



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE CREACIÓN DE EMPRESAS DE AGREGADORES DE
DEMANDA EN EL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO

Tatiana Belalcázar Rincón

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de:
Magister en Sistemas Energéticos

Director:

Santiago Arango Aramburo

Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín
Facultad de Minas
Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia

2020

Agradecimientos

A mis padres Maria Melva y Julian Fernando, que son la luz de mi vida y a mi padrino, que me inspira desde el cielo.

A Pedro Alejandro, por darme el privilegio de ser su esposa y por toda su paciencia y amor.

A Lina Córdoba, Ana María Sepúlveda y todos mis compañeros de HMV por su tiempo, apoyo y consejos.

A Susana, Andrés, Camila y Cristian, por su amistad y cariño.

.

Resumen

“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE CREACIÓN DE EMPRESAS DE AGREGADORES DE DEMANDA EN EL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO”

El gobierno colombiano se encuentra estructurando el marco regulatorio que incentiva la creación y operación de empresas agregadoras en el mercado de energía. El agente agregador en el sistema eléctrico, es el encargado de centralizar los servicios de gestión de la demanda y generación distribuida, con el objetivo de ofrecer servicios flexibilidad en la operación de la red y mejorar la competitividad de los precios en los periodos de mayor consumo. En este estudio se pretende analizar la difusión de agregadores en el sistema colombiano, y su respuesta ante políticas que puedan acelerar la contratación de los servicios de agregación y la creación de empresas agregadoras.

Palabras Clave

Agregador; Dinámica de sistemas; Desconexión de cargas; Gestión de Demanda; Modelo de Bass; Usuarios; Mercado Energético; Operación; Sistema Eléctrico.

Abstract

“ANALYSIS AND EVALUATION OF THE CREATION OF DEMAND AGGREGATORS IN THE COLOMBIAN ELECTRICITY MARKET”

The Colombian government is developing the regulatory framework to support an Energy aggregator in system. The aggregator has the responsibilities of centralizing services of demand management and distributed generation, with the objective of offering flexibility services in the operation of the network and improving price competitiveness in periods of increased consumption. This study proposes to analyze the diffusion of aggregators in the Colombian system, and their response to policies that can accelerate the hiring of aggregation services and the creation of new companies.

Keywords

Aggregator; Consumption; Energy flexibility; Demand Management; End Users; Energy Market; Operation; Electric system.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 7

1.1. OBJETIVOS 8

1.1.1. Objetivo general 8

1.1.2. Objetivos específicos 8

1.2. ALCANCE Y METODOLOGÍA 8

1.3. MARCO TEÓRICO 11

1.3.1. Programas de respuesta de la demanda 11

2. AGREGADORES DE DEMANDA 12

2.1. MODELOS DE OPERACIÓN PARA AGREGADORES DE DEMANDA 15

2.1.1. Agregador y comercializador 15

2.1.2. Agregador Independiente 15

2.1.3. Prosumidores como agregador 15

2.1.4. Agregador como “Virtual Power Plant” 16

2.2. CONTEXTO INTERNACIONAL DE AGREGADORES DE DEMANDA 16

3. AGREGADORES DE DEMANDA EN COLOMBIA: RETOS Y PERSPECTIVAS 17

3.1. ADAPTACIÓN DE LA FIGURA DE AGREGADOR PARA AGENTES EXISTENTES EN LA ESTRUCTURA DE MERCADO COLOMBIANA 18

3.2. COMPETENCIA ENTRE AGENTES AGREGADORES 20

3.3. POLITICAS APLICABLES A LOS AGREGADORES DE DEMANDA EN COLOMBIA 21

3.3.1. Demanda desconectable voluntaria (DDV) 21

3.3.2. Decreto 2469 de 2014 del Ministerio de Minas y Energía 22

3.3.3. Resolución 1988 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS
23

3.3.4. Resolución CREG 030 de 2018 23

3.3.5. Ley 1715 de 2014 24

3.3.6. Resolución MME 4 0072 de 2018 y Resolución MME 4 0483 de 2019 24

4. ANÁLISIS DINÁMICO DE LA DIFUSIÓN DE AGREGADORES 25

4.1. ARTICULACIÓN DEL PROBLEMA 25

4.2. HORIZONTE DE TIEMPO 25

4.3. MODO DE REFERENCIA 26

4.4.	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DINÁMICA.....	27
4.4.1.	Diagrama causal	27
4.4.2.	Diagrama de Flujos y Niveles.....	28
4.4.3.	Verificación previa del modelo.....	34
5.	PLANEACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	35
6.	RESULTADOS	36
7.	CONCLUSIONES	38
8.	BIBLIOGRAFÍA	40

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso para desarrollo de modelos dinámicos Fuente: (Sterman J. D., 2000) 10

Ilustración 2: Relaciones principales para el agregador de Energía Fuente: Propia 13

Ilustración 3: Diagrama general del sistema de agregación de la demanda Fuente: (Mirakhorli & Bing, 2018) 14

Ilustración 4: Estructura del sector eléctrico Colombiano Fuente: (XM Filial de ISA, 2018)..... 19

Ilustración 5: Esquema de relaciones de DDV en Colombia Fuente: (CREG, 2008) 22

Ilustración 6: Diagrama causal propuesto Fuente: Propia 28

Ilustración 7: Ciclo central de difusión para Modelo de difusión aplicado a empresas Agregadoras Fuente: Propia 29

Ilustración 8: Ciclo de creación de empresas agregadoras Fuente: Propia 32

Ilustración 9: Ciclo de precios Fuente: Propia 33

Ilustración 10: Diagrama de flujos y niveles para modelo de difusión de agregadores Fuente: Propia 34

Ilustración 11: Empresas Agregadoras establecidas - Realizado en Powersim Studio Fuente: Propia 36

Ilustración 12: Evolución de la tasa de Agregación de usuarios - Realizado en Powersim Studio Fuente: Propia 37

Ilustración 13: Evolución de los usuarios Agregados - Realizado en Powersim Studio Fuente: Propia 37

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas agregadoras de energía son un modelo de negocio que centraliza servicios de Respuesta de la demanda y generación distribuida, con el objetivo de ofrecer flexibilidad en la operación de la red eléctrica y mejorar la competitividad de los precios en los periodos de mayor consumo (Cadena & Muñoz Álvarez, 2019).

Los usuarios del agente agregador pueden ser residenciales e industriales, no obstante, este agente podría representar los intereses de otro tipo de recursos, como la generación distribuida, los sistemas de almacenamiento de energía, y vehículos eléctricos. Un ejemplo de esto es la implementación que se ha dado en Estados Unidos y Europa, en donde el agregador ofrece servicios como deslastre controlado de carga, control de tensión, servicios auxiliares, almacenamiento por medio de baterías, entre otros (Benavides & et al., 2018).

Debido a sus funciones, la implementación de agregadores en los mercados eléctricos permite reducir los costos de transacción en los mercados (Grass & Mach, 2019), fortalecer el uso de tecnologías de medición de consumos y monitoreo en la red, incluir fuentes de energía renovable, y según el tipo de contrato implementado puede ser agente de autogeneración con venta de excedentes, siendo este un paso de conversión de la red eléctrica hacia Smart grid (Palensky & Dietrich, 2011).

El interés del gobierno colombiano en incluir a los agregadores como agente del mercado se muestra en el año 2019, con la publicación del “Plan de Transformación Energética” promovido por el Gobierno Nacional y el Ministerio de Minas y Energía, con el cual se tiene el objetivo de modernizar el marco institucional para la incorporación de nuevos agentes, tecnologías y esquemas transaccionales en el mercado de energía.

El plan fija el plazo de dos años (2019-2021) a la Comisión de Regulación de Energía y Gas para determinar los mecanismos de mercado a nivel técnico y económico que faciliten la participación de este nuevo agente (Cadena & Muñoz Álvarez, 2019). En el año 2020 se presentarán resultados correspondientes a identificación de barreras de entrada para nuevos agentes y propuestas de regulación.

En este trabajo final de maestría, se analiza el comportamiento de la difusión de agregadores en el sistema colombiano, con el desarrollo de un primer prototipo de simulación en dinámica de sistemas, con el objetivo de analizar los procesos de toma de decisiones de los usuarios potenciales de las empresas agregadoras de energía. Este análisis se convierte en un acercamiento inicial que contribuye a la comprensión de factores clave para la adecuada implementación y aceptación de este agente en el sistema.

Este documento, se estructura en un primer capítulo de introducción que considera las generalidades de los programas de Respuesta de la demanda. En el segundo capítulo, se describe el funcionamiento de la figura de agregador y su contexto de implementación a nivel internacional, que permitirá analizar los servicios ofrecidos y la estructura de mercado utilizada en cada país.

El tercer capítulo evalúa las condiciones actuales de Colombia para implementar la figura de agregador, y describe algunas políticas vigentes que podrían favorecer el desarrollo de empresas agregadoras de energía. En el capítulo cuarto, se realiza el análisis dinámico de difusión de agregadores a partir del uso de la metodología de dinámica de sistemas, en donde se define el horizonte de tiempo y el modo de referencia que dan base a la formulación de la hipótesis dinámica. En la sección 4.4.3, se estructuran los diagramas de flujos y niveles que se simulan en el programa Powersim y cuyos resultados se analizan en el capítulo quinto. Finalmente, en el capítulo sexto se presentan las conclusiones.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento dinámico de la creación de empresas agregadoras de energía con el fin de mejorar la comprensión de los factores críticos que aceleran o inhiben su difusión.

1.1.2. Objetivos específicos

- Establecer la hipótesis dinámica para el comportamiento de la difusión de empresas agregadoras de energía, en base a su aceptación por los usuarios.
- Estudiar la regulación existente en Colombia para estimular la creación y funcionamiento de un agente agregador
- Simular la respuesta del sistema ante la implementación de políticas aplicadas en mercados internacionales para regular la actividad de las empresas agregadoras

1.2. ALCANCE Y METODOLOGÍA

Para evaluar la inclusión de agregadores en el sistema eléctrico colombiano, se desarrolla una primera aproximación de un modelo de simulación en dinámica de sistemas, el cual es un método conceptual y analítico que evalúa el comportamiento de sistemas multivariados, considerando las interacciones entre ellas (Forrester, 1971). La implementación de modelos en dinámica de sistemas, permite evaluar las consecuencias de intervenir un sistema, evidenciando las interacciones existentes entre las variables que lo conforman, y su comportamiento ante determinadas condiciones, lo cual brinda una herramienta de toma de decisiones con una amplia perspectiva de entendimiento del problema y sus componentes.

La metodología de dinámica de sistemas busca modelar un problema, no un sistema. Por lo tanto, lejos de ser una representación de la realidad, se convierte en una herramienta de activa implementación para analizar y simular la veracidad de hipótesis iniciales sobre las tendencias

esperadas en el sistema. Así mismo, permite comparar y confrontar el comportamiento de distintas variables ante la implementación de diversos escenarios (Sterman J. , 2000).

El modelo simulado en este trabajo final, parte de las bases del modelo de difusión propuesto por Frank M Bass, el cual describe la capacidad de un sistema de adoptar una nueva tecnología (Bass, 1969). La versión acumulativa del modelo de Bass es una curva en forma de S, la cuál ha sido ampliamente utilizada en la literatura para describir y pronosticar el comportamiento de la aceptación e implementación de tecnologías de innovación en diversas áreas (Bass, 2005).

El eje central de la teoría de difusión de Bass se basa en que los integrantes de un sistema social se ven influenciados por las decisiones de otros, lo cual se manifiesta en una cadena de comunicaciones que definen la toma de decisiones con respecto a la adopción o rechazo de una nueva tecnología (Mahajan, Bass, & Muller, 1995).

En la teoría de Bass, se cataloga como innovadores a los primeros usuarios en adquirir o hacer uso de una tecnología y como imitadores a los usuarios que son afectados en mayor o menor medida por la exposición a publicidad para tomar la decisión de adoptarla (Bass, 2005).

Matemáticamente, el modelo de Bass está compuesto por las siguientes variables (Guidolin & Mortarino, 2010):

$$z'(t) = p * (m - z(t)) + q * (z(t)/m) * (m - z(t))$$

Donde:

$z'(t)$ = Tasa de adopción

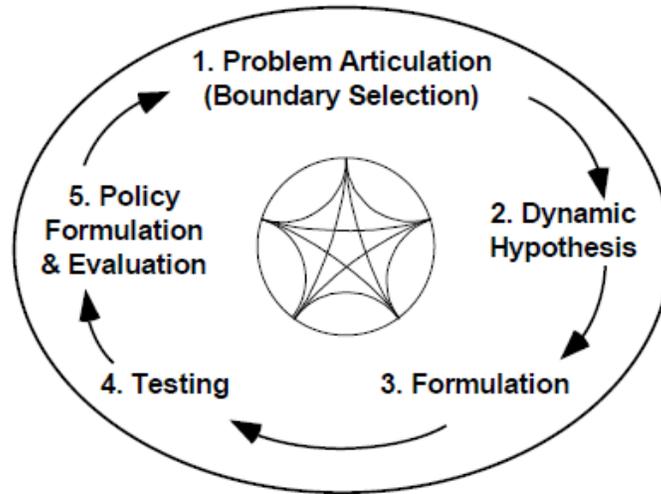
m = Usuario potencial

$z(t)$ = Compradores potenciales

p = Efectividad de la campaña

q = Tasa de contact

Para simular la teoría de Bass aplicada a los agregadores, se realiza la estructuración de modelos en dinámica de sistemas a partir de las bases de modelamiento del autor Jhon D. Sterman, que son presentados en la Ilustración 1.



*Ilustración 1: Proceso para desarrollo de modelos dinámicos
Fuente: (Sterman J. D., 2000)*

El primer paso de esta metodología corresponde a la estructuración del problema, en donde se definen las variables de estudio, el horizonte de tiempo y el modo de referencia, que permitirá formular la hipótesis dinámica, que justifique las causas del comportamiento del sistema.

El segundo paso es la formulación de la hipótesis dinámica, que se da con la identificación de las relaciones entre variables, las cuales construyen el diagrama causal y con él, la hipótesis inicial del problema estudiado, que en este caso corresponde a la difusión de empresas agregadoras en el sistema eléctrico.

Con base en las relaciones propuestas y la identificación de las variables, se realiza el tercer paso, correspondiente a la formulación del modelo de simulación, en donde se caracteriza el problema en términos de los ciclos y la estructura de flujos y niveles. En este tercer paso se define la estructura y los datos del caso base de simulación (John D. Sterman, 2007).

Los últimos pasos corresponden a las pruebas del modelo, las cuales pueden obtenerse a partir de comparación con otros modelos, datos de referencia, o con análisis de sensibilidad, dependiendo de las condiciones particulares de los datos y el sistema simulado. Una vez corroborados los niveles de precisión del modelo se realiza el diseño de políticas y la evaluación de sus efectos en el sistema.

El alcance de este trabajo pretende desarrollar los primeros tres pasos de esta metodología, con el objetivo de tener mayor comprensión de los factores que aceleran la difusión del servicio de agregadores en el sistema eléctrico y que ocasionan mayor creación de empresas en el sistema como respuesta a la demanda de sus servicios. Este análisis se requiere, debido a la necesidad de establecer la regulación adecuada sobre la creación de empresas agregadoras, cuya competencia afectaría su operación y la estructura operativa del mercado eléctrico en el cual se implemente.

1.3. MARCO TEÓRICO

La cadena de electricidad se compone de generación, transmisión, distribución y consumo. En esta cadena intervienen factores económicos y operativos que, por su estructuración, han rezagado a los usuarios finales a un rol pasivo, el de recibir el producto final. La aplicación de agregadores de energía en un sistema eléctrico, hace parte de la creciente tendencia de reforzar el rol del usuario en el mercado energético, de donde nacen los programas de respuesta de la demanda. Estos programas son estrategias aplicadas a favor de implementar un consumo más eficiente del recurso, convirtiendo a los consumidores en protagonistas activos de la cadena energética.

El estímulo de la eficiencia energética para mejorar la operación del sistema, ha sido una necesidad con el crecimiento de las redes eléctricas a nivel mundial (Strbac, 2008). Históricamente las acciones aplicadas en los sistemas para mejorar el uso de las redes, han ido dirigidas a los negocios de generación y transmisión (Burger & Chaves Avila, 2017).

La implementación de sistemas de medición bidireccionales, el monitoreo en tiempo real y la generación distribuida han reflejado la necesidad de dar a los usuarios un rol activo dentro de la cadena de electricidad, guiando las políticas regulatorias y de mercado hacia esta inclusión. Esta condición ha sido estudiada por sus beneficios a la confiabilidad y operatividad de la red y se reconoce en la literatura como respuesta de la demanda (Albadi & El-Saadany, 2008).

1.3.1. Programas de respuesta de la demanda

Los programas de Respuesta de la demanda son estrategias de estímulos tarifarios mediante la implementación de sistemas de medición y control. Algunos de los objetivos deseados son modificar los patrones de consumo de los usuarios de energía, para mejorar la operatividad del sistema, al tener mejor aprovechamiento del recurso energético y de la capacidad instalada (US Department of energy, 2006).

En la actualidad, el sistema de transmisión colombiano se encuentra en proceso de construcción de un importante plan de expansión, que se desarrolla principalmente en la zona Caribe del país con el objetivo de dar entrada a nuevas plantas de generación de energía renovable (UPME, 2019). Estos procesos de construcción traen consigo el manejo de desconexiones que afectan la continuidad del servicio y para la cual se requiere de mayor seguridad de las maniobras y flexibilidad en la operación.

En este sentido, la capacidad de los usuarios de modificar sus patrones de consumo constituye a la demanda como una herramienta que permite mejorar la confiabilidad de la red y la flexibilidad de maniobras para los operadores del sistema.

Mediante la implementación de programas de Respuesta de la demanda, es posible disminuir los picos de máxima demanda, causando el aplazamiento de inversiones en las redes de transmisión y sirviendo de herramienta para manejar el atraso en la construcción de nuevos proyectos de subestaciones y líneas (Palensky & Dietrich, 2011).

El manejo de estos programas puede darse mediante diversos métodos, los cuales son afectados por las políticas regulatorias e incentivos de mercado. La Comisión Federal de Regulación de Energía (FERC) que opera en el mercado estadounidense, considera que el éxito en la implementación de programas de Respuesta de la demanda, se basa en el buen entendimiento de los distintos tipos de usuarios del sistema, y de la capacidad de adaptación a cambios operativos de los demás agentes como generadores y transmisores (Federal Energy Regulatory Commission, 2019).

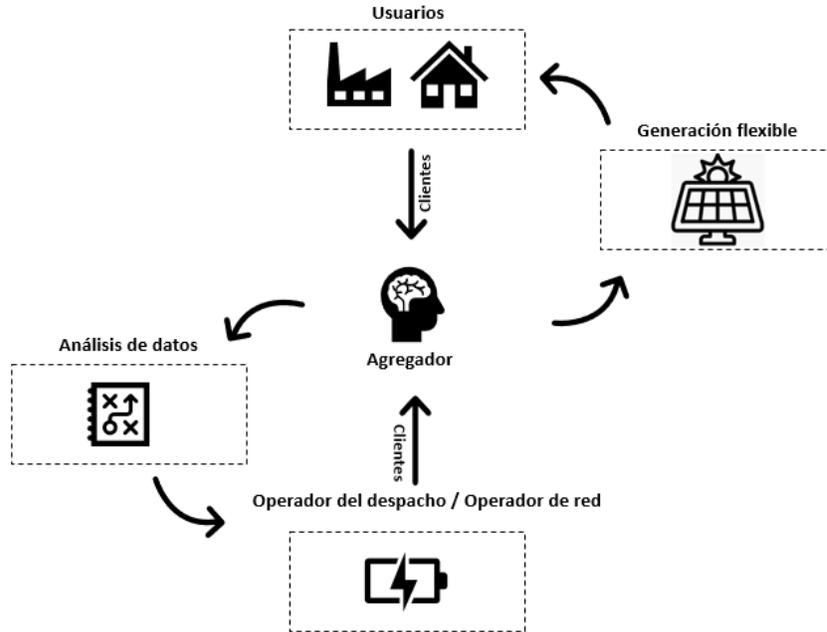
Una de las estrategias para facilitar la transición tecnológica y económica que se requiere para la ejecución de programas de Respuesta de la demanda, es la centralización de estos servicios por medio de un agente agregador (Benavides & et al., 2018). En distintos países de Europa y en Estados Unidos se han implementado políticas y regulaciones para incentivar la entrada de estos agentes, que permiten maximizar los beneficios de estos mecanismos para la operatividad del sistema eléctrico y la eficiencia en el uso del recurso.

2. AGREGADORES DE DEMANDA

La implementación de programas de Respuesta de la demanda, requiere de importantes inversiones en infraestructura tecnológica para el usuario y para la entidad que lo represente en el mercado energético, o quien se encargue de operar y transar las modificaciones en el consumo eléctrico. Los agentes agregadores de energía se encargan de gestionar y agrupar el consumo de electricidad de varios usuarios finales y actúan como una sola entidad al momento de participar en la compra y venta de electricidad o servicios operativos requeridos en la red (Burger & Chaves Avila, 2017).

Los agregadores tienen conocimiento de las necesidades energéticas, las condiciones técnicas de las instalaciones y los hábitos de consumo de sus clientes. Esto les permite dotarse con la capacidad tecnológica y administrativa para tomar decisiones sobre las cargas a agregar, con el objetivo de cumplir obligaciones establecidas en contratos o requerimientos del operador del sistema (Bray & Woodman, 2019). En este orden de ideas, la estructura de negocio de la entidad agregadora, como lo muestra la Ilustración 2, le permite utilizar generación flexible y análisis de datos para relacionarse bidireccionalmente con la demanda y el operador del despacho.

A los consumidores de energía, el agente agregador les ofrece remuneración por los cambios de sus consumos, o disminución del precio por kWh/mes facturado, a cambio de permitir la reasignación de la carga en períodos en los que se presenta mayor congestión en la red, e incluso mediante la intervención su sistema productivo a través de la implementación de fuentes de generación de respaldo, como paneles solares y otras estrategias de eficiencia energética (World Bank, 2016).



*Ilustración 2: Relaciones principales para el agregador de Energía
Fuente: Propia*

El agregador se relaciona con el operador del despacho o el operador de red, según aplique la regulación, pero en todos los casos, siendo el encargado de ejecutar estratégicamente el deslastre de carga según lo requieran eventos en el sistema, o los vínculos comerciales que establezcan las partes. El manejo de tecnologías de monitoreo en tiempo real y análisis de datos han convertido a los agregadores en entidades prestadoras de servicios complementarios como control de tensión y de reservas operativas para Estados Unidos y Europa (Behrangrad, 2015). Adicionalmente, los agregadores tienen disponibilidad de información sobre consumos y precios, lo cual permite a los consumidores, históricamente estáticos, participar en los mercados operativos de reserva y capacidad (Marques & Fuinhas, 2018).

El público de interés en estos agentes puede sobrepasar a los consumidores de energía eléctrica que buscan reducir sus tarifas, ya que, en algunos mercados, las plantas de generación se convierten en el público objetivo de empresas agregadoras. Esto se da gracias a la capacidad de los agentes agregadores para centralizar las curvas de generación de diferentes tecnologías en un mismo sistema, convirtiéndose en un gestor de la producción y la flexibilidad de diferentes plantas de energía.

El mercado de servicios auxiliares se viabiliza para los agregadores a partir del despliegue tecnológico en fuentes de generación y monitoreo, conocimiento de las curvas de demanda, y uso de baterías distribuidas en las instalaciones de sus clientes, que le permiten flexibilizar los consumos, manteniendo los niveles de satisfacción asociados a las actividades de estos (Mirakhorli & Bing, 2018).

La disponibilidad del recurso de baterías para la aplicación de servicios auxiliares en el sistema, se vuelve factible a medida que los usuarios son representados ante el mercado de energía por el mismo agente, ofertando servicios de control de tensión y reserva sincronizada. Esta tecnología es especialmente lucrativa comparada con los recursos tradicionales, considerando que las baterías tienen una rampa de funcionamiento más alta y pueden responder más rápido a las contingencias del sistema (Liu & Et al., 2019).

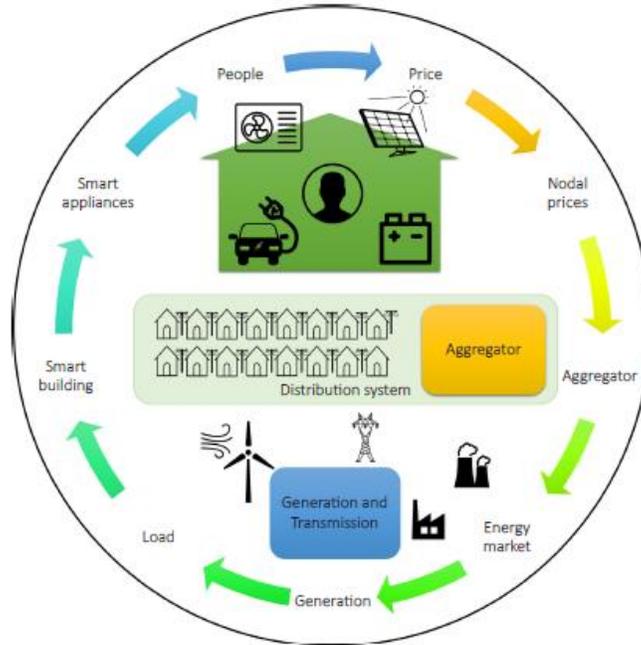


Ilustración 3: Diagrama general del sistema de agregación de la demanda
Fuente: (Mirakhorli & Bing, 2018)

Estas aplicaciones demuestran que las empresas agregadoras tienen el potencial para implementar estrategias, que transforman la disponibilidad energética de sus clientes en ofertas de mercado para las reservas operativas de la red, a través del uso de herramientas tecnológicas y de monitoreo que crean relaciones con el consumidor y el operador de la red, como se puede ver en la Ilustración 3.

La estructura de operación de este nuevo agente en el sistema eléctrico permite que la red tenga costos operativos más bajos a causa del aumento en la flexibilidad de operación, la cual se da a partir del mayor despliegue de recursos que proporcionan estabilidad a la red (Lampropoulos & et al., 2019), y dan la posibilidad de operar cargas acordes a las necesidades geográficas (operación nodal) y horarias del sistema de transmisión. Los efectos a mediano plazo de estas condiciones se reflejan en mayor facilidad de instalación y operación de nueva generación, a medida que la gestión de la red se reduce (Strbac, 2008).

Estas modificaciones sobre la matriz energética y su operatividad, aumentan la inclusión de generación distribuida y facilitan las maniobras de desconexión de la red central y la operatividad de las cargas (Palensky & Dietrich, 2011). Diferentes autores coinciden en que el éxito de la implementación, depende de la estructura operacional de los sistemas en donde se ejecuten,

considerando las particularidades de la conformación vertical de la cadena energética y las necesidades de los usuarios, quienes se convierten en prosumidores¹ y agentes activos, no solo en la red, sino también en la bolsa o mercado transaccional de energía.

2.1. MODELOS DE OPERACIÓN PARA AGREGADORES DE DEMANDA

Con la entrada de agregadores en el mercado, se crean afectaciones económicas y operativas para uno o más agentes que conforman la cadena de electricidad (usuarios, transmisores u operadores de red) a causa de los cambios en el uso de la red. A partir de la regulación y la estructura de mercado eléctrico, pueden surgir diferentes roles y responsabilidades para la entidad agregadora. Algunos de los modelos de negocio existentes para los agregadores son los siguientes:

2.1.1. Agregador y comercializador

Es posible combinar el papel y los servicios del agregador y el comercializador de energía. Los principales beneficios de esta implementación, son la reducción de la complejidad en la participación del mercado económico, debido a la existencia previa de acuerdos comerciales entre los usuarios y la figura de comercializador (BestRES, 2016).

2.1.2. Agregador Independiente

La figura de agregador puede crearse sin pertenecer a ningún agente existente de la cadena energética. Este caso trae consigo regulaciones estandarizadas que compensan al comercializador u operador de red por los desequilibrios de los pronósticos de demanda, a causa de la activación de los programas de reducción de consumo, que promueve el agregador. Una de las dificultades de este mecanismo se basa en establecer esas estrategias de compensación financiera que protejan a las partes intervinientes (Burger & Chaves Avila, 2017).

2.1.3. Prosumidores como agregador

Los prosumidores comerciales e industriales pueden ejercer el papel de agregador para sus propios consumos. Para los clientes domésticos, esto será mucho más difícil, pero es posible que un actor agregue muchos pequeños volúmenes de hogares, lo que a largo plazo lo convierte en un modelo de agregador independiente (BestRES, 2016).

¹ Prosumidor de energía es el usuario que no solo demanda energía de la red, sino que gestiona su consumo y generación de energía, haciendo parte activa del mercado por medio del uso de tecnologías de medición bidireccional, monitoreo en tiempo real y generación distribuida.

Para que este modelo sea aplicado, es necesario que el acceso al mercado de energía sea abierto a muchos agentes, lo que podría complicar la regulación, encarecer el acceso a las tecnologías y la interacción de mecanismos de compensación y monitoreo (Bray & Woodman, 2019).

2.1.4. Agregador como “Virtual Power Plant”

Este modelo se diferencia del agregador convencional debido a que normalmente considera en su público objetivo a los generadores. Su sistema se basa en el uso de tecnologías para optimizar el despacho de diferentes recursos de generación, propiedad de diferentes agentes, con el objetivo de vincular el comercio minorista con mercados mayoristas (Sánchez Jaramillo. & Pérez Romero, 2019).

2.2. CONTEXTO INTERNACIONAL DE AGREGADORES DE DEMANDA

La inclusión de los servicios de agregadores en el mercado eléctrico se ha dado a nivel internacional. Uno de los ejemplos de éxito es la compañía EnerNOC, recientemente adquirida por el grupo ENEL y una de las empresas líderes a nivel mundial en el desarrollo de sistemas para la demanda activa, la cual cuenta con 8.000 clientes, que reúnen una capacidad de Respuesta de la demanda equivalente a un total de 6 GW en Norteamérica, Europa y el Sudeste Asiático (Enel Green Power, 2019).

La regulación estadounidense permite que los agregadores presten servicios complementarios al sistema eléctrico, para lo cual se creó en 2016 la figura de Proveedor de Recursos Energéticos Distribuidos (DERP), la cual se encarga de representar las ofertas de Respuesta de la demanda en el mercado de energía y de servicios complementarios (Federal Energy Regulatory Commission, 2019).

Para los países europeos, la actividad comercial de Respuesta de la demanda por medio de entidades agregadoras se ha fortalecido a causa de la publicación de las llamadas “Medidas de Energía Limpia”² que dan un periodo de dos años a sus miembros para implementar políticas de eficiencia energética, y rediseño de los mercados de electricidad en pro de la inclusión de nuevos agentes (Verrier, 2018).

En España fue reglamentado por el Parlamento Europeo la directiva 2019/943, para la cual se definen en el sistema eléctrico los términos de 'cliente activo', 'comunidad ciudadana de la energía', 'agregación' y 'agregador independiente' (ENTRA, 2019). Mediante la entrada en vigencia de esta normativa, que se dio a partir de enero de 2020, se dictan los derechos de las empresas a vender programas de flexibilidad y autogeneración, y se autoriza a los clientes finales para vender y comprar energía o servicios de electricidad incluida la agregación, aún sin el consentimiento del comercializador (Unión Europea, 2019).

² Texto original: “Clean Energy Package of European Commission”

En Francia las empresas agregadoras se han impulsado por diferentes textos legislativos que autorizan a la demanda para hacer transacciones en el mercado mayorista, y participar en la prestación de servicios auxiliares (Bray & Woodman, 2019). La remuneración de los servicios que prestan estos agentes se da a través de productos de mercado diseñados a la medida, lo cual ha incrementado la participación de empresas como Voltalis, Energy Pool y Actility, que comercializan con clientes residenciales y consumidores industriales (Verrier, 2018). La existencia de estos nuevos participantes en el mercado demuestra la viabilidad técnica para desencadenar eventos exitosos de respuesta de la demanda que beneficien económicamente tanto a los consumidores como a los nuevos agentes del mercado.

En Gran Bretaña, el 74% de las operaciones realizadas en el sistema con respecto a respuesta de la demanda se dio por intermedio de empresas agregadoras, quienes, según la regulación de este país, no pueden participar en el mercado mayorista, pero pueden apoyar la mayoría de servicios auxiliares. La contratación de los servicios de flexibilidad se da independiente del proveedor del cliente (Bray & Woodman, 2019).

En el Reino Unido, se otorgó licencia para prestar los servicios de agregador en el sistema a la empresa Flexicity (Benavides & et al., 2018). Esta empresa se considera pionera en ese país por ofrecer servicios de agregación de la demanda, a favor del balance del sistema eléctrico desde 2004 y se desempeña en los roles de agregador y comercializador (Flexitricity, 2019).

Si bien las experiencias internacionales citadas en este capítulo son positivas, es importante considerar que varios autores (Borne, Chaves-ávila, de Vries & Poplavskaya) coinciden en que las principales barreras para los agregadores son: la coordinación de las funciones entre agentes existentes en el sistema y la definición del tamaño de mercado para las empresas.

En el caso de la Unión Europea, empresas como Enel, Engie y Eon, han aprovechado su posicionamiento y operación en los negocios de generación y distribución para ofrecer servicios de agregador. El interés en este modelo de negocio ha sido tan grande, que el 35% de los agregadores existentes en los primeros años de desarrollo del negocio, fueron adquiridos por empresas generadoras, transmisoras o distribuidoras existentes (de Vries & Poplavskaya, 2020).

Las perspectivas internacionales son diversas y representan la importancia de estos agentes para implementar políticas de eficiencia energética y respuesta de la demanda, sin embargo, en cada país se ha considerado la transición de la regulación y el mercado hacia la aceptación de una nueva dinámica de negocio que podría afectar la figura del operador de red o gestor comercial de los usuarios finales de energía.

3. AGREGADORES DE DEMANDA EN COLOMBIA: RETOS Y PERSPECTIVAS

En el año 2019 se publicó el Plan Nacional de Desarrollo (PND) para el gobierno entrante, el cual tiene como objetivo establecer las metas, programas e inversiones que se van a realizar por los diferentes ministerios y entidades públicas durante los próximos cuatro años.

En este documento se establece que, en el ámbito energético, se implementarán programas para la entrada de nuevos agentes al sistema, de forma que se incentive la competencia y el desarrollo de negocios descentralizados en el sector de servicios públicos domiciliarios y otros relacionados (Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2019). Esta hoja de ruta, reforzada con los diferentes planes que se encuentra ejecutando el Ministerio de Minas y Energía en relación a la respuesta de la demanda, son un escenario abierto para la implementación de empresas agregadoras en el sistema eléctrico colombiano.

Para evaluar la entrada en operación de un nuevo agente agregador, es recomendable considerar dos aspectos principales, el primero relacionado con la necesidad de regular la cantidad de empresas agregadoras que puedan crearse en el sistema y el segundo, con la adaptación de la figura de agregador a un agente existente del mercado energético (Cadena & Muñoz Álvarez, 2019).

3.1. ADAPTACIÓN DE LA FIGURA DE AGREGADOR PARA AGENTES EXISTENTES EN LA ESTRUCTURA DE MERCADO COLOMBIANA

Para la implementación de la figura de agregador, que está en evaluación por parte del Ministerio de Minas y Energía, se encuentra activa la discusión acerca de la pertinencia de incluir agentes existentes (por ejemplo, Operadores de Red) para manejar los servicios de agregación, entre los cuales se incluye la representación de los usuarios con capacidad de respuesta de la demanda, y las transacciones de sus servicios en el mercado mayorista. (Cadena & Muñoz Álvarez, 2019).

En Colombia, la estructura del sistema eléctrico separa la integración de los negocios de generación, transmisión, distribución y comercialización, de tal forma que la entidad que tiene relaciones comerciales directas con los clientes residenciales e industriales es la empresa comercializadora, como se esquematiza en la Ilustración 4.

El mercado de comercialización opera con la estructura económica de competencia, en donde conforme a lo dispuesto en la Ley 142 de 1994, los usuarios tienen libre elección del prestador del servicio de comercialización, lo cual opera como ventaja competitiva para los precios y la dinámica de mercado que se aplicaría en un modelo de negocio de agregadores de demanda.



Ilustración 4: Estructura del sector eléctrico Colombiano
Fuente: (XM Filial de ISA, 2018)

La actividad de comercialización de energía eléctrica en Colombia está definida como: “Actividad consistente en la compra de energía eléctrica en el mercado mayorista y su venta con destino a otras operaciones en dicho mercado o a los usuarios finales” (CREG, 2011).

En la estructuración del mercado actual, es muy común que los comercializadores operen en paralelo a las actividades de distribución o generación. Sin embargo, también pueden ser agentes individuales en el mercado, sin conformación horizontal con otras actividades de la cadena energética. Los comercializadores, adquieren la energía y la potencia en un mercado de grandes bloques horarios, que operan libremente de acuerdo con las condiciones de oferta y demanda (XM filial de ISA, 2019).

Estudios para el mercado energético de Colombia, realizados por FEDESARROLLO, proponen que la CREG³ adopte un modelo en que la figura de comercializador se encargue de agregar las ofertas de los consumidores y las ofrezca como servicios al operador del sistema de distribución (DSO). Esta propuesta tiene la ventaja de que no es necesario establecer vínculos contractuales entre un nuevo agente y los usuarios, lo cual le brinda simplicidad a la implementación (Benavides & et al., 2018).

Para el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, aún está en definición la conveniencia de un modelo provisional para implementar agregadores de energía. Los resultados de la misión de transformación energética sugieren que sea la figura de comercializador/agregador, de forma que facilite la transición de la estructura institucional y regulatoria actual del sector a la estructura más descentralizada (Cadena & Muñoz Álvarez, 2019).

³ Comisión de Regulación de energía y gas (CREG) es la encargada de establecer las regulaciones aplicables al funcionamiento del mercado de electricidad en Colombia

3.2. COMPETENCIA ENTRE AGENTES AGREGADORES

Después de establecer una posible entidad para impulsar la estructura de negocio del agregador de energía, la pregunta relevante para el gobierno colombiano es, si el crecimiento del mercado obedece al interés de que se conserve un único agregador (por ejemplo, ISO o DSO), o si lo que se busca es incentivar la competencia, lo cual requiere tener un número determinado de agregadores que eviten el control de mercado tipo monopolio (Bray & Woodman, 2019).

Las empresas agregadoras se crean con el objetivo de centralizar la gestión de Respuesta de la demanda, y su valor agregado aumenta en la medida en que este nuevo agente tenga poder de desconexión de sus usuarios. Cuando no se regula la creación de empresas agregadoras, puede disminuirse el impacto de estos servicios en el sistema, por lo cual es pertinente que las políticas regulatorias y de gestión de mercado, consideren el control de incentivos para creación de empresas.

En el escenario en el que la creación de empresas agregadoras sea libre, se crea una competencia económica entre muchos agentes pequeños, lo cual ocasiona que el precio de la energía y los servicios ofrecidos por el agregador, se mantengan en un límite inferior, lo cual es saludable para el mercado (Stoft, 2002). Bajo esta política energética, los agregadoras pueden competir también con generadores centralizados para mejorar la competencia en el suministro, que se ve reflejado en mayor competitividad de los precios (Littlechild, 2000).

Para algunos autores, como Burger & Chaves, el mejor modelo operativo para las empresas agregadoras es el de centralizar los servicios en un solo agregador. Este escenario optimiza los costos operativos relacionados a la implementación de estrategias de medición inteligente y monitoreo en tiempo real, y asegura que el agregador tendrá poder de gestión de la demanda (Burger & Chaves Avila, 2017). Las dificultades de este mecanismo son el mayor poder de mercado unilateral, la integración vertical y el aumento de barreras de entrada o expansión (Littlechild, 2000).

La política energética en Colombia al año 2020, aún no define la estrategia de implementación de empresas agregadoras de energía desde el punto de vista de la competencia, y se encuentra en proceso de conceptualizar las diferentes figuras de agregador para elegir la de mayor conveniencia en el mercado. Sin embargo, el avance regulatorio en el ámbito de eficiencia energética y redes inteligentes, ha permitido tener vigentes normativas que hoy son una base activa para la implementación de un agregador independiente en el mercado, y que se presentan a en la sección 3.3.

3.3. POLITICAS APLICABLES A LOS AGREGADORES DE DEMANDA EN COLOMBIA

Las regulaciones que impulsan la descentralización de los servicios de energía y el uso de tecnologías de medición, facilitan la aceptación y el funcionamiento de nuevos agentes en la cadena energética. A continuación, se presentan algunas resoluciones vigentes, que podrían aplicarse a favor de la implementación de agregadores en el sistema eléctrico colombiano y que estimularían la inversión en este modelo de negocio.

3.3.1. Demanda desconectable voluntaria (DDV)

En materia de respuesta de la demanda, en Colombia se encuentra vigente la resolución CREG 071 de 2006, modificada por la Resolución CREG 063 de 2010 y la CREG 203 de 2013 en la que se define la demanda desconectable voluntaria (DDV) como un mecanismo de confiabilidad⁴, únicamente aplicable a los anillos de seguridad del Cargo por Confiabilidad, y que opera en caso de condiciones críticas de abastecimiento. El producto que define la CREG para este mecanismo se cita a continuación:

“Producto. Será la cantidad de demanda de energía reducida en un día (kWh-día) por parte de un comercializador. Esta reducción de energía será pactada en una relación contractual bilateral entre un generador y un comercializador. Se estimará según las metodologías definidas en esta Resolución y se tendrá en cuenta en la verificación del cumplimiento de la Obligación de Energía en Firme que respalda la planta o unidad de generación a la que se le asocie el mecanismo” (CREG, 2013)

La regulación de este mecanismo podría utilizarse como plataforma para transar los servicios asociados a la confiabilidad que un agregador podría centralizar. A corte de octubre de 2018, se encuentran registradas 197 empresas para aportar DDV al sistema, todos siendo grandes consumidores de energía como hoteles, almacenes y fábricas, según los datos abiertos publicados por el operador del mercado XM (XM, 2019).

La normativa de DDV se activa únicamente en condiciones de escasez y se requiere que el precio de oferta del recurso sea inferior a la diferencia entre el precio de bolsa y el precio de escasez, lo cual se considera un requisito exigente, que se vuelve útil en la medida en que el fenómeno del niño afecte de forma importante el despacho hidroeléctrico del país (Dirección Nacional de Planeación, 2017). El funcionamiento general de las transacciones opera a partir de las relaciones presentadas en la Ilustración 5, siendo el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales – ASIC la entidad encargada de mediar los contratos y garantías asociadas a la implementación del mismo.

⁴ Es un esquema de remuneración que permite hacer viable la inversión en los recursos de generación eléctrica necesarios para garantizar de manera eficiente la atención de la demanda de energía en condiciones críticas de abastecimiento, a través de señales de largo plazo y la estabilización de los ingresos del generador (XM Filial de ISA, 2018).

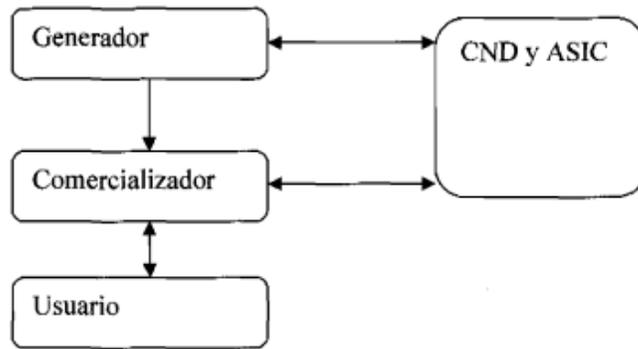


Ilustración 5: Esquema de relaciones de DDV en Colombia
Fuente: (CREG, 2008)

En el caso de los generadores, este mecanismo opera para justificar variaciones en la prestación del cargo por confiabilidad, aunque la demostración del deslastre de carga no es verificable del todo para el operador del sistema, lo cual representa una dificultad para la operación y en la misma ejecución del mecanismo.

Si bien existen importantes modificaciones que deben hacerse a la operatividad del DDV, la implementación este mecanismo es un avance importante en pro de la transacción de energía firme a modo de eficiencia energética (o en este caso deslastre de carga), y también aporta al sistema desde el punto de vista de obligaciones asociadas a la implementación de medida bidireccional, lo cual paulatinamente aporta a la transición hacia el monitoreo y medición inteligente y resta inercia al modelo de negocio de un posible agregador de demanda.

3.3.2. Decreto 2469 de 2014 del Ministerio de Minas y Energía

Establece los lineamientos de política energética en materia de venta de excedentes para la autogeneración a gran escala. Es importante resaltar que se establece la obligación a la CREG, para que mantenga simetría en las condiciones de participación en el mercado mayorista, entre los generadores y los autogeneradores a gran escala.

Esta regulación obliga a los autogeneradores a gran escala a ser representados en el mercado mayorista por medio de un agente comercializador o generador. Este escenario es una plataforma importante de entrada para el funcionamiento de las empresas agregadoras, dado que su objetivo es el de representar a sus usuarios en el mercado de energía.

3.3.3. Resolución 1988 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS

En esta resolución se establecen metas de ahorro de energía diferenciadas por sector productivo (Tabla 1) y se definen las responsabilidades para entidades gubernamentales con el fin de desarrollar instrumentos técnicos, jurídicos, económicos y financieros que permitan el cumplimiento de las metas en plazos establecidos. Uno de los planes de mayor importancia se da con la reducción del impuesto IVA para los proyectos de eficiencia energética, lo cual impulsa la rentabilidad asociada a estos.

Tabla 1: Metas de ahorro de energía

SECTOR	META DE AHORRO DE ENERGÍA A 2022 (%)
Transporte	5.49
Industria	1.71
Terciario	1.13
Residencial	0.73

La necesidad de cumplir estas metas de ahorro, podrían permitir que una empresa agregadora, en conjunto con el Gobierno Nacional y el Ministerio de Minas y Energía realice los primeros planes de gestión energética con los usuarios objetivo de esta regulación, aplicando los incentivos a las actividades económicas de los clientes y sirviendo como primer piloto para realizar desconexiones centralizadas.

3.3.4. Resolución CREG 030 de 2018

Esta resolución establece los lineamientos para la gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala. Su importancia radica en que regula los parámetros técnicos y las tarifarios para asegurar que los usuarios con capacidad de autogeneración entreguen excedentes a la red. El operador de red se ve entonces en responsabilidad de implementar mecanismos para compensar a los usuarios auto generadores por la venta de excedentes siempre que existe capacidad.

La operatividad de inyección de energía y condiciones de disponibilidad de la red para usuarios con capacidad de autogeneración, hace parte de las normatividades básicas que un agente agregador utiliza para su actividad económica y formulación de precios, por lo cual esta resolución es un avance que permitiría la implementación de este negocio.

3.3.5. Ley 1715 de 2014

Esta ley define los incentivos para la implementación de generación a partir de fuentes de energía renovable no convencional y su integración al mercado de energía. Mediante esta ley se sancionan los siguientes beneficios tributarios y arancelarios:

- Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta, en donde tendrán derecho a deducir hasta el 50% del valor de las inversiones.
- Depreciación acelerada, lo cual permite que sea deducible al momento de declarar el impuesto sobre la renta.
- Por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados se realiza la exclusión de IVA
- Exención del pago de los Derechos Arancelarios para la Importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos.

Los beneficios económicos a los cuales es posible acceder con la sanción de esta ley dan impulso a la tarifa que puedan ofrecer empresas agregadoras de energía a sus usuarios, lo cual reduciría los costos de inversión inicial, financiación y riesgo.

3.3.6. Resolución MME 4 0072 de 2018 y Resolución MME 4 0483 de 2019

Estas resoluciones establecen lineamientos de política energética en materia de implementación de medición avanzada, y se publican con el objetivo de facilitar esquemas de eficiencia energética, tarifación horaria, generación distribuida y Respuesta de la demanda.

En esta resolución se establece que, para el año 2030, el 75% de los usuarios debe contar con equipos de medición avanzada. Para la implementación de agregadores en el mercado energético, lo cual representa una oportunidad para financiar estrategias de medición y potenciar la contratación de los servicios de las empresas agregadoras.

4. ANÁLISIS DINÁMICO DE LA DIFUSIÓN DE AGREGADORES

En este capítulo se realiza la estructuración del modelo de agregador a partir de los tres primeros pasos del modelamiento, propuestos por el autor Jhon D Sterman. Estos pasos corresponden a la articulación del problema, formulación de hipótesis dinámica y formulación del modelo de simulación.

4.1. ARTICULACIÓN DEL PROBLEMA

El éxito en la implementación y aceptación del agregador de demanda, depende en gran parte de los procesos de toma de decisiones de los clientes potenciales (Lund, 2006). Estos clientes se influyen por la disponibilidad de información sobre los servicios del agente agregador y la experiencia pasada de usuarios que, como innovadores, hayan contratado los servicios de una empresa agregadora.

Por medio del modelado dinámico, se pretende evaluar el comportamiento de la tasa de agregación de los usuarios hacia los servicios de empresas agregadoras, teniendo en consideración que, las empresas agregadoras deben tener suficientes usuarios pequeños centralizados, para considerar que puede hacer gestión de demanda en el sistema.

4.2. HORIZONTE DE TIEMPO

Para el modelamiento sistemas dinámicos, el autor Jhon D. Sterman recomienda seleccionar una ventana de tiempo que permita capturar el comportamiento de las variables ante las políticas a simular (John D. Sterman, 2007). Para definir el horizonte de tiempo a utilizar en las simulaciones de difusión de agentes agregadores en el sistema eléctrico, se tiene en consideración el tiempo de vigencia de los contratos que normalmente establece un agente agregador con sus clientes.

Si bien la duración de los contratos dependerá de la cantidad de servicios que centraliza el agregador en cada sistema, según estudios del Banco Interamericano de Desarrollo, los contratos asociados a eficiencia energética, gestión de energía y Respuesta de la demanda, que se cierran con usuarios de consumos residenciales e industriales, se desarrollan con condiciones de permanencia entre 1 y 5 años (Vieira de Carvalho & Rojas, 2016).

El lapso necesario para ejecutar dos periodos de un contrato de suministro de energía a largo plazo es el equivalente a un total de 10 años, razón por la cual se usará este periodo de tiempo en las simulaciones.

4.3. MODO DE REFERENCIA

El modo de referencia en dinámica de sistemas tiene el objetivo de caracterizar el problema a partir de los patrones de comportamiento de las variables clave consideradas en el modelado (Sterman J. D., 2000).

Para el caso de difusión de agregadores, no se tiene un histórico en el país, al ser una propuesta nueva. Para este modelo, se toman como referencia los datos disponibles sobre la cantidad de agregadores en mercados internacionales, que se registran en la Tabla 2. A partir de estos datos, se espera fijar una tendencia del posible comportamiento de la creación de empresas en el sistema eléctrico.

Tabla 2: Cantidad de agregadores en Mercados internacionales

País/Región	Año de inicio del registro	Cantidad de agregadores	Fuente
Texas, EEUU	2003	162	(Public Utility Commission of Texas, 2020)
California	2002	19	(California Public Utilities Commission, 2020)
Reino unido	2004	21	(National Grid ESO, 2020)
New jersey	2009	20	(LEAN Energy US, 2020)
Massachusetts	2009	16	(LEAN Energy US, 2020)
Alemania	2010	16	(de Vries & Poplavskaya, 2020)
Francia	2016	10	(de Vries & Poplavskaya, 2020)

En los datos recolectados, puede evidenciarse que, en Texas - EEUU, se registra un alto número de empresas agregadoras (162) en comparación con otros estados y países. Este comportamiento se da debido a que su regulación impulsa la descentralización de la figura de agregador y la libre creación de empresa.

Desde la perspectiva del número de MW que puede manejar una misma empresa agregadora, se considera en el modo de referencia, el número de usuarios agregados al inicio de la operación de la empresa ENERNOC, la cual es una de las pioneras a nivel mundial en implementar la figura de agregador. Según sus datos públicos, el crecimiento de clientes para esta empresa en los primeros tres años de consolidación fue en promedio 2,6 veces cada año, en donde los clientes crecían a una tasa aproximada de 80 MW por año (EnerNoc, 2006).

Es importante considerar que los resultados del número de agregadores constituidos y el número de MW agregados por empresa, varían de acuerdo a las políticas existentes y a la conformación del sistema eléctrico en cada país, sin embargo, es necesario tener referencias que permitan validar la estructura y el comportamiento general que se esperaría tener en el modelo.

4.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DINÁMICA

4.4.1. Diagrama causal

El eje central de la teoría de difusión de Bass se basa en que los integrantes de un sistema social se ven influenciados por las decisiones de otros, lo cual se manifiesta en una cadena de comunicaciones que definen la toma de decisiones, con respecto a la adopción o rechazo de una nueva tecnología (Mahajan, Bass, & Muller, 1995). La exposición de los usuarios potenciales a esas influencias externas modifica la tasa de agregación del sistema y por lo tanto la cantidad de usuarios que unen su carga al manejo de la empresa agregadora.

Cuando la empresa agregadora comienza a ofrecer sus servicios, la tasa de contratación de los servicios del agregador (Tasa de agregación) en los primeros años, consiste enteramente en personas que aprendieron sobre la innovación de fuentes externas de información, como la publicidad (John D. Sterman, 2007).

La retroalimentación positiva ocasionada por los efectos de la exposición social e imitación sobre la tasa de agregación, generalmente se interpreta como boca a boca o “Word of mouth - WOM” (John D. Sterman, 2007). A medida que la población de usuarios agregados crece, el grupo de usuarios potenciales disminuyen (Véase ciclo B1 en Ilustración 6).

Por otro lado, a mayor cantidad de usuarios contratando los servicios de empresas agregadoras, mayor expansión del efecto “WOM” y de la demanda de creación de empresas, la cual incentiva la promoción del modelo de negocio. Estos ciclos de refuerzo R1 y R2 (Véase Ilustración 6) aceleran la tasa de agregación.

A medida que las empresas agregadoras adquieren experiencia, los costos unitarios disminuyen, lo que ocasiona que la operación del agregador tenga un menor costo por producción total, formando el ciclo de refuerzo R3.

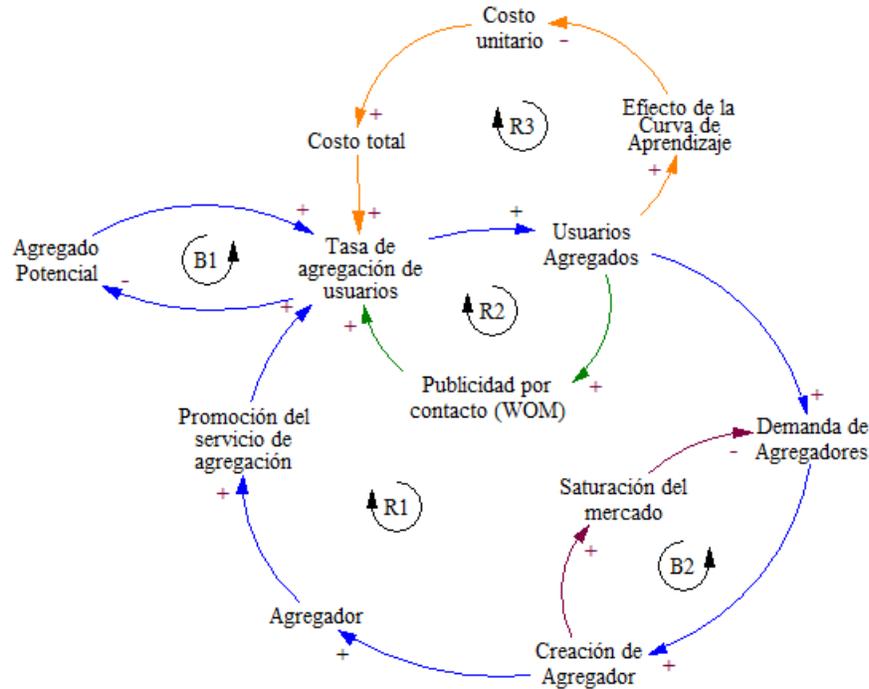


Ilustración 6: Diagrama causal propuesto
Fuente: Propia

El ciclo de balance B2 corresponde a la saturación del mercado, que aunque no es el objeto de este estudio, debe contemplarse para limitar el crecimiento de las empresas agregadoras, las cuales tienen el objetivo de manejar una carga importante de usuarios, lo que les permitiría posteriormente (y ante la regulación adecuada) aportar al sistema servicios como desconexión de carga, ofrecer precios de negociación con operadores de red e incluso ser agentes de servicios complementarios (Gomez M, Carvajal Quintero, & Arango Montoya, 2015). Mediante el diagrama causal planteado, se busca simular el efecto de la información sobre las decisiones de los usuarios y la creación de empresas agregadoras.

4.4.2. Diagrama de Flujos y Niveles

Para construir el diagrama de flujos y niveles, se parte de la estructura básica de difusión, en donde se asume que los clientes potenciales de una innovación pueden dividirse en innovadores o imitadores, y cuya tasa de agregación se ve afectada por su exposición a publicidad, comunicaciones externas, y recomendaciones de usuarios (Word of mouth).

La efectividad de esos medios en el sistema se representa con los parámetros p y q (Guidolin & Mortarino, 2010). En la Ilustración 7 puede verse la asociación de estos parámetros a la tasa de agregación de usuarios.

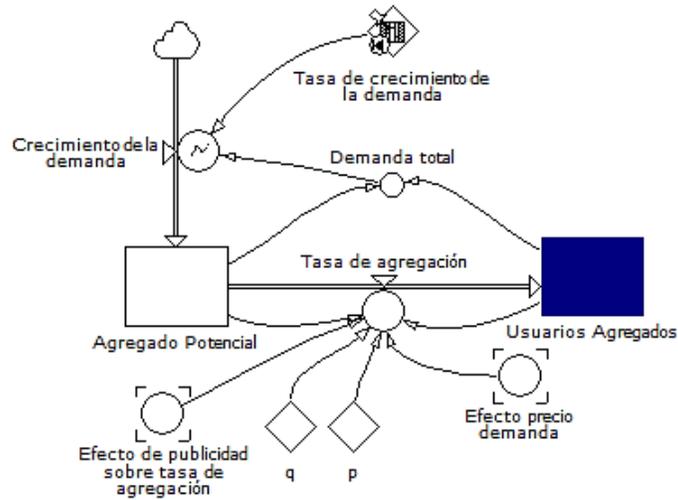


Ilustración 7: Ciclo central de difusión para Modelo de difusión aplicado a empresas Agregadoras
Fuente: Propia

El valor inicial de agregados potenciales, considerados en este estudio corresponde a la demanda de energía del Sistema Interconectado Nacional a 2019. Para dar mayor precisión sobre el crecimiento anual de la demanda, se calcula el porcentaje de aumento a partir de la proyección realizada por la Unidad de Planeación Minero Energética, sin diferenciar el tipo de usuario regulado del no regulado⁵. Estos resultados se presentan en la Tabla 3.

⁵ En Colombia, la regulación define como usuarios “No regulados” a los consumidores mayores de 55 MWh/mes, y se diferencian de los usuarios “Regulados” al poder negociar libremente la tarifa de suministro de electricidad con el comercializador de su elección.

Tabla 3: Proyección de la demanda de Energía Eléctrica en Colombia
Fuente: (UPME, 2019)

AÑO	ESC MEDIO (GWh)	Variación
2019	72,140	2,789%
2020	74,631	3,338%
2021	77,048	3,137%
2022	79,302	2,842%
2023	81,073	2,184%
2024	84,826	4,424%
2025	86,651	2,106%
2026	88,197	1,753%
2027	90,005	2,009%
2028	91,834	1,992%
2029	93,995	2,299%
2030	96,716	2,813%
2031	98,955	2,263%
2032	101,458	2,467%
2033	104,307	2,731%

Una vez establecidos los datos iniciales de usuarios agregados potenciales, se procede a formular los parámetros que afectan la decisión de contratar los servicios de una empresa agregadora. Se tiene en consideración que, los miembros de un sistema social tienen diferentes sensibilidades a depender de los medios de comunicación o canales interpersonales cuando se toma la decisión de adoptar una innovación. Estas comunicaciones pueden darse incluso mediante observaciones no verbales, y son las responsables de determinar en mayor o menor grado los valores de los parámetros nombrados como p y q en el modelo de Bass (Mahajan, Bass, & Muller, 1995).

Los parámetros p y q corresponden a la efectividad de la campaña y tasa de contacto respectivamente, las cuales son determinadas por la interacción de los usuarios agregados con los potenciales, que incentivan el uso de las nuevas tecnologías. La estimación de estos parámetros, puede darse por medio de técnicas econométricas cuando se dispone de información robusta en el tiempo (Stermann J. , 2000).

Debido a que no se encuentran disponibles estudios sobre los valores de p y q , específicamente aplicados a la aceptación de empresas agregadoras de energía, la selección de parámetros para este estudio se realiza a partir de revisión bibliográfica de distintas tecnologías aplicadas en el sector energía, recopilados por los autores Massiani & Gohs (Massiani & Gohs, 2015). Los valores elegidos para este estudio son $p= 0.003$ y $q= 0.025$, al ser valores usados en investigaciones de difusión aplicados a tecnologías tales como paneles fotovoltaicos.

La tasa de agregación sigue la formulación del modelo de Bass, en donde la aceleración con la cual los agregados potenciales pasan a ser usuarios agregados, se afecta con parámetros asociados a la disponibilidad de información, los efectos de publicidad y precios, lo cual se presenta en la Ecuación 1.

Ecuación 1- Tasa de agregación de usuarios

$$\text{Tasa de agregación de usuarios} = p * Ap + (q * Ap * (A/z)) * E_{\frac{p}{a}} * E_{pp}$$

Donde:

p = Efectividad de la campaña

q = Tasa de contacto

Ap = Agregado Potencial

z = Total de usuarios

A = Usuarios agregados

$E_{\frac{p}{a}}$ = Efecto del Precio sobre la tasa de agregación

E = Efecto de la publicidad sobre la tasa de agregación.

El aumento de usuarios agregados en el sistema, causa la necesidad de tener empresas agregadoras que puedan suplir los servicios que estos usuarios demandan. La tasa de creación de empresas, sin embargo, deberá mantener un balance entre las empresas necesarias en el sistema eléctrico y las constituidas.

Finalmente, se consideró que las empresas agregadoras establecidas, en su búsqueda de atraer más clientes, aumentan el efecto de la publicidad sobre la tasa de agregación, formando el ciclo de la Ilustración 8.

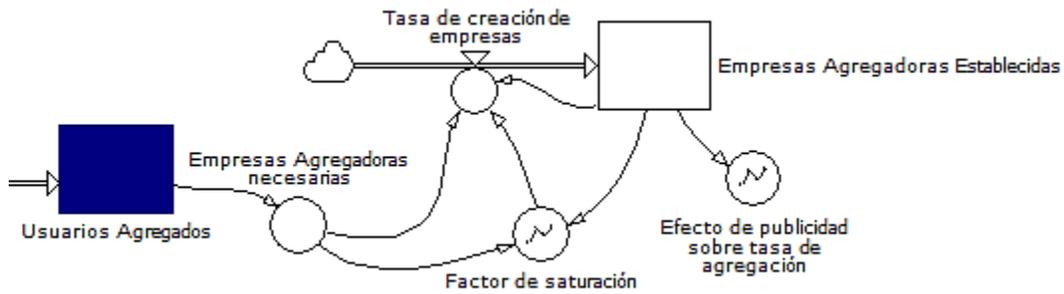


Ilustración 8: Ciclo de creación de empresas agregadoras
Fuente: Propia

Las primeras empresas agregadoras que surgen en el sistema, lo hacen mediante incentivos fundamentales o intrínsecos del modelo de negocio y no dependen de alguna regulación específica, sin embargo, su continuidad en el tiempo y los efectos sobre el sistema varían en la medida que cambien las condiciones técnicas o regulatorias. Con el tiempo, se conforman más empresas agregadoras que tienen origen en el valor emergente de la oportunidad, la cual aumenta en la medida de que se establezcan incentivos monetarios específicos y disminuyan las barreras de entrada al mercado (Burger & Chaves Avila, 2017). La creación de empresas en el sistema simulado se modeló a partir de la Ecuación 2.

Ecuación 2: Tasa de creación de empresas

$$\text{Tasa de creación de empresas} = (E_{aN} - E_a)/t$$

Donde:

E_{aN} = Empresas Agregadoras necesarias

E_a = Empresas Agregadoras establecidas⁶

t = Tiempo de creación de empresa

Las compañías agregadoras se distinguen por tener sistemas operativos y económicos con capacidad de manejo de carga, es decir, que sus usuarios representan cargas importantes para el sistema. Estas cargas pueden ser gestionadas o desconectadas según las necesidades del operador de red o del administrador del mercado (Banco Interamericano de desarrollo, 2012).

Debido a que las empresas agregadoras aumentan su relevancia en el mercado cuando tienen suficientes clientes para hacer gestión activa de la demanda, se incluye en el modelado, la variable “factor de saturación”, considerada en la Ilustración 8. Este indicador es importante debido a que permite cuantificar los efectos de la creación de empresa sobre la disponibilidad de la información.

⁶Se asume que $E_a(t_0) = 0$, considerando que en Colombia no están constituidos agregadores con manejo de carga para gestionar eventos en la red.

En cuanto a los precios, el modelo de Bass defiende que estos caen exponencialmente en el tiempo, para los nuevos productos (Mahajan, Bass, & Muller, 1995), por lo cual en este modelo, se considera que al aumentar el número de usuarios de empresas agregadoras y con ello la experiencia, el precio transado en GWh se ve afectado por los efectos de curva de aprendizaje (LCE), como se puede observar en la Ilustración 9.

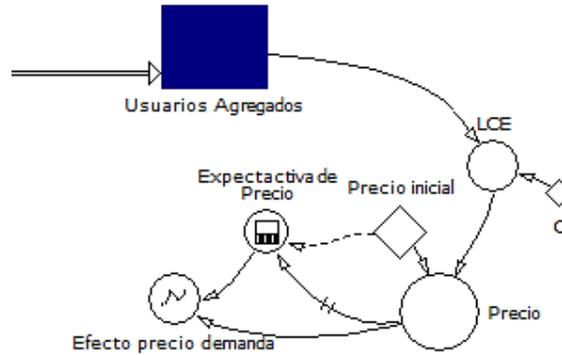


Ilustración 9: Ciclo de precios
Fuente: Propia

Para los agregadores, existen los costos de equipamiento en tecnologías que les permitan entregar bidireccionalmente al operador de red y a sus clientes, la información de precios o deslastre de carga, según lo requiera. Estos recursos, además, deben cumplir con las regulaciones y normativas de la red eléctrica, lo cual lleva a la inclusión de componentes fijos y variables en el precio.

Con el aumento de los costos fijos, es probable que el precio promedio de la provisión del servicio sea mayor que el costo marginal y, por lo tanto, menos atractiva para los usuarios. En la medida en que aumentan los usuarios será menor el impacto en la tarifa (Burger & Chaves Avila, 2017).

Cuando los precios ofrecidos por el agregador, son menores a los que esperan pagar los usuarios, actúa el “Efecto del precio sobre la demanda”, el cual influye en la aceleración de la tasa de agregación, definida por la Ecuación 1. Cuando se unen los tres ciclos referenciados en las ilustraciones 8, 9 y 10 se obtiene el diagrama de flujos y niveles propuesto para simular el sistema.

También se realizó la verificación de los datos de entrada para la construcción del modelo, para lo cual se consultaron fuentes fiables entre las que se encuentran reportes de la Unidad de Planeación Minero Energética, el Ministerio de Minas y Energía y XM que han sido mencionadas en la sección 4.4.

Es importante aclarar que, los procesos de validación en dinámica de sistemas siguen metodologías más estructuradas que permiten corroborar la validez del comportamiento, la estructura y la precisión de los parámetros utilizados (Barlas, 1996). Para el alcance de este trabajo, que es un acercamiento inicial a la difusión de agregadores en el sistema, no se realizan pruebas de sensibilidad y del comportamiento, sin embargo, se recomienda realizar este paso en estudios futuros, con el objetivo de dar mayor confiabilidad a los resultados.

5. PLANEACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de establecer escenarios de simulación, se tienen en consideración las experiencias internacionales sobre el agente agregador de demanda, en donde uno de los principales tópicos regulatorios para su implementación, es la decisión sobre si se regula o liberaliza la competencia de agregadores.

En la sección 3.2 de este documento, se describe cómo en algunos mercados se opta por dar las funciones del agregador de demanda al operador de red o comercializador, y en otros, por permitir la figura de agregador totalmente independiente de otros agentes del mercado.

El caso base de este estudio considera la libre creación de empresas agregadoras. En este escenario, la constitución de empresas solo se ve limitada por el llamado “factor de saturación”, que obedece al balance creado en el sistema por las empresas agregadoras necesarias y las constituidas.

Como escenario alternativo a simular, se plantea la política que da las funciones de la empresa agregadora a los operadores de red, limitando el número de empresas constituidas en el sistema. En Colombia, según los últimos datos del operador del mercado, se encuentran registrados 31 agentes como operadores de red (XM Filial de ISA, 2020).

Ante la implementación de esta política, la variable “Empresas Agregadoras Establecidas” tendría el comportamiento de una función del tipo escalón, debido a que, a partir de una fecha determinada, se crearían los agentes agregadores y en adelante existirían restricciones de libre creación de empresa para quienes no sean Operadores de Red. En este escenario, la creación de empresa ya no se promueve por la cantidad de usuarios que demanden el servicio, debido a que todas las empresas operadoras de red tendrían la obligación de cumplir las funciones de agregador.

6. RESULTADOS

Para este trabajo final de maestría se desarrolla la estructuración del problema, hipótesis dinámica y formulación inicial del modelo de difusión de agregadores, considerando un horizonte de tiempo de 10 años, y su consolidación es un modelo inicial que pretende identificar de forma preliminar cómo se comporta la difusión de las empresas agregadoras al controlar o liberar la creación de estas.

Una vez estructurados los escenarios de simulación descritos en la sección 5, se procede a graficar el comportamiento de las principales variables de estudio, con el objetivo de analizar las variaciones de los flujos y niveles con el tiempo y las diferencias en el comportamiento cuando se compara el caso base con el escenario de regulación propuesto.

En la Ilustración 11 se muestra la evolución del nivel correspondiente a creación de empresas para ambos escenarios de estudio. En esta figura puede observarse que el caso base no tiene restricción en la creación de empresa, por lo tanto, su consolidación corresponde a la respuesta de la oferta de empresas agregadoras para cubrir la demanda que se presenta en el sistema, debido a la tasa con la que los usuarios potenciales pasan a ser usuarios agregados.

Cuando se aplica la regulación en el sistema, la creación de empresas tiene el comportamiento de una función tipo escalón y permanece constante en el tiempo, debido a que en este se da la obligación a 31 agentes existentes en la estructura energética del país, en este caso los operadores de red, para que asuman las funciones del agregador y limitando la libre entrada al mercado para nuevas empresas.

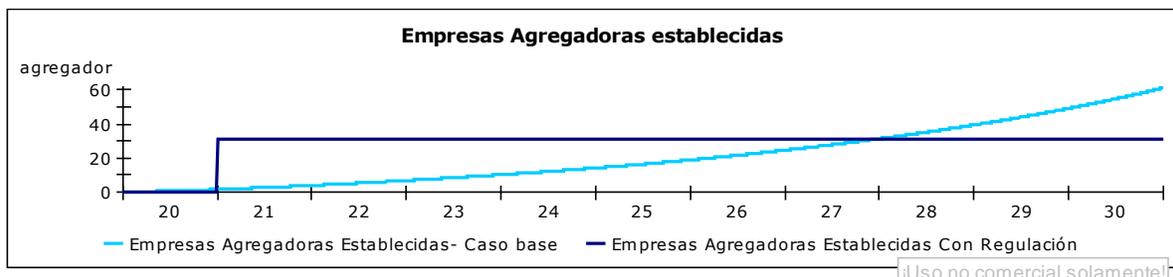


Ilustración 11: Empresas Agregadoras establecidas - Realizado en Powersim Studio

Fuente: Propia

El comportamiento de la creación de empresas durante los primeros años de simulación, muestra entonces que el número de empresas agregadoras en el caso base es menor que en el caso con regulación y partir del año 7 el número de empresas agregadoras en el caso base comienza a superar el caso con regulación.

Al finalizar el tiempo de simulación, en el caso base se obtienen 50% más empresas agregadoras que el caso con regulación, lo cual desencadena en el sistema diferencias en los flujos y niveles propuestos para el estudio de la difusión, como la tasa de agregación de usuarios que fue formulada a partir del modelo de Bass.

La Ilustración 12 muestra que la tasa de agregación durante los primeros 5 años de implementación en el caso base, es cercana a los 60 GWh/año. A partir de este año la tasa de agregación de usuarios que contratan los servicios del agregador de demanda crece más rápidamente hasta finalizar en 250 GWh/año.

En el escenario con regulación, la tasa de agregación de usuarios evoluciona a menor velocidad, en donde para el primer año de simulación, se tiene un valor de aproximadamente 65 GWh/año. Este resultado, en el año 10 alcanza el valor de 90 GWh/año, lo que representa un crecimiento del 38% en los 10 años de simulación. Con estos resultados, el caso base presenta una tasa de agregación de usuarios 2,7 veces superior al caso con regulación.

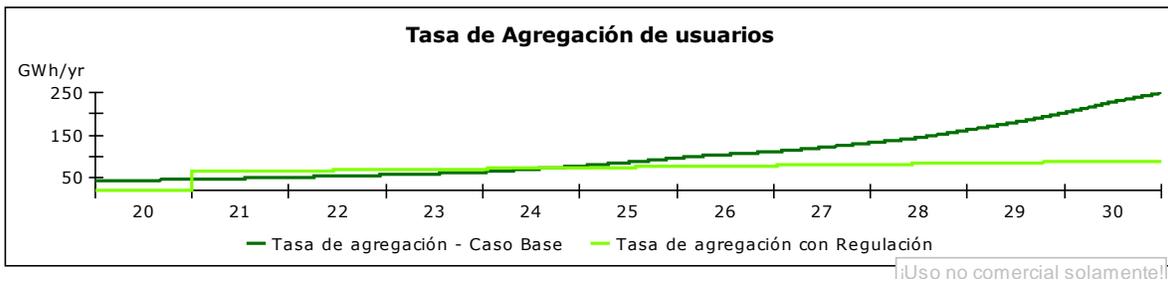


Ilustración 12: Evolución de la tasa de Agregación de usuarios - Realizado en Powersim Studio
Fuente: Propia

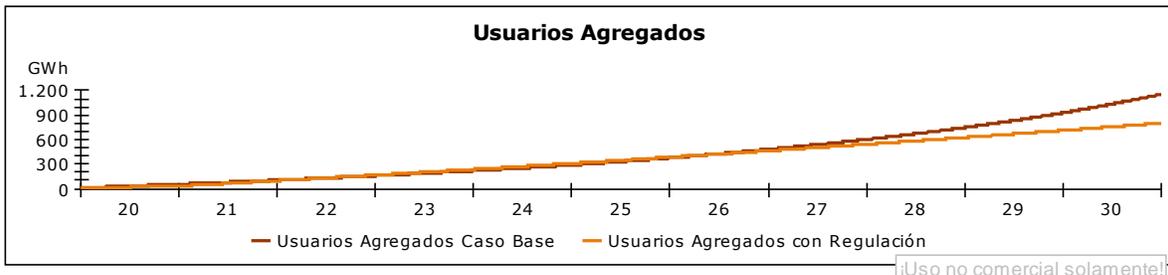


Ilustración 13: Evolución de los usuarios Agregados - Realizado en Powersim Studio
Fuente: Propia

Teniendo en consideración los resultados sobre la tasa de agregación de usuarios, se refleja que la cantidad de usuarios agregados es también mayor en el caso base, comparado con el caso con regulación, lo que se muestra en la Ilustración 13.

Las simulaciones para este caso muestran que, si bien al inicio de la operación tendrían mayor acogida por los usuarios, a largo plazo su efecto es menor comparado con el caso base y se tendría un menor número de usuarios agregados.

Desde el punto de vista de la difusión de información, los resultados muestran que a mayor número de empresas en el sistema eléctrico, se impulsa en mayor medida el efecto de la publicidad sobre la tasa de agregación. Esta situación ocasiona que existan mayor cantidad de usuarios agregados, lo cual acelera los efectos de la curva de aprendizaje (LCE) y con ello el efecto del precio sobre la tasa de agregación de usuarios.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta simulación muestran que mantener la libre creación de empresa favorece en mayor medida la contratación de los servicios de un agente agregador, con respecto a un escenario en el cual las funciones del agregador sean asumidas por una cantidad de empresas existentes en el sistema eléctrico y se limite la creación de nuevas empresas agregadoras.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo final de maestría se tuvo una aproximación inicial hacia la estructuración de un modelo de difusión que permitiera analizar el comportamiento dinámico de la creación de empresas agregadoras de energía en Colombia. Este modelo permitió evidenciar los efectos de los usuarios agregados sobre la creación de empresa, considerando que, de acuerdo al comportamiento de la oferta y la demanda, a medida que los usuarios potenciales pasan a ser usuarios agregados con mayor velocidad (mayor tasa de agregación) se aumenta la creación de empresas.

Para el análisis y consolidación del modelo, se utilizaron las bases de modelamiento de dinámica de sistemas que permitieron plantear la hipótesis dinámica de difusión de empresas agregadoras a partir de las bases del modelo de difusión propuesto por Frank M Bass, el cual describe la capacidad de un sistema de adoptar una nueva tecnología.

Al aumentar el número de usuarios de empresas agregadoras y con ello la experiencia, el precio transado se ve afectado por los efectos de la curva de aprendizaje. La reducción de precios se convierten en un incentivo para contratar los servicios de la empresa agregadora y afectan la velocidad de la tasa de agregación.

El aumento de usuarios agregados en el sistema, también causa la necesidad de tener mayor cantidad de empresas agregadoras que puedan suplir los servicios que estos usuarios demandan. Una vez constituidas, estas empresas generan publicidad sobre sus servicios, lo que se manifiesta en una cadena de comunicaciones que define la toma de decisiones con respecto a la adopción de los servicios de agregador.

De los casos de éxito estudiados a nivel internacional, se resalta la importancia de establecer políticas efectivas sobre el número de agregadores en el sistema, o bien, su adaptación a un agente existente en la cadena de energía. Por esta razón, se considera la libre creación de empresas como escenario base de simulación, y un escenario alternativo que regule la cantidad de agregadores, a partir de la obligación de que los operadores de red asuman sus funciones.

Para el caso base simulado, la creación de empresa responde al crecimiento de usuarios que demanden el servicio de agregación. En caso de que Colombia opte por una política de este tipo para la implementación de agregadores en el sistema, en términos de difusión, se tendrían mejores resultados al término de los 10 años simulados, dado que la competencia entre empresas agregadoras estimularía mayor competencia en los precios y mayor publicidad de los servicios. El resultado de estos efectos, es la aceleración en la tasa de agregación de usuarios.

Cuando la regulación favorece la libre creación de empresas agregadoras, la experiencia internacional recomienda estímulos de compensación para el operador de red o comercializador debido a que la inclusión del agregador en el mercado podría ocasionar diferencias en los consumos reales de los usuarios respecto a lo esperado por el operador de red.

Para el caso con regulación simulado, el papel del agregador es asignado a los operadores de red existentes en Colombia (31 en total) y se restringe la creación de nuevas empresas agregadoras. Las simulaciones para este caso muestran que, si bien al inicio de la operación tendrían mayor acogida por los usuarios, a largo plazo su efecto es menor comparado con el caso base y se tendría un menor número de usuarios agregados.

A pesar de que Colombia no cuente con el mencionado marco normativo requerido para incorporar la figura de agregador al mercado eléctrico, se considera que han entrado en vigencia regulaciones que facilitan e incentivan la eventual operación de una empresa agregadora. Entre esas regulaciones, se destaca el mecanismo de desconexión voluntaria de carga (DDV) y las Resoluciones del Ministerio de Minas y Energía 4 0072 de 2018 y 4 0483 de 2019 que establecen metas de implementación para medición avanzada.

Para la estructuración del mencionado marco normativo, los resultados de este estudio recomiendan que la creación de empresas sea libre, debido a que crea un ambiente más competitivo, en donde los efectos de los precios y de la publicidad aceleran la contratación de los servicios del agregador.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Banco Interamericano de desarrollo. (2012). *Guía A: Programas de financiamiento de eficiencia energética*. Washington.
- Bass, F. (1969). A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 215-227.
- Bass, F. (2005). Comments on "A New Product Growth for Model Consumer Durables". *Management Science*, 1833-1840.
- Behrangrad, M. (2015). A review of demand side management business models in the electricity market. *Renewable and Sustainability Energy*, 03-033.
- Benavides, J., & et al. (2018). *Mercado Eléctrico en Colombia: TRansición hacia una arquitectura descentralizada*. Bogotá DC: Cuadernos Fedesarrollo 68.
- BestRES. (2016). *Existing business models for renewable energy aggregators*.
- Bray, R., & Woodman, B. (2019). *Barriers to Independent Aggregators in Europe*.
- Burger, S., & Chaves Avila, J. (2017). A review of the value of aggregators in electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 395-405.
- Cadena, Á. I., & Muñoz Álvarez, D. (Septiembre de 2019). *Informe 2 de la Consultoría para definir el alcance de la Misión de transformación energética*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co>:
https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24126247/Informe+2_Mision+Transformacion+-+Espa%C3%B1ol.pdf
- California Public Utilities Commission. (2020). Obtenido de <https://leanenergyus.org/cc-by-state/massachusetts/>
- CREG. (2008). *Documento CREG 087*. Bogotá DC.
- CREG. (2011). *CREG 156 DE 2011*.
- CREG. (2013). *RESOLUCIÓN No. 203 DE 2013*.
- de Vries, L., & Poplavskaya, K. (2020). *Chapter 5 - Aggregators today and tomorrow: from intermediaries to local orchestrators?* Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819951-0.00005-0>
- Departamento Nacional de Planeación de Colombia. (2019). *Plan Nacional de desarrollo 2018 - 2022*. Bogotá.
- Dirección Nacional de Planeación. (2017). *Energy Demand Situation in Colombia*.

- Enel Green Power. (2019). Obtenido de <https://www.enelx.com/es/Historias/2017/08/enernoc-global-leader-in-smart-energy-management>
- EnerNoc. (2006). *Demand Response Solutions - Texas Public Utility Solutions*. Texas.
- ENTRA. (Octubre de 2019). <http://entra-coalicion.com>. Obtenido de <http://entra-coalicion.com>: <https://entra-coalicion.com/aprobacion-del-reglamento-y-la-directiva-de-mercado>
- Federal Energy Regulatory Commission. (2019). Assessment of Demand Response & Advanced Metering. 1689–1699.
- Flexitricity. (Octubre de 2019). <https://www.flexitricity.com/>. Obtenido de <https://www.flexitricity.com/about/company/>
- Forrester, J. W. (1971). Counterintuitive Behavior of social systems. *Theory and Decision* 2, 109-140.
- García, D. L. (2019). *Caracterización de un esquema remunerativo para la participación de la demanda en la prestación del servicio complementario de control de frecuencia en el mercado eléctrico colombiano*. Manizales, Colombia.
- Gomez M, J. S., Carvajal Quintero, S. X., & Arango Montoya, A. (2015). Programas de gestión de demanda de electricidad para el sector residencial en Colombia: Enfoque sistémico. *Energética*, 73-83.
- Grass, A. R., & Mach, T. (2019). *Foco 3, Fase I: Descentralización y digitalización de la industria y la gestión eficiente de la demanda*.
- Guidolin, M., & Mortarino, C. (2010). Cross-country diffusion of photovoltaic systems: *Technol. Forecast. Soc. Change* 77, 279-296. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2009.07>.
- John D. Sterman, R. H. (2007). Getting Big Too Fast: Strategic Dynamics with increasing returns and bounded Rationality. *Management Science* , 683-696.
- Lampropoulos, I., & et al. (2019). A framework for the provision of flexibility services at the transmission and distribution levels through aggregator companies. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.100187>
- LEAN Energy US. (2020). Obtenido de <https://leanenergyus.org/cca-by-state/massachusetts/>
- Littlechild, S. (2000). Why we need electricity retailers: a reply to Joskow on wholesale spot price pass-through. *Cambridge Working Papers in Economics*.
- Liu, K., & Et al. (2019). Optimal operation strategy for distributed battery aggregator providing energy and ancillary services. *Power Systems Clean Energy*. doi:<https://doi.org/10.1007/s40565-017-0325-9>

- Lund, P. (2006). Market Penetration rates of new energy technologies. *Energy Policy - Elsevier*, 3317-3326.
- Mahajan, V., Bass, F. M., & Muller, E. (1995). Difusion of new products: Empirical Generalizations and managerial uses. *Marketing Science*.
- Marques, A., & Fuinhas, J. (2018). *The Economics and Econometrics of the Energy-Growth Nexus*.
- Massiani, J., & Gohs, A. (2015). The choice of Bass model coefficients to forecast diffusion for innovate products: An empirical investigation for new automotive technologies. *Research in transportation economics* 50, 17-28.
- Mirakhorli, A., & Bing, D. (2018). Model predictive control for building loads connected with a residential distribution grid. *Applied Energy*, 627-642. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.051>
- National Grid ESO. (2020). Obtenido de <https://leanenergyus.org/cca-by-state/massachusetts/>
- Palensky, P., & Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 381-388.
- Public Utility Commission of Texas. (2020). Obtenido de <https://www.puc.texas.gov/industry/electric/business/agg/agg.aspx>
- Sánchez Jaramillo., H., & Pérez Romero, B. (2019). DESARROLLO CONCEPTUAL DE AGREGADORES DE ENERGÍA BAJO LA FIGURA DE VIRTUAL POWER PLANT. *Jornadas del conocimiento ISA 2019*. Medellín.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics* .
- Stoft, S. (2002). *Power System Economics*. JOHN WILEY & SONS, INC.
- Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges. *Energy Policy* 36, 4419-4426.
- Unión Europea. (5 de Junio de 2019). REGLAMENTO (UE) 2019/943 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. *Diario Oficial de la Unión Europea* .
- UPME. (2019). *Plan de expansión en generación para Plantas Alpha y Beta*. Bogotá DC.
- UPME. (2019). *Proyección de la demanda de energía Eléctrica y potencia máxima en Colombia*. Bogotá.
- US Department of energy. (2006). *Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them*. Washington DC.

Verrier, A. (2018). The economic potential of Demand Response in liberalised electricity markets – A quantitative assessment for the French power system. *Economics and Finance*.

Vieira de Carvalho, A., & Rojas, L. N. (2016). Guía F: El modelo de negocio ESCO y los contratos de servicios energéticos por desempeño. *Serie de eficiencia energética - Banco Interamericano de desarrollo*.

World Bank. (2016). Fostering the Development of ESCO Markets for Energy . *World Bank Live Wire series*.

XM. (Noviembre de 2019). Obtenido de <http://www.xm.com.co/Paginas/Generacion/Demanda-desconectable-voluntaria.aspx?RootFolder=%2Fdemandadesconectablevoluntaria%2F2019%2D11&FolderCTID=0x012000BAB42CE34D2E384AB45D602B74B096C4&View={91531B8D-B584-4F0C-BA52-6C277DEA0C36}>

XM Filial de ISA. (2018). *Primera capacitación para agentes del mercado*. Medellín, Antioquia.

XM filial de ISA. (Noviembre de 2019). Obtenido de <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx>

XM Filial de ISA. (20 de 01 de 2020). Obtenido de <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/Agentes-del-mercado.aspx>