\delta^2(1-\alpha) - 9b(2\beta - \alpha\beta + f\beta^2)}{18b\beta\gamma - 9b\beta^2 - 4\gamma\delta^2}$$

$$q^r = \frac{3\beta(a-c)(2\gamma - \beta) - 3\delta(\beta - \alpha\beta + \alpha\gamma + f\beta\gamma)}{18b\beta\gamma - 9b\beta^2 - 4\gamma\delta^2}$$

□

Demostración lema 3. En la segunda etapa, la decisión sobre I+D y sobre z_i ya han sido tomadas, por lo que el problema de maximización de la firma i es:

$$\max_{q_i} q_i[a - b(q_i + q_j) - c + \delta z_i + x_i] - [f + z_i][\alpha + \beta z_i] \tag{7}$$

CPO:

$$a - 2bq_i - bq_j - c + \delta z_i + x_i = 0 \tag{8}$$

CSO:

$$-2b < 0$$

La función de mejor respuesta de la firma i, está dada por:

$$q_i(q_j, z_i, x_i) = \begin{cases} \frac{a-c-bq_j+\delta z_i+x_i}{2b} & \text{si } q_j \leq \frac{a-c+\delta z_i+x_i}{b} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Resolviendo para ambas firmas la función de reacción distinta de cero:

$$q_i(z_i, z_j, x_i, x_j) = \frac{a - c + 2\delta z_i - \delta z_j + 2x_i - x_j}{3b} \tag{9}$$

En la primera etapa, la firma i elige el cupón que paga a los consumidores por su RAEE y el nivel de inversión en I+D en el proceso productivo. Dado $q_i(z_i, z_j, x_i, x_j)$, la firma i se enfrenta al siguiente problema de maximización en esta etapa:

$$\max_{z_i,x_i} q_i(z_i,z_j,x_i,x_j)[a-b(q_i(z_i,z_j,x_i,x_j)+q_j(z_i,z_j,x_i,x_j))-c+\delta z_i+x_i]-[f+z_i][\alpha+\beta z_i]-\frac{\gamma x_i^2}{2} \tag{10}$$

CPO:

$$\frac{2\delta}{3b}[a-2bq_i(z_i,z_j,x_i,x_j)-bq_j(z_i,z_j,x_i,x_j))-c+\delta z_i+x_i]-\beta[f+2z_i]-\alpha+\frac{4\delta}{3}q_i(z_i,z_j,x_i,x_j)=0 \tag{11}$$

$$\frac{2}{3b}[a-2bq_i(z_i,z_j,x_i,x_j)-bq_j(z_i,z_j,x_i,x_j))-c+\delta z_i+x_i]+\frac{4}{3}q_i(z_i,z_j,x_i,x_j)-\gamma x_i=0 \tag{12}$$

CSO:

$$H=\begin{pmatrix} \frac{8\delta^2}{9b}-2\beta & \frac{8\delta}{9b} \\ \frac{8\delta}{9b} & \frac{8}{9b}-\gamma \end{pmatrix}$$

El Hessiano es definido negativo por Supuesto 1 del apéndice A.

Sustituyendo (9) en (11), utilizando que el primer término de la CPO en (11) es igual a cero por (8) y la simetría de las firmas, se obtienen los niveles de equilibrio z, x y q.

$$z^p=\frac{4\gamma\delta(a-c)-(\alpha+f\beta)(9b\gamma-4)}{2(9b\beta\gamma-4\beta-2\gamma\delta^2)}$$

$$x^p=\frac{4\beta(a-c)-2\delta(\alpha+f\beta)}{9b\beta\gamma-4\beta-2\gamma\delta^2}$$

$$q^p=\frac{6\beta\gamma(a-c)-3\gamma\delta(\alpha+f\beta)}{2(9b\beta\gamma-4\beta-2\gamma\delta^2)}$$

□

Para demostrar la proposición 1, utilizamos los resultados de los lemas 1 y 3. Sean $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, c=3, f=0.5, $\gamma = 3$, $a = 10$ y $\delta \in [0.05, 1.00]$, el lema 1 se puede expresar de la siguiente manera:

$$q^r(\delta) = \frac{105 - 13.5\delta}{45 - 12\delta^2} \tag{13}$$

$$x^r(\delta) = \frac{-13.5 + 28\delta}{45 - 12\delta^2} \tag{14}$$

$$z^r(\delta) = \frac{-40.5 + 84\delta}{45 - 12\delta^2} \tag{15}$$

Y el lema 3:

$$q^p(\delta) = \frac{126 - 13.5\delta}{2(23 - 6\delta^2)} \tag{16}$$

$$x^p(\delta) = \frac{28 - 3\delta}{23 - 6\delta^2} \tag{17}$$

$$z^p(\delta) = \frac{-34.5 + 84\delta}{2(23 - 6\delta^2)} \tag{18}$$

Demostración proposición 1.a). Para $\delta \in [0.05, 1.00]$, tenemos:

$$(162 - 162)\delta^3 - (1260 - 1512)\delta^2 + (607.5 - 621)\delta + (5670 - 4830) < 0$$

Reorganizando términos:

$$2(105 - 13.5\delta)(23 - 6\delta^2) < (126 - 13.5\delta)(45 - 12\delta^2)$$

Obtenemos las ecuaciones (13) y (16):

$$\frac{105 - 13.5\delta}{45 - 12\delta^2} < \frac{126 - 13.5\delta}{2(23 - 6\delta^2)}$$

Si derivamos (13) y (16) con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{dq^r(\delta)}{d\delta} = \frac{-162\delta^2 + 2520\delta - 607.5}{(45 - 12\delta^2)^2} > 0$$

$$\frac{dq^p(\delta)}{d\delta} = \frac{-162\delta^2 + 3024\delta - 621}{4(23 - 6\delta^2)^2} > 0$$

□

Demostración proposición 1.b). Para $\delta \in [0.05, 1.00]$, tenemos:

$$(1008 - 1008)\delta^3 + (486 - 414)\delta^2 + (3864 - 3780)\delta + (1530 - 1863) < 0$$

Reorganizando términos:

$$2(-40.5 + 84\delta)(23 - 6\delta^2) < (45 - 12\delta^2)(-34.5 + 84\delta)$$

Obtenemos las ecuaciones (15) y (18):

$$\frac{-40.5 + 84\delta}{45 - 12\delta^2} < \frac{-34.5 + 84\delta}{2(23 - 6\delta^2)}$$

Si derivamos (15) y (18) con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{dz^r(\delta)}{d\delta} = \frac{1008\delta^2 - 972\delta + 3780}{(45 - 12\delta^2)^2} > 0$$

$$\frac{dz^p(\delta)}{d\delta} = \frac{1008\delta^2 - 828\delta + 3864}{4(23 - 6\delta^2)^2} > 0$$

□

Demostración proposición 1.c). Definimos en los preliminares la función inversa de demanda como $P(Q) = a - bQ$, por lo que tenemos:

$$P^r = 10 - 2q^r$$

$$P^p = 10 - 2q^p$$

Por demostración de la proposición 1.a) sabemos que:

$$q^r < q^p$$

Lo que implica:

$$2q^r < 2q^p$$

$$10 - 2q^r > 10 - 2q^p$$

Es decir,

$$P^r > P^p$$

Recordando la demostración de la proposición 1.b):

$$z^r < z^p$$

Lo que implica:

$$\frac{z^r}{P^r} < \frac{z^p}{P^p}$$

Si derivamos $\frac{z^r}{P^r}$ y $\frac{z^p}{P^p}$ con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{dP^r(\delta)}{d\delta} = \frac{10080\delta^2 - 9720\delta + 21253.5}{(-120\delta^2 + 27\delta + 240)^2} > 0$$

$$\frac{dz^p(\delta)}{d\delta} = \frac{10080\delta^2 - 8280\delta + 18403.5}{4(23 - 6\delta^2)^2} > 0$$

□

Demostración proposición 1.d). Sea $\delta \in [0.05, 1.00]$, partimos de:

$$-(168 + 36)\delta^3 + (336 + 81)\delta^2 + (644 + 135)\delta - (1260 + 310) < 0$$

Reorganizando términos:

$$(-13.5 + 28\delta)(23 - 6\delta^2) < (45 - 12\delta^2)(28 - 3\delta)$$

Obtenemos las ecuaciones (14) y (17):

$$\frac{-13.5 + 28\delta}{45 - 12\delta^2} < \frac{28 - 3\delta}{23 - 6\delta^2}$$

Si derivamos (14) y (17) con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{dx^r(\delta)}{d\delta} = \frac{336\delta^2 - 324\delta + 1260}{(45 - 12\delta^2)^2} > 0$$

$$\frac{dx^p(\delta)}{d\delta} = \frac{-18\delta^2 - 336\delta - 69}{(23 - 6\delta^2)^2} > 0$$

□

Demostración proposición 1.e). Recordemos las funciones de beneficios para las firmas π^r y π^p:

$$\pi^r(q^r, x^r, z^r) = q^r(a - 2bq^r - c + \delta z^r) - (f + z^r - x^r)(\alpha + \beta z^r) - \frac{\gamma(x^r)^2}{2}$$

$$\pi^p(q^p, x^p, z^p) = q^p(a - 2bq^r - c + \delta z^p - x^p) - (f + z^r)(\alpha + \beta z^p) - \frac{\gamma(x^p)^2}{2}$$

Después de algunas operaciones algebraicas tenemos:

$$\pi^r(\delta) = \frac{-144\delta^4 + 2352\delta^3 - 11449.5\delta^2 - 3150\delta + 21543.75}{2(45 - 12\delta^2)^2}$$

$$\pi^p(\delta) = \frac{-74\delta^4 + 1512\delta^3 - 6996.75\delta^2 - 2394\delta + 11304.25}{4(23 - 6\delta^2)^2}$$

Debido a que tenemos funciones monótonas, es posible evaluar en la cota inferior y superior de δ y obtener la diferencia, es decir, $\pi^r - \pi^p$. Para la cota inferior y superior $\pi^r - \pi^p > 0$, podemos concluir $\pi^r > \pi^p$.

Si derivamos las ecuaciones anteriores con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{d\pi^r(\delta)}{d\delta} = \frac{-677376\delta^6 + 7216992\delta^5 - 2358720\delta^4 - 27151200\delta^3 + 21772800\delta^2 + 328050\delta - 12757500}{4(45 - 12\delta^2)^4} < 0$$

$$\frac{d\pi^p(\delta)}{d\delta} = \frac{-217728\delta^6 + 2174040\delta^5 - 635040\delta^4 - 7120656\delta^3 + 6955200\delta^2 - 4650462\delta - 5065704}{16(23 - 6\delta^2)^4} < 0$$

□

Demostración proposición 1.f). Recordemos la función de daño ambiental definida en los preliminares del capítulo 3:

$$D^r(Q^r, W^r) = 2\mu(q^r - w^r)^2$$

$$D^p(Q^p, W^p) = 2\mu(q^p - w^p)^2$$

Evaluando ambas funciones en los parámetros dados y después de algunas operaciones algebraicas:

$$D^r(\delta) = \frac{576\delta^4 - 9360\delta^3 + 47673\delta^2 - 78390\delta + 40401}{2(45 - 12\delta^2)^2}$$

$$D^p(\delta) = \frac{576\delta^4 - 9360\delta^3 + 49017\delta^2 - 89310\delta + 5244}{2(46 - 12\delta^2)^2}$$

Derivando las $D^r(\delta)$ y $D^p(\delta)$ con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{dD^r(\delta)}{d\delta} = 4(q^r - w^r)\left[\frac{dq^r(\delta)}{d\delta} - \frac{dw^r(\delta)}{d\delta}\right]$$

$$\frac{dD^p(\delta)}{d\delta} = 4(q^p - w^p)\left[\frac{dq^p(\delta)}{d\delta} - \frac{dw^p(\delta)}{d\delta}\right]$$

Sabemos que el primer término de ambas derivadas es positivo por supuestos del apéndice A, por tanto, para determinar el signo basta con saber el signo de los términos entre corchetes.

Utilizamos el resultado de la demostración 1.a), recordamos que $w^p = \alpha + \beta z^r$ y $w^p = \alpha + \beta z^p$, pero como $\alpha = \beta = 1$, entonces:

$$\frac{dw^r(\delta)}{d\delta} = \frac{dz^p(\delta)}{d\delta}$$
$$\frac{dw^p(\delta)}{d\delta} = \frac{dz^p(\delta)}{d\delta}$$

Entonces, además de lo anterior, usamos el resultado de la demostración 1.b) y concluimos que:

$$\left[\frac{dq^r(\delta)}{d\delta} - \frac{dw^r(\delta)}{d\delta}\right] = \frac{-1170\delta^2 + 3492\delta - 4387.5}{(45 - 12\delta^2)^2} < 0$$

$$\left[\frac{dq^p(\delta)}{d\delta} - \frac{dw^p(\delta)}{d\delta}\right] = \frac{-1170\delta^2 + 3852\delta - 4485}{(46 - 12\delta^2)^2} < 0$$

Lo anterior, es suficiente para demostrar que:

$$\frac{dw^r(\delta)}{d\delta} < 0$$

$$\frac{dw^p(\delta)}{d\delta} < 0$$

□

Demostración proposición 1.g). La tasa de recolección la definimos como la proporción de la cantidad producida que es recolectada, es decir, $\frac{w^r}{q^r}$ y $\frac{w^r}{q^r}$. Sustituyendo los valores de los parámetros y usando las ecuaciones (13), (15), (16) y (18), obtenemos:

$$\frac{w^r(\delta)}{q^r(\delta)} = \frac{-12\delta^2 + 84\delta + 4.5}{105 - 13.5\delta}$$

$$\frac{w^p(\delta)}{q^p(\delta)} = \frac{-12\delta^2 + 84\delta + 11.5}{126 - 13.5\delta}$$

Partimos de que:

$$(162 - 162)\delta^3 - (1500 + 1260)\delta^2 + (10523.25 - 8664.75)\delta + (567 - 1207.5) > 0$$

Reordenando:

$$(-12\delta^2 + 84\delta + 4.5)(126 - 13.5\delta) > (-12\delta^2 + 84\delta + 11.5)(105 - 13.5\delta)$$

Lo que demuestra que:

$$\frac{-12\delta^2+84\delta+4.5}{105-13.5\delta} > \frac{-12\delta^2+84\delta+11.5}{126-13.5\delta}$$

Derivando las dos ecuaciones anteriores:

$$\frac{d[\frac{w^r(\delta)}{w^p(\delta)}]}{d\delta} = \frac{162\delta^2-2520\delta+8880.5}{(105-13.5\delta)^2} > 0$$

$$\frac{d[\frac{w^r(\delta)}{w^p(\delta)}]}{d\delta} = \frac{162\delta^2-3024\delta+10739.25}{(126-13.5\delta)^2} > 0$$

□

Demostración proposición 1.h). Recordemos las funciones de bienestar social definidas en los preliminares BS^r y BS^p:

$$BS^r(q^r,x^r,z^r) = \int_0^{2q^r}[a-b(t)]\mathrm{d}t - 2q^r[c-\delta z^r] - 2[f-x^r][\alpha+\beta z^r] - \gamma(x^r)^2 - 2\mu[q^r-w^r]^2$$

$$BS^p(q^p,x^p,z^p) = \int_0^{2q^p}[a-b(t)]\mathrm{d}t - 2q^p[c-\delta z^p-x^p] - 2f[\alpha+\beta z^p] - \gamma(x^p)^2 - 2\mu[q^p-w^p]^2$$

Después de algunas operaciones algebraicas obtenemos:

$$BS^r(\delta) = \frac{-820\delta^4+10032\delta^3-39675\delta^2+48654\delta+46057.5}{2(45-12\delta^2)^2}$$

$$BS^p(\delta) = \frac{-864\delta^4+11376\delta^3-46395\delta^2+58398\delta+54693}{4(23-6\delta^2)^2}$$

Debido a que tenemos funciones monótonas, es posible evaluar en la cota inferior y superior de δ y obtener la diferencia, es decir, $BS^r - BS^p$. Para la cota inferior y superior $BS^r - BS^p < 0$, podemos concluir $BS^r < BS^p$.

Si derivamos las ecuaciones anteriores con respecto a δ, $\delta \in [0.05, 1.00]$:

$$\frac{dBS^r(\delta)}{d\delta} = \frac{-28892216\delta^6+26395200-637061676\delta^5-66342240\delta^4+226981440\delta^3-122399199\delta^2+197048700\delta}{4(45-12\delta^2)^4} > 0$$

$$\frac{dBS^p(\delta)}{d\delta}\frac{-1638144\delta^6+15269472\delta^5-37787040\delta^4-38816064\delta^3+136686240\delta^2-7558496\delta+1234570168}{16(23-6\delta^2)^4} > 0$$

□

Demostración proposición 2: similar a la proposición 1.

Demostración proposición 3: similar a la proposición 1.

Referencias

Amir, R., Gama, A., & Werner, K. (2018). On Environmental Regulation of Oligopoly Markets: Emission versus Performance Standards. *Environmental and Resource Economics*, 70(1), 147–167.

Apple España. https://www.apple.com/es.

Apple Trade In. https://www.apple.com/shop/trade-in

Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V,. Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2017: Cantidades, Flujos, y Recursos. https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM 2017/GEM 2017-S.pdf

Baron, D. P. (2001). Private politics, corporate social responsibility, and integrated strategy. *Journal of Economics and Management Strategy*, 10(1), 7–45.

Baron, D. P. (2008). Managerial contracting and corporate social responsibility, *Journal of Public Economics*, 92(1–2), 268–88.

September 13, 31–35.

Guo, L., Qu, Y., Tseng, M. L., Wu, C., & Wang, X. (2018). Two-echelon reverse supply chain in collecting waste electrical and electronic equipment: A game theory model. *Computers and Industrial Engineering*, 126(June), 187–195.

Hirose, K., Lee, S., & Matsumara, T. (2020). Noncooperative and Cooperative Environmental Corporate Social Responsibility. *Journal of Institutional and Theoretical Economics*. 1–23.

Kling, M., Zotz, F., & Huranova, D. (2017). *European Commission*. WEEE compliance promotion exercise (Issue December).

Maxwell, J. W., Lyon, T. P., & Hackett, S. C. (2000). Self-regulation and social welfare: The political economy of corporate environmentalism. *Journal of Law and Economics*, 43(2), 583–617.

McWilliams, A., & Siegel, D. (2001). Corporate Social Responsability: A Theory of the Firm Perspective. *The Academy of Management Review*,10 (1), 117-127.

Montero, J. P. (2002). Permits, standards, and technology innovation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 44(1), 23–44.

PNUMA. (2006). Convenio de Basilea. *Europa: Síntesis de La Legislación de La UE.*

Romero Rodríguez, B. I. (2003). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental. *Tendencias tecnológicas*, 91-97.

Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L. N. (2004). Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing. *Management Science*, 50(2), 239–252.

Tirole, J. (1988). The Theory of Industrial Organization. *MIT Press*, Cambridge, MA.

Toyasaki, F., Boyacî, T., Verter, V. (2011). An analysis of monopolistic and competitive take-back schemes for WEEE recycling. Production and Operations Management, 20(6), 805–823.

Parliament, T. H. E. E., (2012) Waste Electrical And Electronic Equipment: Council Adopts New WEEE Directive. *European Report*, (June).

Índice de tablas

4.1. Cambios en los resultados del equilibrio como función de δ cuando $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $f = 0.5$, $\gamma = 3$ y $a = 10$. 25
4.2. Cambios en los resultados del equilibrio como función de γ cuando $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$, y $a = 10$. 28
4.3. Cambios en los resultados del equilibrio como función de a cuando $b = \alpha = \beta = \mu = 1$, $c = 3$, $\delta = f = 0.5$ y $\gamma = 3$. 31
4.4. Cupón, programa Apple Trade In (€). 34
4.5. Cupón como porcentaje del precio de los dispositivos de 64GB 35
4.6. Cupón como porcentaje del precio de los dispositivos de 256GB 35
4.7. Tasas de recolección de RAEE[1] en la Unión Europea 2010-2014. 38