

**SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA
A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE
NO CONVENCIONAL**



**Subastas bilaterales combinatorias: una aplicación en Colombia a la asignación de
proyectos de generación de energía renovable no convencional**

Álvaro Ignacio Moreno Bustamante

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Economía

Tutor

Jorge Hugo Barrientos Marín. Doctor (PhD) en Economía

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Maestría en Economía
Medellín, Antioquia, Colombia
2025

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Cita	(Moreno Bustamante, 2025)
Referencia	Moreno Bustamante. (2025). <i>Las subastas, las bilaterales combinatorias y su aplicación en Colombia a la asignación de proyectos de generación de energía renovable no convencional</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Seleccione posgrado UdeA (A-Z), Cohorte Seleccione cohorte posgrado.

Grupo de Investigación Seleccione grupo de investigación UdeA (A-Z).

Seleccione centro de investigación UdeA (A-Z).



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jair Albeiro Osorio Agudelo.

Jefe departamento: Ramón Javier Mesa Callejas.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. El autor asume la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

**SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA
A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE
NO CONVENCIONAL**

Dedicatoria

A mi familia

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Contenido

Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1. Introducción	13
1.2. Experiencias de implementación del mecanismo de subastas	14
1.3. Definición del problema.....	15
1.4. Objetivos	16
1.5. Contribución.....	16
1.6. Pregunta de investigación.....	17
1.7. Enfoque metodológico	17
1.7.1 Tipo de investigación.....	17
1.7.2 Fuentes de datos.....	18
1.7.3 Fases de la Investigación	18
1.7.4 Análisis Descriptivo de las Subastas en Colombia.....	18
1.7.5 Modelamiento Matemático (WDP - Winner Determination Problem).....	18
1.7.6 Simulación y Recomendaciones	19
1.7.7 Coherencia con el Marco Teórico.....	19
1.7.8 Criterios de Recolección de Información y Unidades de Análisis	19
1.7.9 Unidades de Análisis.....	20
1.8. Estructura del trabajo	21
Capítulo 2. Marco teórico.....	22
2.1. Subasta	22
2.2. Mecanismo	22
2.3. Mecanismos combinatorios.....	23

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

2.4. Clasificación de las subastas y/o de los mecanismos	23
2.5. Trabajos y problemas iniciales de las subastas	23
2.6. El modelo básico de equilibrio	24
2.7. Otros trabajos en torno al modelo básico y sobre los supuestos	27
2.7.1 De la aversión al riesgo	27
2.7.2 Sobre la información	27
2.7.3 Simetrías de participantes	28
2.7.4 Costos de entrada y número de postores	29
2.7.5 Número desconocido de postores	30
2.7.6 Diseño de los mecanismos y eficiencia	30
2.8. Subastas dobles (DA)	31
2.8.1 Elementos preliminares de una DA	31
2.8.2 Las DA únicas, la secuencial y las continuas	32
2.8.3 DA con un comprador, un vendedor, y un artículo (singleton)	32
2.8.4 DA secuencial y continua	33
2.9. Subastas dobles múltiples y combinatorias	33
2.10. Árboles de decisión, redes neuronales; machine learning e inteligencia artificial en subastas dobles combinatorias	38
2.11. Aplicación de las subastas dobles al mercado energético	39
2.12. Reglas usuales de pago para el sector energético	40
2.13. El sector energético en Colombia y las fuentes renovables no convencionales	42
2.14. Subastas de energía no renovable en Colombia	43
Capítulo 3. Mecanismos	45
3.2.1 Definición formal	46
3.3.1. Eficiencia ex post	47

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

3.3.2.	SCF no dictatorial.....	47
3.3.3.	Compatibilidad de incentivos (IC)	47
3.4.1.	El principio de revelación para el equilibrio de la estrategia dominante	49
3.4.2.	El Principio de revelación del equilibrio Bayesiano-Nash	49
Capítulo 4. Subastas Combinatorias.....		52
4.1.	Subastas Combinatorias (CA)	52
4.6.	Enfoques de fijación de precios por paquetes	59
4.7.	Formulación del problema	60
4.8.	Aplicación de la relajación lagrangiana al WDP	61
4.9.	Formulación del problema de relajación lagrangiana	62
Capítulo 5. Las Subastas de Energía Renovables, caso Colombia.....		64
5.1.	Subastas de dos puntas combinatorias en el contexto energético colombiano.....	64
5.2.	El diseño de subastas en Colombia	65
5.3.	Formulación matemática de la segunda subasta para FNCER en Colombia	65
5.4.	Descripción de la subasta para FNCER en Colombia.....	67
5.4.1.	Objeto de la subasta	67
5.4.2.	Algunos elementos relevantes, tomados de los pliegos de condiciones	67
5.5.	Modelo para la Subasta Combinatoria (phyton-pyomo CBC).....	74
5.5.1.	Formulación matemática.....	74
5.5.2.	Análisis de Resultados: Subastas Combinatorias de FNCER en Colombia	77
Capítulo 6. Conclusiones.....		79
Capítulo 7. Recomendaciones		82
Referencias		84

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Siglas, acrónimos y abreviaturas

Iniciales	Inglés	Español
AE	Allocative Efficiency	Eficiencia Asignativa
b_i	An offer profile = (b_1, \dots, b_n)	Un perfil de ofertas = (b_1, \dots, b_n)
b_i	Agent offer i	Una oferta del agente i
b_{-i}	A profile of offers from different agents of $i = (b_1, b_{i-1}, b_{i+1}, \dots, b_n)$	Un perfil de ofertas de agentes distintos de $i = (b_1, b_{i-1}, b_{i+1}, \dots, b_n)$
$b(K)K^\circ$	Highest element in $(b_1, \dots, b_n)(b_{-i})$	Elemento más alto en $(b_1, \dots, b_n)(b_{-i})$
BB	Balanced Budget balance	Saldo de presupuesto balanceado
BIC	Bayesian Incentive Compatibility	Compatibilidad de incentivos bayesianos
BGP	Offer Generation Problem	Problema de Generación de Ofertas
CA	Combinatorial Auctions	Subastas Combinatorias
CAP	Combinatorial assignment problem	Problema de asignación combinatoria
CDA	Combinatorial double auctions	Subastas dobles combinatorias
DA	Double auctions	Subastas dobles
DRM	Direct Revelation Mechanism	Mecanismo de Revelación Directa
DSIC	Dominant Strategy Incentive Compatible	Compatible con incentivos de estrategia dominante o Compatibilidad de incentivos de estrategia dominante
EBN	Equilibrium de Bayes Nash	Equilibrio de Bayes Nash
F	Set of Social Choice Functions	Conjunto de funciones de elección social.
$f(\cdot)$	A social choice function	Una función de elección social
FNCER	Non-Conventional Renewable Energy Sources	Fuentes de Energía Renovables No Convencionales
$g(\cdot)$	Result rule of an indirect mechanism	Regla de resultado de un mecanismo indirecto
IC	Incentive Compatibility	Compatibilidad de incentivos
IR	Rational Individuals	Individuos Racionales
IIR	Interim Individually Rational	Interino Individualmente Racional
K	Project Option Set	Conjunto de opciones de proyecto
k	A particular Project $k \in K$	Una elección de proyecto particular, $k \in K$
$b(K)K^\circ$	highest element $(b_1, \dots, b_{i-1}, b_{i+1}, \dots, b_n)$	Elemento más alto en $(b_1, \dots, b_{i-1}, b_{i+1}, \dots, b_n)$
LP	Linear Programming	Programación Lineal
M	Indirect Mechanism	Mecanismo Indirecto
N	Number of agents	Número de agentes
N	Agent Set: $\{1, 2, \dots, n\}$	Conjunto de agentes: $\{1, 2, \dots, n\}$
OR	OR offers	Ofertas OR
PAB	Pay As Bid	Pagar lo ofertado
PEP	Preferences Elicitation problem	Problema de la obtención de preferencias
P2P	Person to Person	Persona a Persona
θ_i	Agent Type	Tipo del Agente i
θ	Profile Type Set = $(\theta_1 \times \dots \times \theta_n)$	Conjunto de tipos de perfil = $(\theta_1 \times \dots \times \theta_n)$

**SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA
A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE
NO CONVENCIONAL**

θ_{-i}	Profile of agent types other than $i = (\theta_1 \times \dots \times \theta_{i-1} \times \theta_{i+1} \times \dots \times \theta_n)$	Perfil de tipos de agentes distintos de $i = (\theta_1 \times \dots \times \theta_{i-1} \times \theta_{i+1} \times \dots \times \theta_n)$
$\Phi_i(\cdot)$	Cumulative distribution function (CDF) en θ_i	Función de distribución acumulativa (CDF) en θ_i
$\varphi_i(\cdot)$	Probability density function (PDF) in θ_i	Función de densidad de probabilidad (PDF) en θ_i
$\Phi_i(\cdot)$	CDF in θ	CDF en θ
$\varphi_i(\cdot)$	PDF in θ	Un PDF sobre θ
S_i	Set of actions available to agent i in an indirect mechanism	Conjunto de acciones disponibles para el agente i en un mecanismo indirecto
S	Set of all action profiles = $S_1 \times \dots \times S_n$	Conjunto de todos los perfiles de acción = $S_1 \times \dots \times S_n$
$s(\cdot)$	Strategy profile	Perfil de estrategias = $[s_1(\cdot), \dots, s_n(\cdot)]$
SBB	Strong Budget Balance.	Fuerte Equilibrio Presupuestario
SCF	Social Choice Function	Función de elección social
$s_i(\cdot)$	Agent Strategy	Estrategia del Agente i
t_i o p_i	Monetary transfer to agent i	Transferencia monetaria al agente i
$u_i(\cdot)$	Utility function of agent i	Función de utilidad del agente i
UP	Uniform Prices	Precios Uniformes
VCG	Vickrey-Clarke-Groves mechanisms	Mecanismos Vickrey-Clarke-Groves
$v_i(\cdot)$	Agent i valuation function	Función de valoración del agente i
$W(\cdot)$	Social Welfare Function	Función de Bienestar Social
WDP	Winner Determination Problem	Problema de determinación del ganador
X	Result Set	Conjunto de Resultados
X	Particular Result	Resultado Particular, $x \in X$
Xf	Feasible Results Set	Conjunto de Resultados Factibles
XOR	XOR Offers	Ofertas XOR
θ	Real Types Profile = $(\theta_1, \dots, \theta_n)$	Perfil de Tipos Reales = $(\theta_1, \dots, \theta_n)$
θ_{-i}	Profile of real types of agents other than $i = (\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \dots, \theta_n)$	Perfil de Tipos Reales de Agentes Distintos de $i = (\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_{i+1}, \dots, \theta_n)$
$\hat{\theta}_i$	Type of reported agent i , $\hat{\theta}_{y_0} \in \theta_i$	Tipo del Agente Reportado i , $\hat{\theta}_{y_0} \in \theta_i$
$\hat{\theta}$	Profile of reported types = $(\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n)$	Perfil de Tipos Reportados = $(\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n)$
$\hat{\theta}_{-i}$	Profile of Types of Reported Agents Other than $i = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{\theta}_{y_0+1}, \dots, \hat{\theta}_n)$	Perfil de Tipos de Agentes Reportados Distintos de $i = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{\theta}_{y_0+1}, \dots, \hat{\theta}_n)$

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Resumen

Este trabajo evalúa la eficiencia de las subastas combinatorias bilaterales como mecanismo para asignar proyectos de generación mediante fuentes no convencional de energía renovable (FNCER) en Colombia. Las subastas combinatorias son la frontera de la teoría de las subastas hoy en día, y en este documento presento una aproximación al estudio de este campo desde una perspectiva interdisciplinaria que combina temas de economía, teoría algorítmica de juegos, investigación de operaciones (optimización) y la informática.

Combina un marco teórico interdisciplinar con un análisis empírico de las tres subastas realizadas entre 2019 y 2021, identificando sus limitaciones en términos de precios, cantidades adjudicadas y cumplimiento de metas. Metodológicamente, adopta un enfoque mixto:

Análisis cuantitativo de datos oficiales (precios, energía asignada, participantes) de las subastas CLPE 02-2019 y CLPE 03-2021.

Modelamiento matemático mediante programación lineal entera mixta (MILP) para resolver el problema de determinación del ganador (WDP), implementado en Python/Pyomo.

Evaluación cualitativa del diseño regulatorio, en virtud de lo estipulado en el Decreto 2143 de 2015 que establecía deducción del 50% del valor invertido en proyectos FNCER a un plazo de amortización: 5 años, modificado por la Ley 2099 de 2021 (Art. 8): amplía el beneficio a 15 años

Los resultados revelan ineficiencias: precios superiores a los del mercado mayorista (16–75 % más altos), baja asignación de energía (46–84 % de la demanda objetivo) y distorsiones por el mecanismo complementario obligatorio. Como contribución, se propone un modelo optimizado para futuras subastas y se recomienda ajustar los topes de precios, reorientar subsidios hacia la demanda y evitar asignaciones forzosas que afectan la competencia.

El estudio concluye que, aunque las subastas combinatorias son herramientas promisorias para la transición energética, su diseño actual en Colombia requiere reformas para garantizar eficiencia y sostenibilidad. Los hallazgos aportan insumos para políticas públicas y futuras investigaciones sobre mercados eléctricos renovables.

Finalmente señalo que el futuro del mercado secundario de energía renovable entre pares está fundamentado en el desarrollo e implementación de la red inteligente de distribución de

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

energía, una plataforma común, utilización de subastas combinatorias y el empleo de algoritmos de aprendizaje automático para la comercialización de esta energía.

Palabras clave: subastas bilaterales combinatorias, proyectos de generación de energía renovable no convencional, Colombia.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Abstract

This work evaluates the efficiency of bilateral combinatorial auctions as a mechanism for allocating non-conventional renewable energy (NCRE) generation projects in Colombia. Combinatorial auctions represent the cutting edge of auction theory today. This paper presents an approach to studying this field from an interdisciplinary perspective, combining economics, algorithmic game theory, operations research (optimization), and computer science.

It combines an interdisciplinary theoretical framework with an empirical analysis of the three auctions conducted between 2019 and 2021, identifying their limitations in terms of prices, allocated quantities, and goal attainment. Methodologically, it adopts a mixed-methods approach:

Quantitative analysis of official data (prices, allocated energy, participants) from the CLPE 02-2019 and CLPE 03-2021 auctions.

Mathematical modeling using Mixed-Integer Linear Programming (MILP) to solve the Winner Determination Problem (WDP), implemented in Python/Pyomo.

Qualitative evaluation of the regulatory design, based on the provisions of Decree 2143 of 2015 (which established a 50% deduction on the value invested in NCRE projects with a 5-year amortization period) and its modification by Law 2099 of 2021 (Article 8), which extended the benefit to 15 years.

The results reveal significant inefficiencies: prices higher than those in the wholesale market (16–75% more expensive), low energy allocation (meeting only 46–84% of the target demand), and distortions caused by a mandatory complementary mechanism. As a contribution, the study proposes an optimized model for future auctions and recommends adjusting price caps, reorienting subsidies towards demand, and avoiding forced allocations that hinder competition.

The study concludes that while combinatorial auctions are a promising tool for the energy transition, their current design in Colombia requires reforms to ensure efficiency and sustainability. The findings provide valuable inputs for public policy and future research on renewable electricity markets.

Finally, the paper notes that the future of a peer-to-peer secondary renewable energy market is founded on the development and implementation of the smart energy distribution grid, a common

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

platform, the use of combinatorial auctions, and the application of machine learning algorithms for trading this energy.

Keywords: Combinatorial bilateral auctions, non-conventional renewable energy generation projects, Colombia.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

Una subasta es un instrumento de mercado que cuenta con un conjunto explícito de criterios definidos por el subastador, mediante los cuales se determina la asignación de recursos y los precios de estos, en función de las ofertas presentadas por los participantes. Por lo general una subasta tiene lugar cuando no existen las condiciones de un mercado conformado para la asignación de los bienes en cuestión.

Tal como señala Krishna (2009), una parte importante de la teoría y del diseño de subastas se preocupa por implementar mecanismos óptimos, esto es, subastas que maximicen el ingreso esperado del subastador. Una segunda tendencia se preocupa por el diseño de mecanismos eficientes, siendo su propósito, la maximización del beneficio social.

En este contexto, los dos objetivos principales tienen sentido y han sido ampliamente estudiados en la literatura: maximizar los ingresos del vendedor (el comprador en una bajasta) y lograr la eficiencia en la asignación, es decir, que el o los objetos o cantidades asignadas, terminen asignados a aquellos que generen más valor para la sociedad.

En este documento hago énfasis en subastas dobles, mediante la formulación de mecanismos combinatorios; para dicho ejercicio se han realizado estudios de investigación centrados en modelos de optimización, algoritmos eficientes para la determinación del ganador (es), la prueba de la existencia del equilibrio y de la eficiencia económica entre otros temas.

Investigo también, la práctica de las subastas dobles combinatorias en el mercado de energía en Colombia y en su aplicación en la asignación de energía proveniente de Fuentes Renovables No Convencionales (FNCER).

Resalto que la tendencia global es hacia la red inteligente de distribución de energía que combina la comunicación de información bidireccional y el flujo de energía, lo que permite a los

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

consumidores, cogeneradores y auto proveedores, convertirse en participantes activos en las estrategias de oferta y demanda de energía, basadas en fuentes no convencionales, para colocarla en un mercado. En este mercado, el paradigma de comercialización de energía entre pares (P2P por sus iniciales en inglés, Person to Person) permitiría a las comunidades locales y a las personas que generan electricidad, decidir libremente cómo y con quién la van a comercializar, mediante el mecanismo de subastas dobles combinatorias (CDA).

El estado del arte muestra que para la implementación de un mercado P2P, se requiere de una plataforma común compartida por los agentes, y la utilización de algoritmos de aprendizaje automático para el aprendizaje en línea, dado que es una técnica para aprender a partir de flujos continuos de datos; esto contrasta con el aprendizaje automático habitual, consistente en algoritmos donde se entrena con un conjunto de datos específicos, y luego se alimenta el modelo con nuevos datos. Este tipo de aprendizaje permite modelar las reglas de una subasta como una red neuronal que encaja adecuadamente con entornos de subastas continuas, siendo este el caso de un mercado energético P2P, donde las ofertas, demandas y precios cambian en tiempo real o con frecuencias cortas, del tipo *franja horarias*.

La industria eléctrica en la actualidad ha sido considerada como un monopolio natural en cuanto a transmisión y distribución sujeto a una fuerte regulación por parte del Estado, pero en competencia en generación y comercialización; en este contexto, las decisiones de expansión de la red de transmisión y distribución son tomadas de forma centralizada por las entidades estatales correspondientes. La expansión en generación se da por mecanismos de mercado tomando señales del precio de generación en los contratos de largo plazo, en bolsa o acudiendo a la remuneración por firmeza.

1.2. Experiencias de implementación del mecanismo de subastas

Los programas de participación competitiva mediante las subastas se han venido convirtiendo en el método de contratación dominante a nivel mundial y en especial para el despliegue de las nuevas energías renovables. Particularmente, en Colombia se emplean como una estrategia para fomentar la competencia entre postores, para apalancar la inversión en proyectos de expansión, y también en el contexto de promoción de la transición energética, mediante la

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

diversificación de la matriz, con nuevos proyectos de energía renovable y propender por racionalizar los márgenes de ganancia de los agentes a lo largo de la cadena de valor.

Colombia es un país que se distingue por poseer una matriz energética mayoritariamente basada en la generación de recursos hídricos de tipo filo de agua, llegando hasta un 63,6% para junio de 2024 en la canasta de generación. El resto de la matriz energética se compone del 30,1% de generación termoeléctrica, el 6,1% de generación solar y eólica, y el 0,2% de generación a partir de bagazo de caña. Esto señala una escasa diversificación en la matriz energética, lo que resulta en problemas en épocas del año donde se produce una falta de agua debido a la reducción de las precipitaciones, impactando de manera significativa los flujos de los ríos y las reservas de los embalses

Por lo anterior, se han implementado una serie de políticas orientadas a la transición energética, con el objetivo de diversificar la matriz energética y aumentar la resiliencia del sistema eléctrico de Colombia. A través de la Ley 1715 de 2014 y en diversos Planes Nacionales de Desarrollo, se implementaron incentivos para proyectos de producción de energías renovables no tradicionales. Estos incluyen la exención de impuestos arancelarios, a través de la deducción del 50% en el costo de las inversiones a presentar en el impuesto de renta durante quince (15) años. Este último punto fue incluido a través del Decreto 2143 de 2015.

La Ley 1715 también promueve la generación autónoma y la generación distribuida, con el objetivo de reducir la huella de carbono y mitigar la saturación de las redes eléctricas. Adicionalmente, se determinó que entre el 8% y el 10% de las adquisiciones efectuadas por los vendedores del Mercado de Energía Mayorista, deben llevarse a cabo a través de acuerdos de energía a largo plazo, con instalaciones de producción de FNCER.

1.3. Definición del problema

En Colombia se han realizado tres (3) subastas de FNCER, con resultados mixtos: en la primera, desarrollada en febrero de 2019, no se adjudicaron contratos porque no se cumplieron los criterios de competencia; en la segunda, desarrollada en octubre del mismo 2019, se modificaron varios de los criterios de selección y se adjudicaron algunos contratos para proyectos solares y eólicos, lo que requirió un proceso complementario secuencial; en la tercera, llevada a cabo en el 2021, solo se adjudicaron proyectos solares y mayoritariamente se requirió de la segunda ronda,

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

con contratos en cantidades inferiores a la meta esperada, y los precios fueron 16% superiores a los adjudicados en 2019 y entre un 40% y 75% superiores a los del mercado, tanto para el Spot (la Bolsa), como para los contratos de largo plazo. Por todo esto, surge la necesidad de evaluar el mecanismo y su aplicación en Colombia.

1.4. Objetivos

Este trabajo de investigación tiene por objetivo principal la evaluación del desarrollo de la herramienta de subastas dobles desde el enfoque de mecanismos combinatorios y su aplicación en el mercado de energía renovable en Colombia. Todo esto, con el fin de identificar los componentes, elementos, supuestos y restricciones, o su relajación, aplicados en las subastas para la asignación de proyectos de FNCER. Como objetivos complementarios se busca: en primer lugar, la evaluación de la aplicación de las subastas combinatorias en la asignación de energía proveniente de FNCER en Colombia; en segundo lugar, la implementación de un modelo matemático para la solución de subastas dobles combinatorias, que permita ser aplicado a la comercialización de energía FNCER.

1.5. Contribución

La contribución de este estudio se concentra en dos aspectos: i) hasta donde se pudo investigar, es el primer trabajo que evalúa la efectividad de la subasta de dos puntas para asignación de energía FNCER, concretamente evalúa el desarrollo del mecanismo de subastas y sus aplicaciones en Colombia, con énfasis en las combinatorias de dos puntas, a través de un análisis de los diferentes trabajos teóricos y prácticos en subastas, fundamentalmente con el enfoque de mecanismos, de los incentivos y las restricciones, de modo que permita identificar y aplicar señales de eficiencia (eficacia, entendida aquí como la cantidad de objetos adjudicados); ii) sería también el primer documento que usa un modelo matemático tipo, que permita a futuro ser aplicado a proyectos de generación y para la comercialización de energía FNCER, dado que la mayoría de los estudios se centran en las *subastas de una sola cara*, y solo unos pocos autores tratan el tema del mecanismo de *subasta combinatorias de dos puntas* para el mercado de la electricidad en Colombia.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

El documento “Subastas, las bilaterales combinatorias: una aplicación en Colombia a la asignación de proyectos de generación de energía renovable no convencional” contribuye al estudio de las subastas al abordar un enfoque interdisciplinario que combina economía, teoría de juegos algorítmicos, investigación de operaciones e informática. Su principal aporte radica en la evaluación de las subastas combinatorias bilaterales en el contexto del mercado energético colombiano, específicamente para la asignación de proyectos FNCER.

Además, el trabajo propone un modelo matemático basado en programación lineal para resolver el problema de determinación del ganador (WDP), aplicable a mercados secundarios de energía P2P. También analiza críticamente los resultados mixtos de las subastas realizadas en Colombia, identificando ineficiencias en los precios y la asignación, y ofrece recomendaciones para mejorar el diseño de estos mecanismos, como la revisión de los topes de precios y los subsidios.

En resumen, el estudio enriquece la literatura al proporcionar un marco teórico-práctico para el diseño de subastas combinatorias en el sector energético, destacando tanto sus potencialidades como sus desafíos en un contexto real. A continuación, se presentan las contribuciones del documento detallado por capítulo .

1.6. Pregunta de investigación

Me pregunto por la eficiencia (eficacia) de las recientes subastas de proyectos de energía renovables en Colombia, como instrumentos que promueven la transición energética hacia una matriz con mayor participación de renovables, y como ruta para facilitar la creación de un mercado secundario de energía renovable P2P en Colombia.

1.7. Enfoque metodológico

1.7.1 Tipo de investigación

- Cualitativa-cuantitativa, ya que combina revisión teórica, análisis de datos empíricos y modelamiento matemático.
- Descriptiva y analítica, evalúa el desempeño de las subastas en Colombia.
- Aplicada, al proponer un modelo de optimización para futuras subastas y que pueda ser empleado en el mercado P2P.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

1.7.2 Fuentes de datos

Datos primarios:

- Resultados oficiales de las subastas para FNCER en Colombia (2019, 2021).
- Documentos regulatorios (Decretos Ministerio de Minas y Energía (MME), resoluciones Comisión de Regulación Energía y Gas (CREG), informes de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)).

Datos secundarios:

- Literatura académica sobre subastas combinatorias, teoría de mecanismos y mercados energéticos.
- Informes de auditoría (Deloitte) sobre las subastas colombianas.

1.7.3 Fases de la Investigación

Revisión Teórica y Marco Conceptual

- Análisis de la teoría de subastas combinatorias y su aplicación en mercados energéticos.
- Revisión de modelos similares en diferentes industrias.
- Estudio del marco regulatorio colombiano (Ley 1715 de 2014, Decreto 0570 de 2018, resoluciones CREG).

1.7.4 Análisis Descriptivo de las Subastas en Colombia

- Comparación de resultados entre las tres subastas (energía adjudicada, precios, participación).
- Evaluación de eficiencia: en términos de si se ¿Se alcanzaron las metas de contratación?; ¿Los precios fueron competitivos frente al mercado mayorista?; ¿Hubo distorsiones por el mecanismo complementario?

1.7.5 Modelamiento Matemático (WDP - Winner Determination Problem)

- Formulación del problema: Programación lineal entera mixta (MILP) para maximizar el beneficio social.
- Variables:
 - Asignación de energía por bloques horarios.
 - Precios de oferta (compradores y vendedores).
 - Restricciones de dependencia/exclusividad entre ofertas.
- Implementación: Uso de Python + Pyomo + solver CBC.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Validación: Comparación con resultados reales de las subastas (Auditoría Deloitte).

1.7.6 Simulación y Recomendaciones

- Propuestas de ajustes regulatorios:
 - Revisión de topes de precios (Price Cap) basados en el mercado spot.
 - Rediseño del mecanismo complementario para evitar distorsiones.
 - Incentivos alternativos (subsidios a la demanda en lugar de a la oferta).

1.7.7 Coherencia con el Marco Teórico

- El diseño se alinea con la teoría de mecanismos de subastas (Vickrey-Clarke-Groves, equilibrio Bayesiano-Nash).
- Incorpora elementos de economía energética y regulación de mercados eléctricos.
- La metodología cuantitativa (optimización) responde a la necesidad de resolver el WDP, un problema central en subastas combinatorias.

1.7.8 Criterios de Recolección de Información y Unidades de Análisis

Para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados, este estudio adopta un enfoque metodológico mixto (cualitativo-cuantitativo), con criterios claramente definidos para la recolección de información y la selección de las unidades de análisis.

1.7.8.1 Criterios de Recolección de Información.

La información se obtiene de fuentes primarias y secundarias, bajo los siguientes criterios:

- Fuentes Primarias:
 - Datos oficiales de subastas: Se analizan los resultados publicados por el MME, la UPME y la CREG, incluyendo informes de adjudicación, precios de cierre y actas de las subastas CLPE 2019 y 2021.
 - Documentos regulatorios: Se revisan decretos, resoluciones y normativas (Ley 1715 de 2014, Decreto 0570 de 2018) que rigen las subastas de FNCER en Colombia.
- Fuentes Secundarias:
 - Literatura académica: Se examinan estudios previos sobre subastas combinatorias, diseño de mecanismos y mercados eléctricos de renovables.
 - Informes de auditoría: Se utilizan reportes de firmas como Deloitte y PwC que validaron los resultados de las subastas.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Bases de datos energéticas: Se consultan registros de La Compañía Expertos en Mercados S.A. E.S.P. (XM) y CREG sobre precios de energía en el mercado mayorista.

1.7.8.2 Criterios de Inclusión.

- Documentos públicos y verificables.
- Datos completos y consistentes (ej.: energía adjudicada, precios, participantes).
- Normativas vigentes durante el período analizado (2019–2021).

1.7.9 Unidades de Análisis

Dado el carácter mixto del estudio, las unidades de análisis se definen así:

- Enfoque cuantitativo:
 - Población: Todas las ofertas presentadas en las subastas CLPE 02-2019 (compradores, vendedores, proyectos adjudicados). No se aplica muestreo, ya que se trabaja con la totalidad de los datos disponibles (censal). Las variables analizadas incluyen: Precios de adjudicación (COP/kWh). Energía asignada (MWh-día).
- Enfoque cualitativo:
 - Casos de estudio: Las tres subastas realizadas en Colombia (2019 voluntaria, 2019 complementaria, 2021), analizadas como casos emblemáticos para identificar patrones de eficiencia y distorsiones.
 - Unidades de observación:
 - Diseño del mecanismo de subasta (reglas, topes, incentivos).
 - Impacto del mecanismo complementario en precios y asignación.

1.7.9.1 Justificación de la Selección.

- Las subastas CLPE 02-2019 y CLPE 03-2021 se eligen por ser las únicas realizadas en Colombia hasta la fecha con resultados públicos auditados.
- El análisis censal (sin muestreo) asegura representatividad total de los datos oficiales.
- Los casos de estudio permiten una evaluación contextualizada, vinculando hallazgos cuantitativos con factores regulatorios y de mercado.

Esta estructura metodológica garantiza transparencia en la recolección de datos y rigor en el análisis, alineándose con los objetivos de evaluar eficiencia, modelar soluciones y proponer mejoras para futuras subastas.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

1.8. Estructura del trabajo

El trabajo se organiza por capítulos cuyo alcance se resume a continuación:

El capítulo uno (1) es la introducción, y presenta una descripción de la herramienta de subasta o mecanismo y de su aplicación en Colombia para la promoción de la expansión de proyectos de generación de FNCER, el objeto del trabajo, la contribución, la metodología y la pregunta de investigación.

El capítulo dos (2), expone el marco teórico en el que se desarrollan los principales elementos de la herramienta o mecanismo a través de los trabajos de los principales investigadores (documentos seminales), reseñando su alcance y logros en la solución de los problemas planteados por estos.

El capítulo tres (3) expone el tema de las subastas como mecanismos, al tratar sus detalles técnicos, tan necesarios para que estos no se desvíen del objetivo de constituirse en un mecanismo del que surja la mayor presión competitiva posible, y por tanto que la asignación sea lo más eficiente.

El capítulo cuatro (4) describe los mecanismos combinatorios, y trata el caso concreto de las subastas combinatorias, en las que se da la posibilidad de pujar por distintas combinaciones de bienes (homogéneos, heterogéneos, complementarios o sustitutos). Así mismo, aquí se propone un procedimiento con el objetivo de facilitar su diseño e implementación.

El capítulo cinco (5) expone las subastas de energía renovables, en el caso de Colombia, presentando las experiencias nacionales en subastas combinatorias para FNCER e implementando un modelo matemático para su solución.

El capítulo seis (6) expone algunas conclusiones, partiendo de la literatura referida a los subproblemas asociados a las subastas combinatorias. En este trabajo se desarrolla un marco para poder aplicar este tipo de subastas a los proyectos de FNCER.

El capítulo siete (7) entrega algunas recomendaciones mediante el marco propuesto para el diseño de una subasta combinatoria, y pretende que los futuros diseñadores puedan identificar y abarcar los puntos críticos de este diseño, para asegurar la adecuada utilización de este tipo de subastas en el mercado de FNCER en Colombia.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Subasta

Una subasta es un instrumento de mercado que cuenta con un conjunto explícito de criterios definidos por el subastador, mediante los cuales se determina la asignación de recursos y sus precios, en función de las ofertas, que corresponden a la valoración económica del bien subastado, y que es presentada por los participantes o postores. Las subastas generalmente tienen lugar cuando no existen las condiciones de un mercado conformado para la asignación de los bienes en cuestión.

2.2. Mecanismo

Un mecanismo de subasta como lo definen Roughgarden y Cohen (2019), está determinado por dos conjuntos de reglas que establecen las acciones que los participantes pueden ejecutar y cómo estas acciones determinan los resultados. El primer conjunto de reglas corresponde a las de asignación, que define quien es el ganador del bien subastado. El segundo conjunto, son las reglas de pago, que definen la forma en que los oferentes lo deben hacer al subastador, dados los resultados de la subasta.

Para Dinesh Garg y Reddy (2007), la teoría del diseño de mecanismos utiliza el marco de los juegos no cooperativos con información incompleta. En estos casos se propende por obtener la información a la medida y de preferencia privada. El problema para la obtención de información limita la forma en que las decisiones sociales pueden responder a las preferencias individuales. De hecho, el diseño del mecanismo puede ser visto como un proceso de ingeniería inversa de juegos o, equivalentemente, como el arte de diseñar las reglas de un juego para lograr un resultado específico deseado.

El enfoque principal del diseño de mecanismos es implementar instituciones o protocolos que satisfagan ciertos objetivos deseados, asumiendo que los agentes individuales operarán estratégicamente, interactuando a través de la institución, es decir, maximizando la utilidad esperada individual, y que puedan mantener la información de forma privada en los asuntos relevantes para la decisión o acción en cuestión.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

2.3. Mecanismos combinatorios

Las subastas combinatorias son aquellas en las que los postores pueden realizar ofertas sobre combinaciones de artículos, llamados *paquetes*, en lugar de hacerlas para uno solo o para varios artículos homogéneos y de forma individual. En este caso, es posible presentar paquetes de artículos homogéneos o heterogéneos, que puedan ser complementarios y/o sustitutos.

2.4. Clasificación de las subastas y/o de los mecanismos

Existe una verdadera colección de tipos de subastas y entre estas se pueden resaltar las unidimensionales, las multidimensionales, las unilaterales, las bilaterales unidimensionales, las bilaterales multidimensionales, las combinatorias de primer precio, las de segundo precio, las de k-ésimo precio, la inglesa, la holandesa, la japonesa, las subastas de viva voz, las subastas de sobre cerrado, la subastas de sobre cerrado de una sola ronda, subastas de múltiples rondas y las continuas, las de valores propios, las de valores comunes y las mixtas, entre otras. Nótese que para algunas de ellas se puede estructurar un dual o el reverso (bajasta).

Para cada uno de estos tipos de subastas, se han hecho múltiples contribuciones a la ciencia económica, que vincularon la teoría con el trabajo aplicado en el diseño de mercados, ayudando así a crear un campo del conocimiento que ha combinado con éxito la teoría, los experimentos, las técnicas y el diseño institucional en y para los mercados.

2.5. Trabajos y problemas iniciales de las subastas

El primer tratamiento que reconoció los aspectos de la teoría de juegos en las subastas corresponde a Vickrey (1961), en su análisis para la formulación y definición del equilibrio, este autor se hace preguntas fundamentales sobre la existencia del equilibrio del juego bayesiano, sobre la equivalencia en asignación de recursos, y sobre el precio de equilibrio. Asuntos a los que responde mediante la formulación del *Teorema de la Equivalencia*, desde el cual establece que, para diferentes esquemas y bajo ciertas condiciones, el resultado en la asignación de los bienes proporciona el mismo beneficio para el subastador. En esta línea, Fibich y Sela (2004), determinaron que la subasta holandesa abierta oral y de precio descendente es estratégicamente equivalente a la subasta de sobre cerrado de primer precio. También, que, condicionado a

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

información y valores privados, la subasta inglesa oral ascendente es equivalente a la de segundo precio de sobre cerrado.

Vickrey trabajó sobre la optimalidad para el subastador, sobre el bienestar social expresado en términos de su beneficio, sobre el excedente para el oferente, y sobre la distancia entre el equilibrio general y el equilibrio eficiente, tema que comúnmente se estudia como la relación entre el precio de anarquía y el precio de estabilidad. Asimismo, desarrolló trabajos sobre los incentivos a coludir, propendiendo en su formulación por la simplicidad de las reglas y la identificación del equilibrio y su refutabilidad. Sus artículos de 1961 y 1962, fueron un factor importante para recibir el premio Nobel de 1996.

Wilson R (1989) analiza el equilibrio de una subasta de primer precio, en la que las valoraciones de los participantes se extraen de una distribución común de probabilidad, la uniforme: $F(v)[0,1], v \in U[0,1]$. A su vez, este autor introdujo el *modelo de valor común*, entendido como aquel que tiene el mismo valor para todos los participantes y su relación con los *modelos de valor privado*, y los trabajos sobre *la maldición del ganador*, hecho que ocurre, cuando el ganador paga en exceso, es decir, ser *ganador maldito*. Finalmente, desarrolló el primer análisis de equilibrio de forma cerrada.

2.6. El modelo básico de equilibrio

Myerson, Riley y Samuelson, (1981) presentaron un modelo desde el que demostraron que los resultados de Vickrey sobre la equivalencia de los ingresos esperados para los diferentes esquemas de subastas, solo aplicaban bajo ciertas condiciones; en este sentido, formulan el *Teorema del ingreso esperado de una subasta*, y muestran que este es igual al ingreso marginal esperado del postor ganador. De forma general, Bulow y Klemperer (2007) proporcionan una derivación más simple de este resultado.

McAfee y McMillan (1987), desarrollan el modelo de referencia de aplicación actual, considerando los siguientes supuestos:

- Los postores son neutrales al riesgo.
- Los postores tienen valores privados, independientes y conocidos.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Los postores son simétricos, lo que significa que cada uno tiene un valor privado extraído de la misma distribución de probabilidades.
- El pago es función únicamente de las ofertas, por lo que la subasta misma determina el intercambio de bienes y dinero. No existen pagos adicionales entre postores u otro agente.
- El modelo estándar sigue la estructura del juego Bayesiano, donde el subastador y los postores constituyen el conjunto de jugadores:
- El subastador establece las reglas relativas a su objetivo, que son principalmente la maximización de los ingresos o la minimización de los costos.
- El conjunto de movimientos (o acciones) disponibles para cada postor es su función de oferta que asigna su valor (en el caso de un comprador) o costo (en el caso de un vendedor) al precio de oferta.
- El pago de cada postor es su utilidad esperada.
- La estrategia que siguen los postores es maximizar su utilidad

$$BG = (N, (R^+))_i \in N, ([0, w])_i \in N (\pi_i)_i \in N, F)$$

Donde:

N es el conjunto de postores.

El conjunto de acciones es el mismo para todos: $A = R^+$

El conjunto de información se interpreta como la información privada del agente igual para todos $X_i = [0, w]$

F la distribución sobre X_i al conjunto de información individual. F tiene densidad f

$\Pi_i: R^+ \times R[0, w]^N \rightarrow R$ es el payoff de cada jugador y su forma específica depende del tipo de subasta.

Una estrategia se define como *dominante* cuando da un resultado tan bueno o mejor que cualquier otra, independientemente de cómo jueguen los oponentes. Se define *estrictamente dominante* si siempre da un mejor resultado que cualquier otra estrategia, sin importar qué hacen los competidores. Alternativamente, se le llama *débilmente dominante* si hay al menos un conjunto de acciones de los oponentes para las cuales esta estrategia produce un resultado superior,

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

comparado con el resto de las estrategias disponibles. Una estrategia débilmente dominante produce recompensa similar en todas las demás estrategias disponibles para el jugador, para cualquier elección de estrategias de los postores.

Al ingresar a una subasta, cada postor realiza una evaluación de los artículos que se están subastando y determina su función de valoración, que corresponde a una función de valor real que asigna a cada artículo i , y para el postor j un número real v_{ij} que es la evaluación personal del postor j del artículo i . Se supone que las funciones de valoración son:

- Monótonas: para conjuntos S y T , donde $S \subseteq T$, tenemos $v(S) \leq v(T)$, y
- Normalizadas: $v(\emptyset) = 0$. Se supone que los postores tienen una función de utilidad (o pago) cuasi lineal expresada como $u_{ij} = v_{ij} - p_{ij}$. Donde p_{ij} es el precio que paga el postor j por el artículo i ; en el caso de k artículos.

Cuando se presenta una subasta de oferta en sobre cerrado de primer precio, los postores presentan ofertas b_1, \dots, b_n . El postor que presente la oferta más alta se adjudica el objeto y paga su oferta. Según estas reglas, queda claro que los postores no querrán ofertar sus verdaderos valores. Al hacerlo, obtendrían un beneficio nulo. Al pujar algo por debajo de sus valoraciones, pueden obtener ganancias.

Para resolver el equilibrio simétrico, el modelo estándar es conocido como el enfoque de las *condiciones de primer orden*, en el que se busca un equilibrio donde cada postor utilice una estrategia de oferta que es una función estrictamente creciente, continua y diferenciable de su valor. Para hacer esto, se supone que los postores $j = i$ utilizan estrategias de oferta idénticas $b_j = b(s_j)$.

Conforme a Levin (2004) el pago esperado del postor i , en función de su oferta b_i y su señal s_i es: $U(b_i, s_i) = (s_i - b_i) \times Pr[b_j] = b(s_j) \leq b_i, \forall j = i$ Por lo tanto, el postor i elige b para resolver:

$$\underset{b_i}{\text{Max}} (s_i - b_i) F^{n-1}(b^{-1}(b_i))$$

La primera condición de orden es:

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

$$(s_i - b_i)(n - 1)F^{n-2}(b^{-1}(b_i)) f(b^{-1}(b_i)) \frac{1}{b'(b^{-1}(b_i))} - F^{n-1}(b^{-1}(b_i)) = 0$$

Para el equilibrio simétrico, $b_i = b(s_i)$, entonces la primera condición de orden se reduce de una ecuación diferencial donde se elimina el subíndice i :

$$b'(s) = (s - b(s))(n - 1) \frac{f(s)}{F(s)}$$

Esto se resuelve usando las condiciones de frontera $b(s) = s$, para obtener

$$b(s) = s - \frac{\int_{s_-}^{s_i} F^{n-1}(\tilde{s}) d\tilde{s}}{F^{n-1}(s)}$$

2.7. Otros trabajos en torno al modelo básico y sobre los supuestos

2.7.1 De la aversión al riesgo

Maskin y Riley (1984), desarrollan y generalizan el modelo al considerar el diseño de subastas óptimas, cuando el vendedor es neutral al riesgo y los compradores son aversos al riesgo. Se dice que un agente es averso al riesgo si su función de utilidad es cóncava, es propenso al riesgo si su función de utilidad es convexa y neutral al riesgo si ésta es lineal.

2.7.2 Sobre la información

Los modelos básicos de subastas tienen como característica clave la presencia de información asimétrica, es decir, cada una de las estrategias del jugador, es una función de su propia información. Con Gibbons (2010), se introducen dos vertientes para el modelo básico: el de *valor privado*, en el que cada postor sabe cuánto valora el (ellos), el objeto (s) a la venta, (compra), pero su valor es con información privada. Por el contrario, en el *modelo de valor común*, el valor real es el mismo para todos, pero los postores tienen información privada diferente sobre lo que es el valor en realidad.

Bulow and Klemperer (2002) proporcionan un análisis de subastas óptimas y una equivalencia de ingresos; ellos formalizan una serie de temas fundamentales como: subasta ascendente, descendente, de sobre cerrado al primer precio, de sobre cerrado al segundo precio, la maldición del ganador y el Principio de Revelación (RP). Este fue introducido por Gibbard (1973), y estipula que “cualquier equilibrio de Nash-Bayes en un juego de información incompleta, puede

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

ser representado por un mecanismo directo de incentivos compatibles que tenga un equilibrio en el que los jugadores reporten verazmente sus tipos".

En la creación de mecanismos, el principio de revelación es crucial para encontrar soluciones. El investigador sólo debe examinar el conjunto de equilibrio definido por la compatibilidad de incentivos. En otras palabras, si el diseñador busca un mecanismo para aplicar algún resultado o propiedad, podría restringir su investigación a los mecanismos donde los postores están dispuestos a divulgar su información privada. Si no existe dicho mecanismo directo y veraz, ningún otro podría aplicar este resultado de manera eficaz.

Myerson (1981) muestra que, si la información privada de los postores está correlacionada, entonces el estructurador —que en algunos casos corresponde al vendedor (mayormente en las subastas ascendentes) o comprador (descendente)—, puede diseñar un mecanismo que produzca para sí mismo todo el excedente social factible, y de forma contraria si la información de los postores fuera completamente pública.

Crémer y McLean (1985) muestran que el resultado de Myerson es general, pero depende de supuestos como la neutralidad frente al riesgo, tanto para los postores, como para el vendedor, el conocimiento común de las distribuciones de probabilidad y los tipos de los jugadores u oferentes, la capacidad de coludir, y la capacidad del vendedor para comunicar y hacer cumplir de manera creíble y sin costo, el resultado de la subasta, que en ciertos casos, puede incluir la extracción de pagos al perdedor, pago por participar o extracción de un beneficio social de los postores, por ejemplo utilizar cups o topes.

2.7.3 Simetrías de participantes

Myerson (1981) por un lado, y Bulow y Roberts (1989), por otro, demostraron que una subasta que maximiza los ingresos asigna objetos a los postores con el valor marginal más alto. De la teoría de la demanda, un comprador para una curva de demanda dada tiene un mayor ingreso marginal que cualquier otro comprador con la misma valoración en una curva de demanda que es mayor en todas partes, debido a que esta se desplaza horizontalmente a la derecha en una cantidad fija. Por lo tanto, un subastador que maximiza los ingresos suele discriminar a favor de vender a postores cuyos valores se extraen de distribuciones más bajas, es decir, postores “más débiles”.

McAfee y McMillan (1989) desarrollan el punto anterior en un trabajo donde exponen que las señales se extrajeron de una distribución de probabilidad común en una subasta de primer

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

precio. En estas, un postor más débil tiende a hacer ofertas más agresivas (más cercanas a su valor real) que un postor más fuerte.

Para estos autores, una subasta de primer precio discrimina a favor de vender al postor más débil, en contraste con una subasta de segundo precio, en el que siempre se asigna al postor con la valoración más alta (en el modelo de valores privados). Por lo tanto, es plausible que una subasta de primer precio pueda ser más rentable, aunque menos eficiente desde el punto de vista de la asignación, que una subasta de segundo precio, cuando todos los supuestos de equivalencia de ingresos, excepto la simetría, están satisfechos.

Maskin y Riley (2000) muestran que, en términos generales, la subasta de *sobre cerrado* de *primer precio* genera más ingresos que la subasta de *segundo precio*, cuando los postores tienen distribuciones de probabilidades con el mismo tipo, mientras que la subasta *abierta* (oral) domina cuando entre los postores las distribuciones tienen diferentes formas. También muestran que los compradores *fuertes* prefieren la subasta de *segundo precio*, mientras que los compradores *débiles* prefieren la subasta de *primer precio*. Esto puede ser importante cuando se trata de atraer diferentes agentes para que participen en ella.

Otra forma importante de asimetría consiste en que un jugador puede tener mayor información. Milgrom (1985) mostró que, en una configuración de valor común puro, un postor sin información privada no obtiene ganancias en equilibrio en una subasta de segundo precio. Milgrom y Weber (1982) muestran el mismo resultado y también para las de primer precio.

2.7.4 Costos de entrada y número de postores

Estos asuntos fueron tratados inicialmente por Levin y Smith (1994) quienes muestran cómo el vendedor ajusta de manera óptima el precio de reserva y/o establece un subsidio o tarifa de entrada que absorbe todo el excedente de los entrantes, mientras se altera el número de participantes.

Bulow y Klemperer (2002) muestran en las *subastas de valor común* que el número de participantes socialmente óptimo es solo de uno. Luego demuestran que esto se puede generalizar para subastas de *sobre cerrado* y de *valor común*. También, que una subasta *simple ascendente* sin precio de reserva y n agentes (postores) simétricos, es más rentable que cualquier subasta que se pueda ejecutar de manera realista con n de estos postores.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Engelbrecht y Wiggans (1993), sin embargo, ya habían mostrado que lo anterior hacía muy poca diferencia, dado que el vendedor ajusta de manera óptima el precio de reserva y/o establece un subsidio o tarifa de entrada que absorbe todo el excedente de los entrantes, mientras se altera el número de participantes, al menos en uno.

Matthews (1984) muestra que los ingresos esperados del vendedor también se pueden estar disminuyendo en función del número de postores en subastas de valores comunes puros. Por su parte, Bulow y Klemperer (2002) proporcionan explicación del por qué esto ocurre, mediante el uso de ingresos marginales. Entonces, tanto social como privadamente, las tarifas de entrada y los precios de reserva son mucho más deseables en contextos de valores comunes. Levin y Smith (1994) muestran que cuando los postores son asimétricos *ex ante*, un subastador puede desear ejecutar una subasta ineficiente *ex post* para atraer a los postores más débiles a participar en ella.

2.7.5 Número desconocido de postores

Matthews (1987) y McAfee y McMillan (1987) consideran las subastas cuando los postores con valores privados no están seguros del número de competidores ni de cómo analizar las preferencias de los postores y del vendedor, dado que, de esto depende la naturaleza de la aversión al riesgo y de si las señales de los oferentes son afiliados o no. Todo esto, permite validar los supuestos usuales (neutralidad al riesgo, señales independientes, simetría, etc.). Finalmente, ellos mostraron que el *Teorema de los Ingresos Equivalentes* es aplicable independientemente de si el número real de competidores se revela a los postores antes de ofertar.

2.7.6 Diseño de los mecanismos y eficiencia

Desde la perspectiva de los mecanismos, el subastador enfrenta el problema de agregar las preferencias anunciadas por los múltiples postores, en una serie de decisiones colectivas, cuando los postores exhiben un comportamiento estratégico. El objetivo principal en el diseño de una subasta se refiere al resultado de esta. Para esto se debe lograr una eficiencia asignativa en la que el mecanismo implemente una solución que maximice el pago total entre todos los postores. Otro objetivo es el de maximización de ingresos, en donde la subasta logra una solución que maximiza la recompensa, y que en algunos casos puede ser a un participante en particular o en otro caso al subastador.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Del diseño de mecanismo, se resaltan los trabajos de Narahari y Gujar (2008), los de Tim Roughgarden (2012), (2016) y (2019) por el diseño, análisis, aplicaciones y limitaciones de los algoritmos, la teoría de juegos y microeconomía, especialmente aplicada a redes y subastas con sus publicaciones.

2.8. Subastas dobles (DA)

Las subastas se reconocen no solo por sus reglas, sino también por su entorno y características importantes que incluyen el número de vendedores y compradores; el número de los artículos que se comercializan; las preferencias de las partes, y la forma de la información privada o valor común. A continuación, se describen algunos de los tipos de subastas secundarias.

Una subasta doble DA es un procedimiento de venta en el que compradores y vendedores presentan simultáneamente precios de oferta y demanda a un subastador, quien determina el precio de compensación, si bien no siempre es necesario un subastador.

DA no discriminatoria, se da cuando incluye una oferta para la oferta y otra para la demanda llamadas oferta de oferta y oferta de compra o solicitud de oferta o de venta, en la cual se le otorga la mayor prioridad en las transacciones a las mejores ofertas (ofertas más altas y/o pedidos más bajos).

2.8.1 Elementos preliminares de una DA

Precio de liquidación, es el precio al que el subastador liquida el mercado después de igualar las ofertas potenciales de los compradores con las demandas potenciales de los vendedores.

Cantidad de compensación, es el número de artículos que un comprador (vendedor) recibe (vende) en la subasta después de la compensación.

Regla de asignación, es la que determina la cantidad comprada y el precio por cada comprador y la cantidad vendida y el precio por cada vendedor en una subasta. Básicamente, esta regla determina la cantidad y precio de compensación de cada postor o jugador.

Regla de pago, es la que determina el pago que cada jugador debe hacer (el comprador paga y el vendedor gana) en el momento de la liquidación de la subasta.

k-Subasta doble, se da cuando un comprador y un vendedor participan en una subasta doble, y si la oferta del comprador es más alta que la del vendedor, entonces el precio de liquidación es

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

$kb + (1 - k)s$ para algún $k \in [0,1]$ fijo. En varios documentos seminales, como es el caso de Chatterjee y Samuelson (2013), consideran el k -doble, con $k = 0.5$, que se denomina *regla de precio promedio de liquidación*. Esto implica que el precio de liquidación de subasta sea igual a $0,5$; que, en este caso, sería un promedio de la última oferta de liquidación y la última demanda de liquidación.

2.8.2 Las DA únicas, la secuencial y las continuas

Una subasta es *única* si se presenta un solo bien indivisible a ser subastado.

Es secuencial o *de tiempo discreto* cuando todos los agentes se mueven en un solo paso; en este caso puede ser de sobre cerrado de un solo paso o secuencial, desde la asignación inicial a la asignación final. Por el contrario, es de *tiempo continuo* cuando permite el intercambio en cualquier momento durante un período de asignación y el proceso de negociación, si se da. Las subastas secuenciales y continuas generalmente se componen de muchas transacciones bilaterales.

2.8.3 DA con un comprador, un vendedor, y un artículo (singleton)

Las DA inicialmente se estudiaron como una extensión del Enfoque del Equilibrio de Bayes Nash (EBN) con Chatterjee y Samuelson (1983), quienes consideran la transacción bilateral así: 1 comprador, 1 vendedor, 1 artículo indivisible, con valores privados extraídos independientemente de distribuciones uniformes de probabilidad conocidas.

Estos últimos investigadores, asumen para la DA el precio de transacción en el punto medio del intervalo de precios de equilibrio del mercado, lo que es conocido como *Fair bilateral trade*, cuando este intervalo no está vacío; de lo contrario, no se produce ninguna transacción. Encuentran estrategias y solución cerrada para las pujas lineales. Encontraron también que el EBN pierde beneficios para las transacciones con diferentes condiciones y probabilidades en el plano cartesiano.

Catterthwaite, y Steven R. (1989), trabajan los temas de existencia del equilibrio y la eficiencia de la asignación para un k en el intervalo $[0,1]$ el k -DA, determinan los términos en que se da la transacción, y que siguen los principios de Bayes, exhiben múltiples equilibrios e ineficiencias ex ante, para una clase genérica de funciones de distribución de probabilidad para las valoraciones. Ellos también proponen las estrategias de equilibrio y la forma de solucionar las

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

ecuaciones diferenciales obtenidas del proceso de maximización y luego, examinan la eficiencia del equilibrio obtenido. Estos autores asumen que la participación en la DA es voluntaria y fundamentada en la Racionalidad Individual.

D'Aspremont y Gérard-Varet (1979) mostraron que, cuando esto no se cumple, entonces la DA no exhibe eficiencias *ex post*. Holmstron y Myerson trabajaron los temas de incentivos *ex ante* en relación con la eficiencia en la asignación.

2.8.4 DA secuencial y continua

Daniel Friedman y John Rust (2018), postulan que no se tiene evidencia de la existencia de un modelo satisfactorio para DA secuencial expresada como un juego Bayes-Nash de información incompleta.

Para atender el asunto, Friedman presenta un modelo, donde se exhiben Equilibrios de Nash parciales para el juego extensivo y estos son reemplazados por un concepto de prueba de renegociación; la idea es que los agentes no dejan de realizar transacciones al cierre de la operación porque esperaron hasta el último segundo y el mercado se congestionó. Friedman mostró resultados 100% eficientes para bienes divisibles y preferencias clásicas con al menos tres comerciantes, y resultados por debajo del 100% de eficiencia en economías con unidades indivisibles y al menos *dos compradores y dos vendedores*. Esto lo explica el autor al tratarse de una forma de competencia de Bertrand, más la presión del tiempo.

2.9. Subastas dobles múltiples y combinatorias

Las *dobles múltiples* son un mecanismo donde se subasta una canasta de artículos múltiples y distintos, y son *combinatorias* cuando se cuenta con una canasta de bienes heterogéneos, que pueden ser sustitutos o no (complementario).

Esto representa para los postores valoraciones complejas sobre los subconjuntos de artículos a subastar. Si los artículos son sustitutos, el postor deseará adquirir un máximo de uno de ellos. Sin embargo, para los artículos complementarios, la canasta estará *supeditada*; es decir, la utilidad para un agente puede ser superior que la suma de las valoraciones de este, para artículos individuales. Por lo tanto, cuanto más se complementen los elementos, más valor tendrá la canasta.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Las subastas combinatorias fueron propuestas por primera vez por Rassenti, Smith y Bulfin (1982) para la asignación de franjas horarias de aterrizaje en los aeropuertos. Su artículo presentó las ideas principales sobre el diseño, la formulación de programación matemática del problema de los subastadores explicitó la complejidad computacional del problema de determinación del ganador, el uso de pruebas de técnicas de economía experimental, y la compatibilidad de incentivos de subastas combinatorias.

La participación de varios artículos heterogéneos en subastas de artículos múltiples produce un entorno de DCS. De manera similar, se pueden tener múltiples paquetes de unidades idénticas de cada artículo; esto identifica la subasta como una DCS. Se puede también presentar un entorno donde cada postor está interesado en recibir como máximo un artículo o un número predeterminado (k) de artículos.

Este mecanismo, al que la literatura considera como una generalización de las subastas de Vickrey, requiere que cada postor deba presentar una oferta en sobre cerrado indicando su valoración de todos los artículos. La subasta presupone o requiere de los postores presentar valoraciones reales como una estrategia dominante.

Otra característica importante de las subastas de artículos múltiples es la posibilidad de lograr el precio mínimo de equilibrio mediante subastas dinámicas o progresivas en lugar de una sola ronda. Demange, Gale y Sotomayor (1986), estudian mecanismos dinámicos de subasta basados en el aumento de precios para los conjuntos mínimos de artículos sobre demandados o disminución de precio para los subdemandados. Ellos demostraron que, en procesos iterativos, los precios convergen al precio mínimo de equilibrio.

Clarke y Groves formalizaron las subastas con múltiples artículos heterogéneos. Este mecanismo suele denominarse Vickrey-Clarke-Grove (VCG). El precio de pago en una subasta de VCG también se denomina pago de VCG; asigna bienes de manera eficiente y cobra a los postores el costo de oportunidad de los artículos que ganan.

Como se mencionó anteriormente, la información veraz es una estrategia dominante para cada postor. Mishra y Veeramani (2007), estudian una subasta de precios ascendentes de varios artículos en la que cada vendedor puede proporcionar uno o más artículos. Demuestran que su método implementa el resultado del VCG.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Aunque las subastas VCG exhiben propiedades teóricas atractivas, también es cierto que en la práctica sufren graves deficiencias. Por ejemplo: son vulnerables a la colusión de una coalición o cartel de postores; también que los ingresos del subastador pueden ser muy bajos o nulos (ejemplos de lo que ha ocurrido con las subastas para la canasta de bandas del espectro de telecomunicaciones en varios países, y el caso particular de Nueva Zelanda, y adicionalmente, la determinación de los pagos del VCG en sí misma, es un problema computacionalmente difícil. Además, Ausubel y Milgrom (2006), demostraron que la VCG pierde su propiedad de estrategia dominante cuando los postores enfrentan restricciones de presupuesto efectivo.

En consecuencia, para los mercados bilaterales, es un requisito importante el fuerte equilibrio presupuestario Strong (Sequential Bundle Bid, que establece que las transferencias monetarias ocurren sólo entre los agentes del mercado. Es decir, los compradores y los vendedores pueden comerciar sin dejar en el mecanismo ninguna parte de los pagos, y sin que el mecanismo añada dinero al mercado. Una versión más débil de SBB a menudo es considerada en la literatura como el equilibrio presupuestario, es la condición débil (WBB).

Si bien las subastas VCG tienen un desarrollo teórico robusto, sus deficiencias son lo suficientemente fuertes, para que apenas se utilicen en la práctica. Esto ha orientado algunas investigaciones hacia el diseño de mecanismo alternativos que superan algunos de los inconvenientes de la subasta de VCG. A la fecha, no se conoce ningún mecanismo que presente un bienestar social óptimo, cumpliendo simultáneamente con los requisitos de Individuos Racionales, IR, estrategia dominante compatible con incentivos, Dominant Strategy Incentive Compatible (DSIC), y el Strong Budget Balance SBB. Este hecho es conocido como el *principio de la imposibilidad*.

Siguiendo el procedimiento del tanteo walrasiana en subasta combinatoria, con su trabajo Myerson y Satterthwaite (1983), muestran cómo es imposible que un mecanismo IR, BIC y SBB maximice el bienestar social en subastas bilaterales combinatorias.

Elmaghraby, y Keskinocak, 2005; Leyton-Brown y Shoham, (2006); Parkes y Ungar, 2000; Pikovski, (2008); citados por Triki et al., (2014), han propuesto varias estrategias para subastas combinatorias, atendiendo el principio de la imposibilidad. Sin embargo, no muestran cómo las canastas resultantes podrían ser las mejores, o las que más prefiera un postor específico.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

En otras palabras, estos estudios asumen que, en un mercado, los postores deben conocer la canasta, sus preferencias y ordenamiento; además, que deben ser maximizadores de utilidades, para que no se comporten de manera diferente y prefieran diferentes paquetes. Otra fuente de información común diferente a la del proceso, es la historia del mercado, que los postores deben tener en cuenta a la hora de preparar la oferta.

De acuerdo a Meseguer y Rodríguez-Aguilar, (2008), cuando en las canastas se presentan artículos complementarios además de los requisitos mencionados anteriormente, los agentes también deben abordar varios temas como lo son: el tamaño de las canastas; los artículos para colocar en ellas; cantidades de cada artículo; cantidad de atributos de cada artículo; valores de los atributos, sus precios y los de canasta misma; limitaciones con respecto a las cantidades de artículos, y con relación al presupuesto del subastador por parte de los compradores.

Una clase (conjunto de funciones) se llama fraccionadamente subaditiva (o XOR) si es el máximo entre varias de un conjunto de funciones aditivas o también si una, y solo una de las entradas es verdadera. Esta clase de valoración fue definida, y denominada por Noam Nisan (2000) como XOR, en el contexto de las subastas combinatorias, tema que será ampliado en el capítulo 4.

Por otra parte, en los mercados reales no necesariamente se revelan los precios asumidos por los postores. El mercado expone las canastas junto con los precios a los que se negocian. Es decir, el mercado esconde valoraciones individuales que cada participante asume para cada artículo individual. El postor se enfrenta al problema de cuál es la mejor combinación (y cantidad) de artículos y la definición de los valores para el precio, dadas las cantidades seleccionadas en virtud de los atributos de las canastas. La toma de decisiones del agente dependería del riesgo de ganar/perder los paquetes y su actitud frente al mercado.

McAfee (1992), Satterthwaite y Williams (1989), Satterthwaite, Steven R. y William (2002), coinciden con la mayoría de los trabajos sobre DA combinatorias, al exponer que tienen el objetivo de mostrar el equilibrio y el bienestar social alcanzable, con la compatibilidad de incentivos y restricciones presupuestarias. En este sentido, la mayoría de los documentos académicos sobre las subastas combinatorias se centran en cuestiones técnicas específicas, propias de las condiciones de diseño y restricciones de mercado.

Leonard (1983) investiga los precios compatibles con incentivos, mediante la investigación de operaciones para resolver el problema de asignación, conocido como el Winner Determination

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Problem (WDP). Determina que este puede resolverse mediante Programación Lineal (LP por sus siglas en inglés). El artículo de Leonard identifica un conjunto de *precios sombra* que maximizan la suma de las variables duales. El autor muestra que estos precios no solo clarifican el mercado, sino que también proporcionan compatibilidad de incentivos.

Wurman y Wellman (2001) analizan el problema del precio del paquete para el WDP con Idioma XOR. Implementan un método basado en LP. De esta forma los precios convergen a los precios de equilibrio del mercado, pero no son compatibles con incentivos. Después del procedimiento, es asignado un precio para cada canasta, sea esta ganadora o perdedora. Este método valora los paquetes ganadores y perdedores, los precios para los paquetes ganadores son el resultado del dual de un problema de asignación de los paquetes perdedores, pero estos pueden resultar muy costosos para que algún postor esté interesado en comprarlos.

Bikhchandani y Ostroy (2003), proponen una solución para el WDP con Idioma XOR. En su propuesta reservan paquetes (ofertas excluyentes), en lugar de agruparlos para un postor específico. Los autores añaden variables auxiliares al problema de programación entera (IP) original. Utilizando la dualidad de la programación lineal, proporcionan la condición suficiente y necesaria para la valoración de los postores compradores y para que los paquetes tengan la propiedad de incentivos compatibles; este requisito se cumple solo con bienes sustitutos. Muestran que la canasta marginal de cualquier subconjunto del postor comprador es mayor que la suma de las que obtendría un comprador individual. Los autores también demuestran que bajo la condición de que los bienes sean sustitutos, la relajación de LP proporciona una solución entera y de valor óptimo de Vickrey, para las variables duales de cada postor.

En otro artículo, Bikhchandani et al. (2007), proponen un modelo que también tiene una solución óptima entera, con la condición de que los bienes sean sustitutos. La variable dual es exactamente el descuento de Vickrey del postor. Los precios de los paquetes ganadores se obtienen restando el descuento de Vickrey de la oferta de los ganadores.

A pesar del atractivo económico, dado que ambos modelos introducen una variable para cada solución entera factible, el número de variables necesarias para el WDP es exponencial en el número de ofertas.

Con la vinculación de los científicos informáticos, se ha ampliado la perspectiva y la aplicación a nuevos campos como son las e-subastas, concentrando el desarrollo a heurísticas

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

rápidas y al análisis de la complejidad de la determinación del ganador para varios modelos de subastas combinatorias posibles.

2.10. Árboles de decisión, redes neuronales; machine learning e inteligencia artificial en subastas dobles combinatorias

A diferencia de los algoritmos habituales de aprendizaje automático de procesamiento por lotes, para las subastas dobles combinatorias en línea, se recomienda la utilización del aprendizaje en línea. En este caso las ofertas llegan en orden secuencial y el algoritmo las procesa, una a la vez, y las actualiza por interacción. Eso significa que no tenemos el conjunto de datos de entrenamiento habitual y que el algoritmo se actualiza instantáneamente para todas las ofertas recién llegadas.

Para aplicaciones del mundo real donde los datos no solo son grandes, sino que también llegan a alta velocidad, el aprendizaje en línea se ha convertido en una técnica prometedora para aprender a partir de flujos continuos de datos. Esto contrasta con el aprendizaje automático habitual, donde se entrena con un conjunto de datos específicos y luego se utiliza el modelo sin adaptarlo a nuevos datos. Los métodos de aprendizaje en línea parecen encajar mejor en entornos como los de las subastas, donde los valores cambian con frecuencia y en intervalos cortos.

En las publicaciones de Nassiri-Mofakham et al. (2009), Multi-Attribute Utility Theory Fasli, (2007); Lewicki, Saunders, y Barry, (2006); Nassiri-Mofakham, Ghasem-Aghaee, Ali Nematbakhsh, y Baraani-Dastjerdi, (2008), y Wooldridge, (2009), se señala la importancia de la aversión al riesgo del postor en la puja, de la agrupación de bienes complementarios de varias unidades en la canasta, la consideración de señales del mercado, así como también, la conformación total del conjunto de artículos, bien sean sustitutos o no, para la definición del precio de puja.

Thomas Sandholm y Subhash Suri (2001) en su publicación *Improved winner determination in combinatorial auctions and generalizations*, señalan que en las subastas combinatorias se pueden relajar estas condiciones cuando —al presentar ofertas— los participantes expresan la valoración de las complementariedades entre los elementos, en lugar de tener que especular en una valoración del artículo y el impacto de obtener otros elementos complementarios.

Estos autores también proponen un algoritmo mediante árboles de decisión para obtener soluciones óptimas, y, en cualquier momento la determinación del ganador, incluidas las mejoras

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

estructurales que reducen el tamaño del árbol de búsqueda, ofrecen estructuras de datos más rápidas y optimizaciones en los nodos de búsqueda.

Hamed Fazlollahtabar (2020) propone una solución mediante redes neuronales en su publicación *A DSS-Based Dynamic Programming for Finding Optimal Markets Using Neural Networks and Pricing* donde señala que los productores necesitan indagar qué elementos del mercado proporcionan un beneficio más alto para procurar mayor cantidad de estos. En su modelo, las ofertas se registran en una base de datos como datos no estructurados. Entonces, una red neural se emplea para el procesamiento de los datos. Las salidas se insertan en un modelo económico matemático integrado con un programa de optimización dinámica para encontrar la condición óptima de mercado. El análisis de sensibilidad es realizado utilizando el concepto de precios de equilibrio.

2.11. Aplicación de las subastas dobles al mercado energético

La mayoría de estos estudios de subastas se centraron en las de una sola cara, y solo unos pocos autores tales como Nicolaisen et al., (2001); Wang y Yin, (2004); Block et al., (2008), tratan el tema del mecanismo de subasta de dos puntas para el mercado de la electricidad.

Nicolaisen et al. (2001) propuso un mecanismo discriminatorio para subastas dobles en el que el precio de la electricidad se determina mediante una subasta con precios medios. Sin embargo, su análisis de subasta no coincidió completamente con las ofertas de electricidad obtenidas en la práctica.

Block et al. (2008) introdujo un mecanismo que puede facilitar la aplicación de subastas dobles para energías (es decir, electricidad y calor) en redes de micro-energía, en un comercio P2P. Además, se propone una combinación de mecanismo de subasta doble para la asignación y fijación de precios de la energía que especialmente, tenían en cuenta las necesidades particulares de productores y consumidores (oferta-demanda)

Basado en el estudio de Zou y Ren, (2007), Xiaoyan Zou (2009) construye un modelo de negociación dinámico en la publicación *Double-sided auction mechanism design in electricity based on maximizing social welfare*, donde enfatiza la conveniencia y necesidad de las señales de transparencia en el mercado spot de electricidad para promover los contratos bilaterales y mejorar

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

el bienestar social. Sobre la base de este supuesto, creó un modelo para maximizar el bienestar social.

Hobbs et al. (2000) diseñó un mecanismo de subasta doble en el que los postores son motivados a pujar de acuerdo con su verdadera valoración, a fin de poder maximizar el bienestar social del mercado. Un defecto de su mecanismo, sin embargo, es que corre el riesgo de ser ingresos deficientes, y se puede jugar mediante la colusión de proveedores y consumidores.

Kian, Cruz y Thomas (2005) en su publicación *Bidding Strategies in Oligopolistic Dynamic Electricity Double-Sided Auctions*, modelan las subastas dobles de electricidad como un sistema dinámico y utilizan estrategias de Nash-Cournot para los participantes del mercado (empresas generadoras y distribuidoras).

Xiaoyan Zou (2009) en su publicación *Double-sided auction mechanism design in electricity based on maximizing social welfare*, propone un mecanismo que puede controlar el poder de mercado y mejorar el bienestar social para el mercado eléctrico. La principal contribución de este artículo es que el mecanismo puede maximizar el bienestar social sin problemas de deficiencia de ingresos.

Wang y Yin (2004) diseñaron un mecanismo con incentivos compatible que pueden inducir a los participantes a revelar su verdaderos costos marginales o valores de la electricidad. Concretamente, propusieron una regla de equilibrio basada en minimizar los costos totales de transacción.

2.12. Reglas usuales de pago para el sector energético

Existen principalmente dos alternativas para clasificar los mecanismos de subasta de electricidad desde las reglas de pago: 1. La fijación de precios uniformes (UP) o 2. El pago por lo ofertado -Pay as bid- (PAB). En virtud a un mecanismo de fijación de UP, a todos los vendedores se les paga ya sea la última oferta de precio aceptada o la primera oferta de precio rechazada. En los mecanismos de PAB, a cada proveedor se le paga el precio que corresponde a su propia oferta.

La elección entre estos dos mecanismos para la subasta de electricidad ha sido una de las cuestiones más importantes en la liberalización de los mercados energéticos. Recientemente ha habido un intenso debate sobre la eficiencia de estos dos mecanismos, y no ha surgido ningún

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

consenso teórico o empírico sobre la eficiencia en el mercado para el marco de aplicación de los dos mecanismos.

En la práctica, UP es más aplicada en el mercado estadounidense de operadores independientes, aunque PAB se utiliza actualmente en los mercados al contado de Inglaterra y Gales, (Helman y Hobbs, 2008). Para Colombia en las subastas de renovables se utiliza la aplicación de PAB.

La elección entre estos dos mecanismos para la subasta de electricidad ha sido una de las cuestiones más importantes para el manejo tanto del mercado de largo plazo como del Spot. Kahn et al., (2001); Macatangay, (2001); Rassenti et al. (2003) argumentan a favor de UP en algunos documentos; debido a su equidad, todos los ganadores reciben o pagan el mismo precio y los no ganadores, no pueden ser adjudicados si se niegan a ofrecer al menos el precio de compensación del mercado (Haghighat et al., 2008).

En contraste, los defensores de PAB piensan que, en los mecanismos UP, las unidades infra-marginales reciben un precio del sistema que puede estar muy por encima del precio en sus ofertas, y por lo tanto obtener ingresos excesivos.

En relación con este debate, varios estudios recientes se han centrado en el comportamiento de subastas en los mercados de electricidad. En ellos, los autores señalan que los generadores pueden ejercer su poder de mercado en ambas formas de pago, por lo que sus ofertas son mucho más altas que sus costos verdaderos, Hao (2000); Bialek (2002); Li et al., (2005); Macatangay, (2001); Wei et al., (2005).

Zou, X. (2009), indicó con sus modelos de comportamiento de los proveedores en la subasta de los mercados de electricidad bajo el mecanismo UP, que los productores no tienen incentivos para ofertar sus verdaderos costos. También, se argumenta que, los generadores probablemente enmascararán sus ofertas por encima de su producción para protegerse contra la posibilidad de ganar solo en el margen. Bialek mostró que las subastas de energía eléctrica en mercados al contado hacen a la UP vulnerable a los juegos de azar por parte de la compañía de generación (precio de anarquía, en una lotería).

Li et al. (2005), utilizó un reproductor N Forchheimer, un modelo matemático, para analizar el comportamiento de los generadores en la formación de una colusión tácita en una subasta UP repetida. Los resultados mostraron que, dado un entorno de carga (es decir cuando se tiene una

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

cantidad q definida a subastar), el mercado puede inducir a varios generadores para coludir directa o tácitamente, para controlar el precio de compensación, o solo un generador que sea lo suficientemente fuerte y obstante poder de mercado, puede controlar el precio de compensación.

Macatangay (2001) propuso que los grandes jugadores en una subasta PAB poseen una ventaja informativa que ayuda a establecer una posición dominante, y puede reducir la eficiencia del mercado de la electricidad. Wei et al. (2005) analizaron el precio de oferta de cada participante en un mercado PAB, mostrando como resultado que los grandes productores pujan más que sus costos, y el precio de la subasta se descompone en una variedad de componentes que corresponden a diferentes factores, entre los que pueden citarse los valores incrementales de la generación del ofertante, los costos operativos del sistema.

2.13. El sector energético en Colombia y las fuentes renovables no convencionales

Jairo Gómez Tapias y Camilo Leonardo Sandoval R. (2018) en su publicación *Análisis de prospectiva del sector energético de Colombia*, presentan un análisis de cómo es el marco normativo vigente en referencia a la inclusión de energías renovables al sistema de distribución eléctrico, en especial los sistemas fotovoltaicos.

York Castillo y Melisa Castrillón Gutiérrez (2011) en su publicación *Rol de las fuentes no convencionales de energía en el sector eléctrico colombiano*, presentan un panorama geográfico, demográfico, económico y de la política energética de del país, y de manera complementaria un análisis prospectivo del rol de las fuentes no convencionales de energía.

Wiston Ñustes y Sergio Rivera (2017), en su estudio *Colombia: territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica*, ofrecen una reflexión que expone los distintos hallazgos de investigación acerca del escenario del sector eléctrico actual en el país y cómo esto ha impulsado a considerar la incorporación de las FNCER a corto y mediano plazo, basándose en la evolución del sector eléctrico en Colombia y la visión de los diferentes agentes del sector (públicos para las políticas y los privados y públicos para los emprendimientos).

Manuela Castaño-Gómez y John Jairo García Rendón (2020) en su *Análisis de los incentivos económicos en la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Colombia*, examinan el efecto de los incentivos vigentes, establecidos en la Ley 1715 de 2014, en la inversión en energía solar fotovoltaica en Colombia.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

2.14. Subastas de energía no renovable en Colombia

S. M. Chica-Medrano et al. (2022) en su documento *Desarrollo de un algoritmo basado en Python para el proceso de adjudicación de subastas de renovables en Colombia* detallan la estructura matemática de la segunda subasta de energía renovable en el país. La investigación propone un modelo de programación lineal entera mixta que aborda un problema de optimización para determinar la combinación de ofertas que, al mismo tiempo que incrementa el beneficio del consumidor, respeta las limitaciones operativas y económicas dictadas por las normativas regulatorias.

US Aid e IRENA (2022) en el documento *Accelerating the Energy Transition in Colombia Renewable Energy Auctions*, presentan las subastas de energía renovable en Colombia, proporcionando al mismo tiempo, una plataforma para que las partes interesadas de América Latina y el Caribe conozcan los diferentes elementos para el diseño de subastas de energía renovable, identificando simultáneamente desafíos, oportunidades y el camino a seguir en los esfuerzos nacionales y regionales para descarbonizar el sector eléctrico y el camino hacia un futuro energético con emisiones netas cero.

US AID e IRENA (2021) en el documento *Renewable energy auctions in colombia: context, design and results*, analizan los cambios de diseño entre las dos primeras subastas en Colombia, así como los resultados de los precios y los factores que los afectan.

Este capítulo realizado a partir de los trabajos fundacionales de Vickrey, Myerson y Wilson, permiten entender cómo reglas específicas de asignación y pago determinan los resultados en contextos de información incompleta. El presente trabajo contribuye al análisis de subastas desde una perspectiva teórica y aplicada, profundizando en la estructura de los mecanismos, las condiciones de equilibrio, y el impacto de supuestos como la simetría de los jugadores, la naturaleza privada o común de la información, y la aversión al riesgo. Asimismo, se reconoce el valor de las subastas combinatorias y multidimensionales como herramientas para enfrentar problemas de asignación complejos. Con ello, se fortalece el vínculo entre el diseño institucional y los resultados de eficiencia y bienestar, aportando al desarrollo de mercados más robustos y transparentes.

Adicionalmente el trabajo aporta al análisis de subastas dobles secuenciales y combinatorias. Introduce equilibrios parciales y una prueba de renegociación para explicar la eficiencia en subastas

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

con bienes divisibles, y sus limitaciones con indivisibilidades. Además, examina los desafíos de las subastas combinatorias, como la complejidad del problema de asignación y las limitaciones prácticas del mecanismo Vickrey-Clarke-Groves (VCG), destacando el principio de imposibilidad y la necesidad de enfoques computacionales eficientes.

Finalmente, también se destaca el papel de técnicas de inteligencia artificial, como herramientas que permiten adaptarse dinámicamente a mercados complejos y de alta velocidad, se analizan aplicaciones al mercado eléctrico, donde distintos autores han propuesto mecanismos de subasta doble enfocados en maximizar el bienestar social, revelar costos reales y equilibrar el poder de mercado, con enfoques dinámicos y compatibles con incentivos.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 3. Mecanismos

3.1. El problema del diseño del mecanismo

El campo denominado diseño de mecanismos algorítmicos es bastante amplio y variado. Las líneas divisorias entre este campo y los campos económicos “clásicos” de diseño de mecanismos, diseño de mercados y diseño de subastas son difusas. Podemos decir que un problema forma parte del diseño de mecanismos algorítmicos siempre que tengamos un desafío de diseño económico en el que la esencia central del problema sea la multitud de *elementos de entrada* o *posibilidades de resultado*.

En otras palabras, siempre que alguna complejidad combinatoria sea una cuestión clave que interactúe con cuestiones de incentivos. Finalmente, a medida que se ha desarrollado la teoría relacionada con tales escenarios, han surgido algunos *enfoques* para el diseño de mecanismos que son característicos de los científicos informáticos, en particular una preferencia por el análisis del "peor caso" y una disposición a aceptar las soluciones aproximadas.

Para su definición, se introduce el concepto de la función de elección social (SCF por sus siglas en inglés) como las que asignan las preferencias y utilidades de los agentes a un resultado único o a una clasificación de resultados, que representan la decisión colectiva o el bienestar social. Este problema complementa la elección de la SCF con la necesidad de abordar otro problema, a saber, el de la obtención de información.

Al decidir la SCF, $f(\cdot)$, parece que se puede conseguir una solución trivial para el problema de obtención de información a ser solicitada a los agentes, para que revelen sus tipos θ_i y luego poder usarlos directamente para calcular el resultado social.

$x = f(\theta)$. Sin embargo, dado el hecho de que un resultado x produce una utilidad de $u_i(x, \theta_i)$ al agente i , y el agente i es un agente maximizador de utilidad, las preferencias de los agentes sobre el conjunto X dependen de la realización del perfil de tipo $\theta = \theta_1, \dots, \theta_n$

Para cualquier realización dada θ , diferentes postores pueden preferir resultados distintos. Por lo tanto, no es sorprendente que, si el agente i revela un tipo falso, digamos θ_i al planificador

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

social, porque al hacerlo entonces puede ayudarle a impulsar el resultado social hacia una elección favorable, digamos x . Este hecho se conoce como el *problema de revelación u obtención de información*.

3.2. Mecanismo

3.2.1 Definición formal

Un mecanismo $M = [(S_i)_i \in N, g(\cdot)]$ es una colección de conjuntos de acciones (S_1, \dots, S_n) y una función $g : S \rightarrow X$, donde $S = S_1 \times \dots \times S_n$. Este conjunto S_i para cada agente, describe el conjunto de acciones disponibles para este y el tipo real θ_i , que cada agente elegirá para alguna acción.

Se dice que $s_i \in S_i$. Una vez que todos los agentes elijan sus acciones, el planificador social utiliza este perfil de las acciones $s = (s_1, \dots, s_n)$ para seleccionar el resultado social $x = g(s)$. Por definición, el esquema trivial de pedirle a los agentes que revelen sus tipos se convierte en un caso especial que se llama Mecanismo de Revelación Directa (DRM por sus siglas en inglés). Formalmente dada una función de elección social $f : \rightarrow X$, el mecanismo $D = [(S_i)_i \in N, f(\cdot)]$ se conoce como DRM correspondiente a $f(\cdot)$.

Dada una función de elección social $f(\cdot)$, tenga en cuenta que el DRM es un caso especial de mecanismo $M = [(S_i)_i \in N, g(\cdot)]$ con $S_i = i \forall i \in N$ y $g = f$. Los mecanismos que no son mecanismos de revelación directa suelen denominarse mecanismos indirectos. $M = [(S_i)_i \in N, g(\cdot)]$ donde $S_i \subset R^+$ es el conjunto de ofertas que el postor i puede presentar al subastador y

$g(\cdot)$ es la regla de resultado dada por $g(b) = [y_1(b), \dots, y_n(b), t_1(b), \dots, t_n(b)]$, donde $b = (b_1, \dots, b_n)$.

Las funciones $y_i(\cdot)$ se conocen como la reglas de determinación del ganador y las funciones $t_i(\cdot)$ se conocen como reglas de pago. Por ejemplo, para el caso simple de subasta de una sola unidad y para los casos de varios artículos, pero sin precio de reserva, el subastador —que es un planificador social— invita a cada postor a que le informe la oferta b_i directamente a él de manera confidencial. En este ejemplo, la estructura de la oferta es la siguiente: $b_i = [b_i(A)] A \subset M; b_i(A) \geq 0 \forall A \subset M$.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

3.3. Propiedades de una función de elección social

En la práctica, algunas SCF son implementables y otras no, y para abordar la caracterización del espacio de elección social implementable, destacamos algunas propiedades de una SCF que idealmente, un planificador social desearía que tuviera. Pero, nótese que la característica fundamental de un planificador social es ser neutral ante todos los agentes. Por lo tanto, es obvio que al planificador social le preocupa si el resultado $f(\theta_1, \dots, \theta_n)$ es socialmente justo o no. A este siempre le gustaría utilizar una SCF tal que $f(\cdot)$ satisfaga tantas propiedades deseables desde la perspectiva de la equidad como sea posible.

3.3.1. Eficiencia ex post

Se dice que la SCF $f : \Theta \rightarrow X$ es eficiente ex post (o paretiana) si para cualquier perfil de tipos de agentes $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$, y cualquier par de alternativas $x, y \in X$, tales que $u_i(x, \theta_i) \geq u_i(y, \theta_i) \forall i$ y $u_i(x, \theta_i) > u_i(y, \theta_i)$ para algún i , tenemos $y = f(\theta_1, \dots, \theta_n)$.

Alternativamente, se dice que la SCF $f : \Theta \rightarrow X$ es eficiente ex post si no hay ningún perfil de tipos de agentes $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$, y existe un $x \in X$ tal que $u_i(x, \theta_i) \geq u_i[f(\theta), \theta_i] \forall i$ y $u_i(x, \theta_i) > u_i[f(\theta), \theta_i]$ para algún i .

3.3.2. SCF no dictatorial

La SCF $f : \Theta \rightarrow X$ se dice dictatorial si para cada perfil de tipo de agente $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$, tenemos $f(\theta_1, \dots, \theta_n) \in \{x \in X | u_d(x, \theta_d) > u_d(y, \theta_d)\} \forall y \in X$ donde d es un agente particular conocido como dictador. Una SCF $f : \Theta \rightarrow X$ se dice que no es dictatorial si d no es dictatorial.

3.3.3. Compatibilidad de incentivos (IC)

Se dice que la SCF $f(\cdot)$ es compatible con los incentivos (o verdaderamente implementable) si el mecanismo de revelación directa $D = [(i)_i \in N, f(\cdot)]$ tiene una estrategia de equilibrio puro $s(\cdot) = s_1(\cdot), \dots, s_n(\cdot)$ en el que $s_i(\theta_i) = \theta_i, \forall \theta_i \in \Theta_i, \forall i \in N$. Por tanto, decir la verdad por parte de cada agente. De esta forma se constituye un equilibrio del juego inducido por D . Y se puede verificar que si una SCF $f(\cdot)$ es compatible con incentivos, entonces el mecanismo de revelación directa $D = [(i)_i \in N, f(\cdot)]$ es implementable. Es decir, pedir directamente a los

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

agentes que informen sus tipos, e ingresar esta información en $f(\cdot)$ para obtener el resultado social, que resolverá tanto el problema de la obtención de información, como el problema de la agregación de preferencias.

3.3.3.1. Compatibilidad de Incentivos de Estrategia Dominante (DSIC).

Se dice que la SCF $f(\cdot)$ es compatible con los incentivos de la estrategia dominante (o verdaderamente implementable en estrategias dominantes) si el mecanismo de revelación directa $D = [(i)_i \in N, f(\cdot)]$ tiene un equilibrio de estrategia dominante $s_d(\cdot) = s_{d_1}(\cdot), \dots, s_n(\cdot)$ en el que $s_i d(\theta_i) = \theta_i, \forall \theta_i \in y_0, \forall y_0 \in N$

En otras palabras, decir la verdad por parte de cada agente constituye un equilibrio estratégico dominante del juego inducido por D. La siguiente es una condición necesaria y suficiente para que una SCF $f(\cdot)$ sea estrategia dominante de incentivo compatible: $u_i[f(\theta_i, \theta_{-i}), \theta_i] \geq u_i[f(\hat{\theta}_i, \hat{\theta}_{-i}), \theta_i] \forall i \in N, \forall \theta_i \in i, \forall \theta_{-i} \in -i, \forall \hat{\theta}_{y_0} \in y_0$. La condición anterior dice que, si la SCF $f(\cdot)$ es DSIC, entonces, independientemente de lo que hacen los otros agentes, siempre es mejor para el agente i informar su verdadero tipo θ_i .

3.3.3.2. Compatibilidad de Incentivos Bayesianos (BIC).

Se dice que la SCF $f(\cdot)$ es compatible con el incentivo bayesiano (o verdaderamente implementable en equilibrio bayesiano-Nash) si el mecanismo de revelación directa $D = [(i)_i \in N, f(\cdot)]$ tiene un equilibrio bayesiano-Nash $s(\cdot) = s_1(\cdot), \dots, s_n(\cdot)$ en el que $s_i(\theta_i) = \theta_i, \forall \theta_i \in i, \forall y_0 \in N$. En este sentido, decir la verdad por parte de cada agente constituye un equilibrio bayesiano-Nash del juego inducida por D. La siguiente es una condición necesaria y suficiente para que una SCF $f(\cdot)$ sea bayesiano Incentivo compatible: $E[\theta_{-i}\{\theta_i\}] \geq E[\hat{\theta}_{-i}\{\theta_i\}] \forall i \in N, \forall \theta_i \in i, \forall \hat{\theta}_{y_0} \in y_0$.

En otras palabras, en un mecanismo de revelación directa las únicas acciones disponibles para los agentes están dadas por hacer exigencias directas sobre sus preferencias para el mecanismo. Por su parte, en el mecanismo de compatibilidad de incentivos, que es de revelación directa, los agentes reportan la información sinceramente sobre sus preferencias en el equilibrio. Se ha mostrado que si una función de elección social $f(\cdot)$ es compatible con la estrategia de incentivo dominante, entonces también lo es con incentivos bayesianos.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

3.4. Principio de revelación

Básicamente ilustra la relación entre un mecanismo indirecto M y una revelación directa del mecanismo D para cualquier SCF $f(\cdot)$. El Principio de Revelación permite restringir la investigación sobre la verdadera implementación de una SCF a la clase de mecanismos de revelación directa únicamente.

3.4.1. El principio de revelación para el equilibrio de la estrategia dominante

Supongamos que existe un mecanismo $M = [S_1, \dots, S_n, g(\cdot)]$ que implementa el mecanismo para la función de elección social $f(\cdot)$ en equilibrio de estrategia dominante. Entonces $f(\cdot)$ es verdaderamente implementable en equilibrio de estrategia dominante (compatible con incentivos de estrategia dominante).

3.4.2. El Principio de revelación del equilibrio Bayesiano-Nash

Supongamos que existe un mecanismo $M = [S_1, \dots, S_n, g(\cdot)]$ que implementa el mecanismo con función de elección social $f(\cdot)$ en el equilibrio Bayesiano-Nash. Entonces $f(\cdot)$ es verdaderamente implementable en Equilibrio Bayesiano-Nash (compatible con incentivos Bayesianos), en vista del principio de revelación anterior, de ahora en adelante, nos centraremos únicamente en Mecanismos de revelación directa sin pérdida de generalidad.

3.5. El Teorema de Imposibilidad de Gibbard-Satterthwaite

Idealmente, un planificador social preferiría implementar una función de elección social $f(\cdot)$ que sea ex post eficiente, no dictatorial y compatible con los incentivos de la estrategia dominante. Ahora la pregunta es: *¿existe alguna función de elección social que simultáneamente cumpla con estos requisitos?* La respuesta es, no. El teorema de imposibilidad de Gibbard-Satterthwaite muestra que, para una clase muy general de problemas, no hay esperanza de implementar ninguna función de elección social satisfactoria con estrategias dominantes. Este es un resultado importante que ha dado forma al campo de estudio de la investigación en incentivos y en su implementación, Gibbard (1973) y Satterthwaite (1975), quienes determinaron que solo se cumplía si:

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- El conjunto de resultados X es finito y contiene al menos tres elementos.
- $R_i = S \forall i = 1 \dots n$
- $f(\cdot) = X$, es decir, la imagen de la SCF $f(\cdot)$ es el conjunto X .

Entonces la función de elección social $f(\cdot)$ es verdaderamente implementable en estrategias dominantes si es dictatorial.

3.6. Mecanismos con dinero. Modelo de utilidad cuasi lineal

Para hacer posible en la práctica gran parte del diseño de mecanismos modernos, asumimos que:

- El conjunto de resultados incluye un pago hacia o desde cada jugador.
- Las utilidades de los jugadores varían linealmente con su pago.

Formalmente, $X = \Omega \times R^n$. Ω es el conjunto de asignaciones. Para $(\omega, p_1, \dots, p_n) \in X$, p_i es el pago de (o hacia si $p_i < 0$) el jugador i . La función de utilidad u_i del jugador $i: (T_i, X) \rightarrow R$ toma la forma $u_i[t_i, (\omega, p_1, \dots, p_n)] = v_i[(t_i), \omega] - p_i$ para alguna función de valoración v_i . En este caso, decimos que los jugadores tienen valores para las utilidades cuasi lineales.

Utilizando el principio de revelación, podemos simplificar aún más la tarea de diseño de mecanismos en entornos cuasi lineales, tal como se expone a continuación.

Este sería el algoritmo para la implementación de mecanismos en entornos cuasi lineales:

Sea $f: T \rightarrow \Omega$ y regla de pago $p: T \rightarrow R^n$ tal que el siguiente mecanismo es Incentivo compatible:

- Solicitar informes $\tilde{t}_i \in T_i$ de cada jugador i (oferta simultánea en sobre cerrado).
- Elija la asignación $f(\tilde{t})$.
- Cobrar al jugador i el pago $p_i(\tilde{t})$.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

En este capítulo se profundiza en el diseño de mecanismos para subastas, combinando teoría económica y algorítmica. En los elementos:

1. Bases Teóricas:

- Introduce la Función de Elección Social (SCF) para transformar preferencias individuales en resultados colectivos óptimos.
- Distingue entre mecanismos directos (revelación de información) e indirectos (acciones estratégicas), esenciales para evitar manipulaciones.

2. Propiedades Clave:

- Eficiencia ex post: Garantiza que el resultado sea óptimo para todos.
- No dictatorialidad: Evita sesgos hacia un agente.
- Compatibilidad de incentivos (DSIC/BIC): Asegura que decir la verdad sea la mejor estrategia para los postores.

3. Principio de Revelación:

- Demuestra que cualquier mecanismo óptimo puede simplificarse a un formato de revelación directa, facilitando su implementación.

4. Límites y Soluciones:

- El Teorema de Gibbard-Satterthwaite prueba que, en contextos generales, sólo mecanismos dictatoriales son compatibles con estrategias dominantes. Esto impulsa el uso de modelos con dinero (utilidad cuasi-lineal) para lograr equidad y eficiencia.

5. Aplicaciones Prácticas:

- Proporciona frameworks para diseñar subastas complejas (como las combinatorias), donde herramientas como el mecanismo VCG aseguran resultados justos y evitan la maldición del ganador.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 4. Subastas Combinatorias

4.1. Subastas Combinatorias (CA)

El propósito de esta sección es explicar con detalle que es una subasta combinatoria de dos puntas, para dejar más claro aún el alcance de los objetivos y la justificación del trabajo. Una desventaja de las subastas de múltiples artículos es la dificultad para identificar la valoración de un postor para una combinación de artículos que están a la venta, dado que esta puede ser mayor o menor que la suma de las valoraciones de los artículos individuales; esto ocurre cuando los artículos son complementarios. Por lo tanto, los postores deben ofertar por el conjunto de artículos que necesitan individualmente.

Tal situación pone en desventaja a los postores, que para aumentar sus posibilidades de ganar requieren ofertar por encima de sus valoraciones reales, lo que los lleva al problema de *la maldición de los ganadores*. En este sentido, los postores pueden estar interesados en adquirir una combinación completa de artículos. Un paquete incompleto o en exceso, no es deseable y no vale el dinero que tienen que pagar. Esto se conoce como *problema de exposición*.

Las subastas combinatorias permiten a los postores realizar ofertas sobre cualquier subconjunto de artículos conocidos como *paquetes*. Esto permite a los postores expresar valoraciones complejas sobre el paquete de artículos y así informar con mayor precisión sus preferencias. Las CA a menudo conducen a mayores ingresos por subasta, así como a una mayor eficiencia económica del mercado, en el sentido de que los artículos se asignarían a quienes más los valoran.

4.2. Valoración y asignación en CA

En esta sección se generaliza la valoración en subastas combinatorias de acuerdo con el supuesto del modelo de valor privado. Se denota la valoración privada del postor j para el paquete S por $v_j(S)$, las valoraciones de los diferentes postores se suponen independientes y que satisfacen la condición de libre disposición, es decir, si $S \subseteq T$ entonces $v_j(S) \leq v_j(T)$. El resto de esta sección está dedicada a definir los términos que se utilizan comúnmente.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Definición de modelo de valor

Un modelo de valor $V = \{v_j(S)\}$ es un conjunto de valoraciones privadas de todos los postores para todas las cestas.

Definición de precio de oferta

El precio que el postor j asigna al paquete S se denomina precio de oferta y se denota por $P_{bid,j}(S)$.

Definición de precio de pago

Precio de pago $P_{pay} = [P_{pay,1}(S), \dots, P_{pay,j}(S), \dots, P_{pay,n}(S)]$ determina los precios a pagar por cada postor $j, (j \in \{1, \dots, n\})$ para el paquete S .

Definición de utilidad y pago del participante

En las subastas combinatorias, Cramton, basado en Sandholm (2006), asume que las utilidades de los postores son cusi lineales, estas son aquellas donde, para alcanzar su mayor satisfacción, el individuo compra solo hasta cierta cantidad de uno de los dos bienes que componen su canasta, así, se observará el efecto renta en solo uno de los bienes.

Es decir, la utilidad de un postor j al recibir un paquete S y pagar $P_{pay,j}(S)$ se define como:

$$\Pi_j(S, P_{pay,j}(S)) = v_j(S) - P_{pay,j}(S)$$

Donde:

- $v_j(S)$ es la valoración que el postor j asigna al paquete S .
- $P_{pay,j}(S)$ es el pago que el postor realizar por el paquete S .

Esta formulación es estándar en la teoría de subastas y es fundamental para garantizar propiedades como la racionalidad individual y la compatibilidad de incentivos.

Definición de asignación

Una asignación X es una tupla (S_1, \dots, S_n) que asigna un paquete (que puede ser vacío) a cada participante, S_j denota el paquete asignado al postor j . En un problema de subasta combinatoria unitaria, los paquetes asignados no se cruzan, es decir, $\forall j, j', S_j \cap S_{j'} = \emptyset$. Con el subastador definido como postor, algunos artículos pueden permanecer sin asignar.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Una asignación X también puede definirse mediante un conjunto de variables binarias $x_j(S)$ tal que $x_j(S) \in \{0, 1\}, \forall j, S$ $x_j(S) = 1 \Leftrightarrow S_j = S, \forall j$ $PS \subseteq M$ $x_j(S) \leq 1, \forall j$ $PS \subseteq M$ $x_j(S) = 0 \Rightarrow S_j = \emptyset$. En otras palabras, $x_j(S) = 1$ significa que el postor j recibe el paquete S . Denotamos el conjunto de todas las asignaciones posibles por X .

Representación de asignaciones con variables binarias

Cramton et al. (2006), mencionan que en el contexto de subastas combinatorias es común representar las asignaciones utilizando variables binarias para modelar la decisión de asignar un paquete específico a un postor. Esta representación se formaliza de la siguiente manera:

- Sea $x_j(S) \in \{0, 1\}$ una variable binaria que indica si el paquete S es asignado al postor j .
- La asignación debe cumplir con las siguientes restricciones.

1. **Asignación única por postor:** Cada postor puede recibir a lo sumo un paquete.

$$\sum_{S \subseteq M} x_j(S) \leq 1 \quad \forall j \in N$$

2. **No solapamiento de paquetes:** Cada artículo puede ser asignado a lo sumo una vez.

$$\sum_{j \in N} \sum_{S \ni i} x_j(S) \leq 1 \quad \forall i \in M$$

Esta formulación es estándar en la literatura sobre subastas combinatorias y ha sido discutida en diversos trabajos, incluyendo el de Toumas Sandholm, por ejemplo en su artículo “*An Algorithm for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions*”.

Definición de utilidad y pago totales de los postores.

Cramton et al. (2006) definen la utilidad total de los postores $\Pi(X, P_{pay})$ en una subasta combinatoria como la suma de las utilidades individuales de cada postor, considerando las asignaciones y los pagos realizados.

Formalmente se expresa como:

$$\Pi(X, P_{pay}) = \sum_{j \in N} \Pi_j(S_j, P_{pay, j}(S_j)) = \sum_{j \in N} [v_j(S_j) - P_{pay, j}(S_j)]$$

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Donde:

- $\Pi_j [S_j, P_{pay,j}(S_j)]$ es la utilidad del postor j al recibir el paquete S_j y pagar $P_{pay,j}(S_j)$.
- $v_j(S_j)$ es la valoración que el postor j asigna al paquete S_j .
- $P_{pay,j}(S_j)$ es el pago que el postor j realiza por el paquete S_j .

Esta definición es fundamental en el diseño de mecanismos de subastas combinatorias y ha sido ampliamente discutida en la literatura.

Definición de ingresos del subastador.

Para M que denota el conjunto de artículos y N el conjunto de postores, los ingresos del subastador a los precios de pago anunciados P_{pay} y la asignación X se definen como $\Pi(X, P_{pay}) = \sum_{j \in N} P_{pay,j}(S_j) = PS \subseteq M, j \in N x_j(S)P_{pay,j}(S)$. Los ingresos del subastador generalmente se consideran su ganancia, ya que se supone que sus costos son cero (0).

Definición de asignaciones factibles y eficientes.

Una asignación eficiente es la asignación óptima factible, por lo tanto, es una asignación que maximiza la ganancia global y es generalmente denotada como $X^* = (S_1^*, \dots, S_n^*)$.

4.3. Problema de asignación combinatoria (CAP) vs. el Problema de Determinación del Ganador (WDP)

Obtener una asignación eficiente es un objetivo típico del diseño de una subasta. Dadas las valoraciones individuales de los postores para todos los paquetes posibles, se puede encontrar una asignación eficiente resolviendo el problema de asignación combinatoria (CAP, por sus siglas en inglés) máximo $X = (S_1, \dots, S_n) X_j \in N v_j(X)$. CAP tiene una formulación de programación lineal entera sencilla. Usando el dual la variable de decisión $\{x_j(S)\}$, según Cramton et al. (2006)

podemos reformular CAP como:

$$\begin{aligned} \text{Max } PS \subseteq M \quad & P_j \in N x_j(S) v_j(S) \\ \text{s. t. } S \subseteq M \quad & x_j(S) \leq 1 \\ & \forall j \in N \end{aligned}$$

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

$$P \subseteq S \subseteq M, P_j \in N, x_j(S) \leq 1 \forall i \in M$$

$$x_j(S) \in \{0,1\} \forall j \in N, S \subseteq N$$

La función objetivo es maximizar la ganancia social. El primer conjunto de restricciones garantiza que como máximo se pueda asignar un paquete a cada postor, mientras que el segundo conjunto de las restricciones garantiza que cada artículo no se venda más de una vez. Por lo general, el subastador no conoce las valoraciones privadas de los postores necesarias para resolver CAP. En lugar de ello, selecciona la asignación óptima basándose en la información presentada en las ofertas. Esta formulación del problema se conoce como problema de determinación del ganador WDP, que es muy similar a la CAP, la única diferencia es el uso de precios de oferta de valoraciones en la función objetivo.

Es importante ser consciente de la diferencia entre estos dos problemas en una subasta real: en WDP, como ya se ha mencionado, los postores pueden o no reflejar verdaderamente sus verdaderas valoraciones; sin embargo, implementar un mecanismo VCG brinda a los postores el incentivo de no tergiversar sus valoraciones reales. Esto permite igualar las valoraciones de los postores para hacer que la asignación óptima encontrada por WDP sea igual a la asignación eficiente en la CAP.

A menudo los investigadores no se preocupan por el hecho de que las ofertas de precios reportadas, pueden no reflejar la verdadera valoración de los paquetes por parte de los postores; más bien, utilizan los precios anunciados y tratan de utilizar un modelo apropiado y un algoritmo eficiente que encontraría la asignación óptima en un tiempo razonable. A menudo se determina como regla de pago para los ganadores, pedirles que paguen la cantidad que el segundo mejor ganador ha ofertado, esto implementa un mecanismo VCG que da a los postores el incentivo para ofertar sus verdaderas valoraciones.

Definición de idiomas de oferta

Define el formato de los mensajes comunicados y las reglas de interpretación mediante las cuales los licitadores pueden formular sus ofertas.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Definición de ofertas atómicas o unidireccionales

Es un par $(S, P(S))$ que presenta un postor con S como el subconjunto que está dispuesto a ofertar por el precio $P(S)$. Las ofertas atómicas no se pueden utilizar para representar la valoración aditiva simple sobre dos artículos.

Definición de ofertas OR-aditivas u Ofertas OR

Las ofertas OR aditivas son una colección de un número arbitrario de pares de ofertas atómicas $(S_k, P(S_k))$ donde S_k es un subconjunto de los artículos por los que puja un postor y $P(S_k)$ es el precio máximo está dispuesto a pagar por ello.

Según Cramton et al.(2006), el postor estará dispuesto a obtener cualquier número de ofertas atómicas por la suma de sus precios.

Un conjunto de ofertas OR se representa como $v = OR[S_1, P(S_1)] \dots, OR[S_k, P(S_k)]$.

Donde S_t es un subconjunto de bienes y $P(S_t)$ es el precio ofrecido por ese subconjunto.

Se define una colección válida como $W \subseteq \{1, \dots, k\}$ como el conjunto de índices tal que las ofertas correspondientes son mutuamente disjuntas, es decir:

$$S_{t_1} \cap S_{t_2} = \emptyset \text{ para todo } t_1 \neq t_2 \in W$$

El valor de la oferta compuesta v se define como $\sum_{t \in W} P(S_t)$, donde la maximización se realiza sobre todas las colecciones válidas de ofertas disjuntas.

De la definición anterior se puede concluir que no es posible expresar las sustituibilidades mediante el lenguaje de licitación OR o solo se puede utilizar para representar aquellas valoraciones donde, para todo par de subconjuntos disjuntos S y T , se cumple: $S \cap T = \emptyset, v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$ y solo ellas. Por tanto, es posible que no existan valoraciones subaditivas en el lenguaje OR. Desafortunadamente, esto no es a menudo el caso, por ejemplo, en presencia de restricciones presupuestarias (si el postor no puede permitirse cada combinación de paquetes por los que pujó) o al subastar bienes sustitutos.

Definición de ofertas OR Exclusivas o XOR

Las ofertas OR exclusivas son la presentación de un número arbitrario de ofertas atómicas o pares $(S_i, P(S_i))$, donde cada S_i es un subconjunto de artículos y $P(S_i)$ es el precio máximo que el postor está dispuesto a pagar por él. A diferencia de las ofertas OR, los postores solo estarían

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

dispuestos a obtener como máximo una de las ofertas que presenten Para la valoración $v = XOR(S_1, P(S_1)) \dots, XOR(S_k, P(S_k))$, el valor v sería $Max_i |S_i \subseteq M P(S_i)$. Una oferta XOR es capaz de representar sustituibilidades, así como complementariedades entre elementos.

Definición OR de XOR y XOR de OR

OR de XOR es el lenguaje que representa OR de un conjunto de ofertas XOR. Similarmente, XOR de OR representa XOR de un conjunto de ofertas OR.

4.4. El problema de la obtención de preferencias (PEP) (Preferences Elicitation problem)

En las subastas combinatorias, los postores normalmente no están dispuestos a revelar sus valoraciones en todos los paquetes. En primer lugar, debido a su configuración de privacidad, es posible que los agentes prefieran no revelar su información de valoración. En segundo lugar, resolver el problema de valoración de los postores requiere selección y valoración de los paquetes por los cuales pujar entre un número exponencialmente grande de conjuntos de posibles paquetes. Desde el punto de vista computacional, determinar el valor de un solo paquete puede resultar exigente para los postores en muchos entornos del lenguaje de la subasta.

Una vez determinadas las valoraciones, los postores deben formular estratégicamente sus nuevos paquetes. A esto se le denomina el Problema de Generación de Ofertas (BGP por sus siglas en inglés). Si los postores no saben qué paquetes son más beneficiosos y cuánto deberían ofertar por ellos, la asignación resultante no puede ser eficiente. Por lo tanto, el BGP debe abordarse antes de que se pueda afirmar que la subasta combinatoria logra eficiencia.

4.5. Resolver el problema de determinación del ganador (WDP)

Las ofertas deben ser consideradas como subconjuntos de un conjunto de artículos, y su ponderador, como los precios correspondientes. Con esto se asocia el WDP a un problema de programación lineal entera de un conjunto ponderado, y a un problema de empaquetamiento, que busca el mayor peso total correspondiente a pares disyuntos de los subconjuntos ponderados de un conjunto de elementos.

La dificultad para resolver el problema de programación lineal (LP) correspondiente al WDP se puede deducir al problema de empaquetamiento del conjunto ponderado. Los precios son

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

los multiplicadores de Lagrange derivados de un Lagrangiano para la relajación del problema de determinación del ganador. Él formula una maximización de un modelo de ganancias para los postores basado en estos precios.

Se tienen entonces, varias metodologías para resolver el problema de determinación del ganador en subastas combinatorias. A continuación, se describe el principal enfoque.

4.6. Enfoques de fijación de precios por paquetes

Con las ofertas por paquetes o canastas, no es tan obvio establecer precios de venta para artículos individuales, cosa que a menudo resulta incluso imposible. Además, es posible que sea necesario personalizar los precios solicitados, es decir, diferentes postores obtienen precios diferentes por los mismos artículos o paquetes, a diferencia de los tradicionales precios anónimos. El precio del paquete, como su nombre indica, se utiliza para calcular un precio final de cada paquete. Debido a la superposición de algunos paquetes, los enfoques de fijación de precios de paquetes requieren los siguientes supuestos adicionales:

1. Cada postor debe ofertar por cada paquete.
2. Cada postor recibe, como máximo, un paquete en la asignación resultante.

Para evitar evaluar todos los paquetes, un postor solo puede informar valoraciones de los paquetes que le interesan. La condición dos implementa la condición XOR para garantizar que los postores puedan recibir múltiples artículos solo cuando hayan pagado por las complementariedades entre ellos. Los objetivos ideales para determinar los precios de los paquetes de subastas combinatorias son los siguientes: 1. Precios de equilibrio del mercado en los que el precio de un paquete ganador no sea inferior a la suma de todos los precios de los bienes que incluye, y el precio de un paquete perdedor es menor que esta suma. 2. Precios de compatibilidad de incentivos para realizar ofertas sencillas, con información veraz que permita la revelación de las verdaderas valoraciones.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

4.7. Formulación del problema

Supongamos, siguiendo a Cramton et al. (2006), que $M = \{1, 2, \dots, m\}$ es el conjunto de artículos y $N = \{1, \dots, n\}$ es el conjunto de postores que compiten para comprarlos. Cada postor $j \in N$ presenta un conjunto de paquetes de ofertas $S \subseteq M$, en donde cada una de ellas contiene un subconjunto de artículos seleccionados por el postor j , y al valor del precio correspondiente $P_j S$, también conocido como precio de oferta o simplemente el precio.

Los precios de los paquetes de los postores no son lineales. En este sentido, para un postor arbitrario j y conjuntos $S, S_1, S_2 (S, S_1, S_2 \subseteq M)$, con $S = S_1 \cup S_2$, tenemos $P_j S \neq P_j S_1 + P_j S_2$, donde $P_j S$ es precio del paquete S ofrecido por el postor j . Los precios son de significado no anónimo, que permiten precios discriminatorios de modo que $P_j S \neq P_{j'} S$ para el postor $j \neq j'$, se permite que $q_{ij} S$ sea un número entero no negativo que represente la cantidad del artículo i que ofrece el postor j en el paquete S y d_i sean las demandas del subastador del artículo i con $0 \leq q_{ij} S \leq d_i$

Al problema que debe afrontar el subastador, de decidir qué postores deben ofrecer cuántas unidades, de qué artículos y a qué precio, y con el objetivo de minimizar el costo total de la adquisición mientras se satisface la demanda del subastador, se le conoce como el inverso (o adquisiciones) para el problema de determinación del ganador (WDP por sus siglas en ingles). Cuando se permite a los postores ganar cualquier número de los paquetes por los que ofertaron, el problema de determinación del ganador se conoce como WDP (por sus siglas en ingles). En un entorno de adquisiciones, WDP se formula de forma genérica mediante el siguiente modelo de programación lineal entera.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} P_{jS} x_{jS} \text{ s. t.} \\ & \sum_{j \in N} \sum_{S \ni i} q_{ijs} x_{jS} \geq d_i \quad \forall i \in M \quad x_{jS} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall S \subseteq M \end{aligned}$$

El conjunto de restricciones, más conocidas como *restricciones de demanda*, establece que al menos d_i unidades de cada elemento debe proporcionarse en la solución óptima. Se observa cómo se está asumiendo libre disposición, es decir, una asignación óptima puede satisfacer en

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

exceso la demanda. En algunas aplicaciones de subastas combinatorias se prefiere implementar un lenguaje XOR de oferta para permitir que cada postor gane como máximo un paquete. Para tener en cuenta este requisito, es necesario agregar una restricción más para formular WDPXOR como sigue:

$$\sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} P_{jS} x_{jS}$$

s. t.

$$\sum_{j \in N} \sum_{S \ni i} q_{ijs} x_{jS} \geq d_i \quad \forall i \in M \quad (1) \quad \sum_{S \subseteq M} x_{jS} \leq 1 \quad \forall j \in N \quad (2) \quad x_{jS} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall S \subseteq M$$

Las restricciones (1) y (2) se denominan respectivamente de demanda y de oferta.

El lenguaje de licitación XOR en un entorno de adquisiciones WDP tiene el potencial para aumentar la precisión de los postores ya que como máximo una de sus ofertas presentadas es aceptada. Además, no permite a los postores obtener un conjunto de artículos como singleton ofertas sin haber pagado las complementariedades.

4.8. Aplicación de la relajación lagrangiana al WDP

La relajación lagrangiana es una técnica de aproximación de un problema difícil relajándolo a uno más simple. El método elimina algunas de las restricciones del problema y penaliza sus violaciones agregándolas al objetivo con parámetros de peso conocidos como multiplicadores Lagrangianos. Estos imponen un costo a las violaciones de las restricciones relajadas; por lo tanto, cada vez que una solución no satisface una restricción eliminada, se agrega una penalización al objetivo. La elección de las restricciones a relajarse se hace de tal manera que el problema relajado sea más sencillo de resolver. En otras palabras, la relajación lagrangiana tiene como objetivo relajar algunas restricciones estrictas, de modo que la optimización sobre el conjunto restante de restricciones es más fácil.

La aplicación de la relajación lagrangiana en subastas combinatorias proporciona una solución aproximada al problema y un límite inferior en el costo total de obtención. Los multiplicadores Lagrangianos correspondientes al primer conjunto de restricciones determinan cuánto cuesta tener una unidad más de un artículo y, por lo tanto, puede interpretarse como el precio

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

del artículo. Cuando se trata de una subasta iterativa, permite dar retroalimentación a los postores sobre los precios de los artículos, para que puedan modificar sus ofertas varias veces a lo largo de la subasta.

Como se mencionó, la relajación lagrangiana encuentra una aproximación al problema, pero no garantiza proporcionar un óptimo. De hecho, puede que ni siquiera produzca una solución factible en caso de que la solución determinada por esta no sea factible; pero proporciona una solución aproximada al óptimo.

4.9. Formulación del problema de relajación lagrangiana

Mansouri (2014), modela el WDP como un programa entero mixto, donde se busca minimizar el costo total de adquisición cumpliendo con las demandas del subastador. Para abordar la complejidad computacional del problema, aplica una relajación lagrangiana a las restricciones de capacidad, introduciendo multiplicadores de lagranje $\lambda_i \geq 0$ para cada bien i . La función lagrangiana resultante se expresa como:

$$L(x, \lambda) = \sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} P_{jS} x_{jS} + \sum_{i \in N} \lambda_i (d_i - \sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} q_{i j S} x_{jS})$$

y la función dual de Lagrange o simplemente la función dual como

$$L(x, \lambda) = \sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} P_{jS} x_{jS} + \sum_{i \in N} \lambda_i \left(d_i - \sum_{j \in N} \sum_{S \subseteq M} P_{jS} x_{jS} \right)$$

Donde:

- x_{jS} es una variable binaria que indica si se acepta la oferta del postor j por el paquete S .
- P_{jS} es el precio ofrecido por el postor j por el paquete S .
- $q_{i j S}$ representa la cantidad del bien i en el paquete S ofrecido por el postor j .
- d_i es la cantidad demandada del bien i .

Esta formulación permite descomponer el problema original en subproblemas más manejables, facilitando la obtención de soluciones aproximadas mediante técnicas como la optimización subgradiente.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Este capítulo comprende, el modelado avanzado en subastas combinatorias el cual permite valoraciones no lineales de paquetes, capturando complementariedades y sustituciones entre bienes, mientras que la asignación eficiente formaliza el problema de determinar ganadores (WDP) mediante programación lineal entera para maximizar beneficios sociales. Los lenguajes de oferta, como los formatos OR y XOR, introducen flexibilidad para expresar preferencias complejas, resolviendo así el problema de exposición al evitar paquetes incompletos o excesivos y alinear incentivos con valoraciones reales. Técnicas de optimización, como la relajación lagrangiana, permiten aproximar soluciones y ajustar precios iterativamente, mientras que mecanismos como VCG promueven incentivos honestos al motivar a los postores a revelar sus verdaderas valoraciones. Este marco teórico sólido, que define conceptos clave como utilidad, precios y eficiencia, ha sido fundamental para mejorar la eficiencia y aplicabilidad de las subastas en mercados complejos.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 5. Las Subastas de Energía Renovables, caso Colombia

La competencia surge en Colombia como condición necesaria para un suministro eficiente de energía, debido a la liberalización de la industria energética. La pugna de los mercados mayoristas y minoristas por lograr la asignación de energía ha llevado al uso generalizado de las subastas para la adjudicación tanto de energía, como de potencia, que buscan primordialmente asegurar el suministro.

Consecuentemente, en Colombia se asigna energía y potencia mediante subastas de energía en firme para el cargo por confiabilidad y para la energía de largo plazo mediante la suscripción de contratos financieros (Caicedo, Rudnick y Sauma, 2014), así como para la asignación de energía FNCER.

En Colombia se han desarrollado tres subastas de FNCER, con resultados mixtos: en la primera, realizada en febrero de 2019, no se adjudicaron contratos porque no se cumplieron los criterios de competencia; para la segunda, llevada a cabo en octubre de 2019, se modificaron varios de los criterios de selección y se adjudicaron algunos contratos para proyectos solares y eólicos, para lo cual se requirió utilizar un proceso complementario obligatorio secuencial al voluntario; en la tercera, efectuada en 2021, solo se adjudicaron algunos contratos de fuentes solares y en cantidades inferiores a la meta esperada, a pesar de haber contado con el proceso complementario y obligatorio. Los resultados muestran que solo representó el 46, 2% de la demanda objetivo, y también los precios fueron el 16% superiores a los adjudicados en 2019 y entre un 40% y 75 % a los del mercado de contratos mayoristas.

En este capítulo expongo el procedimiento y los resultados de la evaluación e implementación de un modelo tipo para las segunda subasta de FNCER tal como se desarrollaron en Colombia.

5.1. Subastas de dos puntas combinatorias en el contexto energético colombiano

En esta sección se verificó la utilización de las subastas como un mecanismo para la asignación de recursos y la formación de precios en consideración del tipo del bien (unitaria kW-h, pero múltiple objetivo: solar, eólico, y mediante franjas horarias); estructura de información (independiente o afiliada, dado que a las empresas integradas verticalmente se les permite participar

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

en las dos puntas) y la estructura de valoración del bien (privada, independiente y común, dado que los comercializadores puros se les ha permitido la participación).

Es crucial señalar que, entre las características diferenciales del mercado eléctrico colombiano, sobresale su matriz energética con su principal componente hidráulico. Asimismo, se toman en cuenta elementos como la posibilidad de que la oferta sea discriminatoria hacia los distribuidores y vendedores, la escasez de ofertas y la reducida participación en las subastas FNCER, y la gran concentración de estas, en solo cuatro compañías.

Por lo tanto, el mercado eléctrico en Colombia se distingue por la presencia de un oligopolio que puede facilitar la implementación de comportamientos estratégicos en los que los actores utilizan su posición predominante para tomar una porción del beneficio de los consumidores, provocando pérdidas irrecuperables de eficiencia en el mercado.

Finalmente, como un elemento determinante para la promoción y en los resultados de las subastas de FNCER, se resalta que el Ministerio de Minas y Energía haya promulgado la resolución MME 4-0715 (2019), mediante la cual establece que, por lo menos el 10 % de la energía comprada en el mercado mayorista para atender a los usuarios regulados debe provenir de FNCER.

5.2. El diseño de subastas en Colombia

Muchos de los resultados de la Teoría de Subastas están basados en supuestos necesarios para el equilibrio, y gran parte de las aplicaciones implican modificaciones relajación o eliminaciones de algunos de estos supuestos, o como en el caso colombiano, la aplicación forzosa de estos de forma indirecta, mediante la incorporación en los requisitos de participación en los procesos de las subastas.

5.3. Formulación matemática de la segunda subasta para FNCER en Colombia

En esta sección nos ocuparemos exclusivamente de la segunda subasta de FNCER, dado que la primera se declaró desierta porque no se cumplieron los criterios de competencia. En la tercera se adjudicaron proyectos solares y en cantidades inferiores a la meta. En consecuencia, solo la segunda subasta corresponde realmente a una subasta combinatoria, compuesta por proyectos solares, eólicos, y estructurada mediante bloques horarios, que aplica los elementos teóricos expuestos en este documento.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

En Colombia se utilizó un modelo de subasta de sobre cerrado combinatoria de dos puntas, en el que tanto compradores como vendedores, realizaron ofertas; es decir, como producto de la asignación se adjudicaron contratos a compradores, comercializadores del Mercado Energético Mayorista (MEM), como a vendedores de energía, agentes generadores del MEM o propietarios o representantes comerciales de proyectos de generación. Cabe anotar que, si bien la UPME publicó el código del modelo, este no es funcional, ya que hace parte de un sistema de información de propietario, y contaba con un demo de uso exclusivo para los oferentes de la subasta. Este fue el motivo de este componente del trabajo

Las ofertas realizadas por los compradores se presentaron para un periodo de 24 horas, donde debían indicar la cantidad máxima de energía a comprar en MWh-día y el precio al que estaban dispuestos a comprar en COP\$/kWh. La oferta realizada por los vendedores se presentó por bloques intradiarios como lo establece la Resolución 4-0590 del 2019 del Ministerio de Minas y Energía (MME), conformado por tres bloques: 0:00 a 7:00; 7:00 a 17:00 y 17:00 a 24:00 horas, y cuyo precio se da en COP\$/kWh.

La formulación matemática corresponde a un modelo de programación lineal entera mixta, que resuelve un problema de optimización para encontrar la combinación de ofertas que maximiza el beneficio social (los postores, por un lado, y el consumidor final por el otro, mediante el traslado de costos establecido en la regulación tarifaria), mientras se cumple con las restricciones operativas y económicas establecidas por el subastador y la regulación.

Los resultados de la Subasta CLPE No. 02-2019 (segunda subasta), según el Ministerio de Minas y Energía (2019) fueron los siguientes:

Proceso de Subasta Voluntario

- Demanda Objetivo de 12,050.5 MWh-día, determinada por el Ministerio de Minas y Energía.
- Tope Máximo Individual de 200 \$/kWh y como Tope Máximo Promedio 160 \$/kWh, determinados por la Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- Total de energía asignada de 10,186 MWh-día.
- Precio promedio ponderado de asignación de 95.65 \$/kWh.
- Un total de 544 contratos de suministro de energía eléctrica.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Total de 7 generadores asignados.
- Total de 22 comercializadores asignados.
- Total de 8 proyectos adjudicados con una capacidad efectiva total de 1,298.9 MW, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: el 17.39% corresponde a solar fotovoltaica y el 82.61% a eólica, en términos de energía.

Proceso Complementario Obligatorio

- Energía asignada 1,861.5 MWH-día
- Precio promedio ponderado de 106,66 \$/kWh.
- Total 168 contratos de suministro de energía.
- Total de 3 generadores asignados.
- Total de 28 comercializadores asignados .
- Total de 6 ofertas con capacidad adicional de 75 MW, los cuales se encuentran distribuidos 1, 26% correspondiente a solar y el 98,74 % a eólica.

5.4. Descripción de la subasta para FNCER en Colombia

5.4.1. Objeto de la subasta

Promoción de la contratación de largo plazo de energía eléctrica de conformidad con lo dispuesto en el Decreto 1073 de 2015. Como resultado de la subasta, se suscribieron contratos de Energía de Largo Plazo, con duración de 15 años.

5.4.2. Algunos elementos relevantes, tomados de los pliegos de condiciones

La siguiente información fue obtenida de XM (XM, s.f.), entidad encargada de la operación del mercado eléctrico en Colombia.

Plataforma Tecnológica

El subastador, que correspondió al MME administró y operó una plataforma tecnológica común para la subasta.

Elementos Técnicos

- **Energía media diaria máxima del proyecto.** Esta energía se calcula multiplicando la Capacidad Efectiva total por el factor de planta (dado por la UPME) por 24 horas.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- **Energía media diaria adjudicada previamente.** Esta energía se calcula sumando la energía adjudicada a los proyectos FNCER.
- **Energía media diaria.** Esta se calcula como la diferencia entre la Energía media diaria máxima del proyecto y Energía media diaria adjudicada previamente.
- **Energía media diaria a ofertar.** Es el total de la energía que el proyecto está dispuesto a ofertar, y no podrá superar energía media diaria.

Requisitos de participación

Se especificaron tanto en calidad de compradores como en calidad de vendedores, los requisitos comprenden aspectos técnicos, legales, y financieros.

Requisitos en calidad de compradores

Legales: Entre otros, documentos de existencia y representación legal, poder, y autorizaciones de los órganos competentes.

Financieros: Entre otros, declaración de la cantidad máxima de energía disponible a comprar en un día, certificación del capital suscrito, composición accionaria y estados financieros con sus notas.

Requisitos en calidad de vendedores

Técnicos: Certificación expedida por La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en la que conste que el proyecto está inscrito como mínimo en Fase 2 (el proyecto se encuentra en Fase de Factibilidad); el Concepto de Conexión aprobado por la UPME; Fechas de Puesta en Operación que deberá ser posterior a la fecha de adjudicación; capacidad ≥ 5 MW; cronograma detallado del proyecto con indicación de la ruta crítica; fecha de entrada en operación comercial del proyecto de generación FNCER, y la Curva S describe el gasto financiero en relación con el presupuesto planificado durante la duración del proyecto.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Requisitos en calidad de vendedores

Legales: Documentos de precalificación; autorización del propietario del proyecto si es diferente al registro de Fase 2 de la UPME, y declaración juramentada de vínculos económicos con otros vendedores.

Financieros: Documento con la cantidad máxima de energía disponible a vender en un día en [kWh-día]. Se deberá contemplar la energía de todas las ofertas.

Garantía de seriedad (Garantías en dólares): Constituida a favor del subastador pagadera a los compradores o vendedores de la contraparte.

Para los compradores: A garantizar a los vendedores la suma de ciento treinta y nueve pesos colombianos M/CTE por kWh (\$139,00) /kWh). Este valor se multiplicaría por el cinco por ciento (5 %) de la cantidad máxima de energía disponible a comprar en un año.

Para los vendedores: Para el caso de los vendedores, la suma de ciento treinta y nueve pesos colombianos M/CTE por kWh (\$139,00) /kWh. Este valor se multiplicaría por el diez por ciento (10 %) de la cantidad máxima de energía disponible a vender en un año.

Eventos de incumplimiento

Resultan por no firmar la totalidad de los contratos que se adjudiquen, la no constitución, entrega o aprobación por parte del Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC), que es el encargado del registro de las fronteras comerciales, de los contratos de energía a largo plazo; de la liquidación, facturación, cobro y pago del valor de los actos, contratos, transacciones y en general de todas las obligaciones que resulten de las garantías, entre otras).

Condiciones y etapas de las subastas

Topes: Entre las 8 a.m. y 9 a.m. la CREG suministró el tope máximo promedio e individual en COP \$ por kilovatio-hora [\$/kWh].

Tope Máximo Promedio: Expresado en [COP/kWh] con dos (2) decimales de precisión sin incluir el CERE. El resultado de la subasta debe ser tal, que el precio promedio ponderado de la totalidad de los contratos asignados en los tres bloques intradiarios no puede superar este Tope Máximo Promedio.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Tope Máximo Individual: Expresado en [COP/kWh] con dos (2) decimales de precisión sin incluir el CERE. (El Costo Equivalente Real de Energía —CERE— es un componente del precio de la energía en Colombia, que se calcula mensualmente de acuerdo con la Resolución CREG 071 de 2006. El CERE y corresponde a los valores viabilizados de las Obligaciones de Energía Firme del Cargo por Confiabilidad para un período determinado) y será utilizado para eliminar las ofertas de venta que superen este valor y las ofertas de venta simultaneas y dependientes que tengan relación con aquellas.

Bloques

Las ofertas se presentan para periodos diarios de 24 horas conformado por tres (3) bloques como sigue:

Bloque N°1 (7 periodos) entre las 0.00 y 7.00

Bloque N°2 (10 periodos) entre las 7.00 y 17.00

Bloque N°3 (7 periodos) entre las 17.00 y 24.00

Presentación de Ofertas

Entre las 9:00 y las 13:00 horas, los participantes presentaron mediante la plataforma informática las ofertas para la subasta.

Demanda Objetivo

Entre las 13:00 y las 14:00 horas el MME proporcionó la información de la demanda objetivo.

Ofertas de los Compradores

- Podían presentar 1 o más ofertas.
- Cada oferta era para el periodo de 24 horas.
- Deberá indicar la cantidad máxima de energía a comprar en un día en [MWh-día], expresada en números positivos con dos (2) decimales de precisión.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Deberá indicar el precio al que está dispuesto a comprar en [COP\$/kWh] con dos (2) decimales de precisión, sin incluir el CERE.
- El precio de oferta se entenderá como el precio promedio ponderado por kilovatio hora [COPS/kWh] que está dispuesto a pagar por la totalidad de contratos que le sean asignados para cada oferta.

Ofertas de los Vendedores

- Podrá presentar para cada bloque intradiario una (1) o más ofertas.
- Cada oferta deberá indicar la cantidad de energía a vender, en [MWh], expresada en números positivos con dos (2) decimales, para cada bloque intradiario.
- La cantidad de energía ofertada se entenderá igual para cada hora que integra el bloque intradiario en el que se está ofertando. La oferta deberá indicar el precio en [COPS/kWh] con dos (2) decimales de precisión, sin incluir el CERE.
- Cada oferta de venta podrá indicar la cantidad máxima y mínima de Energía que está dispuesto a aceptar para un mismo precio de oferta, en [MWh], expresada en números positivos con dos (2) decimales de precisión.
- La cantidad de energía no podrá superar la capacidad de transporte [MW] asignada en el concepto de conexión de la UPME para ninguna hora del día.
- La cantidad de energía del total de las ofertas que potencialmente puedan adjudicarse no podrá superar la energía media diaria del proyecto de generación.
- Los proyectos con Obligación de Energía Firme asignadas (OEF Obligación de Energía Firme, es un producto de la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia, y su objetivo es garantizar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica a largo plazo y a precios eficientes), que hayan suscrito contrato de suministro de energía producto de subastas pasadas, participan presentando sus ofertas en el bloque N° 3.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Idioma: (Corresponden al OR, XOR, ORXOR de la parte teórica, previa). El Vendedor deberá indicar, para cada oferta, si presenta o no una (1) de las siguientes restricciones, sin que sea posible establecer más de una (1) restricción para cada oferta.

Ofertas de Venta Dependientes. Oferta A simultánea con oferta B, se deben asignar tanto A como B, o ninguna de ellas.

Ofertas de Venta Excluyentes. A excluyente con B: no se deben asignar tanto A como B, solo una de ellas o ninguna.

A dependiente con B, condicionada. Solo se podrá asignar A si B resulta asignada. B no tiene dependencia con A, así que podrá ser asignada independiente de A.

En caso de que dos ofertas hayan sido declaradas excluyentes por los vendedores, se tendrán en cuenta aquella que oferta mayor energía, siempre y cuando ninguna de las ofertas haya sido asignada en el proceso de la adjudicación de la Subasta de Contratación de Largo Plazo de la UPME.

Características Oferta Vendedores

- Cantidad Máxima y Mínima que está dispuesto a aceptar a un mismo precio en MWh.
- Oferta: Cantidad Máxima a vender en MWh para cada bloque intradiario y el precio en COP.
- La cantidad de energía no podrá superar la capacidad de transporte [MW] asignada en el concepto de conexión.
- La oferta no podrá exceder el valor máximo declarado para el cálculo de la garantía de seriedad.
- La cantidad de Energía ofertada se entenderá igual para cada hora que integra el bloque intradiario en que participa.
- La cantidad de energía del total de las ofertas no podrá superar la energía media diaria. El precio de ninguna oferta podrá exceder el Tope Máximo Individual.
- En cada bloque intradiario se podrá presentar una o varias ofertas.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Se deberá revisar para cada oferta si se tienen restricciones. Para el cálculo de la energía media diaria se aplicará el factor de planta que para tal efecto indique la UPME.
- Los proyectos con Ofertas de Energía en Firme adjudicadas solo podrán ofertas Bloque intradiario N°3.

Características de la oferta de los compradores

- Para cada oferta de compra se ingresará la cantidad de energía MWh-día y el precio en COP/kWh. Cada oferta del comprador se entenderá para un periodo de veinticuatro (24) horas.
- El precio de oferta se entenderá como el precio promedio ponderado por [COP\$/kWh] que está dispuesto a pagar por la totalidad de contratos asignados.
- La oferta no podrá exceder el valor máximo declarado para el cálculo de la garantía de seriedad.

Desempate de ofertas

En un empate entre ofertas de Vendedor se dará prioridad en la asignación a la oferta que se haya recibido primero por parte del Subastador y se incrementará la oferta de compra en (0.001 COP\$/kWh).

Esquema de la subasta y Mecanismo Complementario

La subasta inicial o mecanismo voluntario se estableció como la energía adjudicada hasta el punto de cruce de las curvas de compra y venta. Sin embargo, para garantizar la adjudicación de una cantidad mayor de energía el MME diseñó un mecanismo adicional llamado *mecanismo complementario* que le asignó contratos de forma obligatoria a aquellos comercializadores que no fueron adjudicados en la subasta inicial debido a sus bajos precios de oferta, a prorrata de su participación en el mercado regulado de 2018. Esto, con el fin de alcanzar la demanda objetivo que estableció el MME.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

5.5. Modelo para la Subasta Combinatoria (phyton-pyomo CBC)

En esta sección se describe la implementación de un modelo matemático tipo, que permite ser aplicado en general a un mercado P2P de energía y en específico a proyectos de generación y para la comercialización de energía FNCER. El modelo escrito en PHYTON, utiliza el optimizador PYOMO y el Solver CBC. Este modelo reproduce adecuadamente los resultados de la subasta, certificados por la firma auditora del proceso licitatorio, Deloitte.

5.5.1. Formulación matemática

La subasta para FNCER se desarrolló de conformidad con los lineamientos del MME en el artículo 2.2.3.8.7.1 del Decreto 1073 de 2015, adicionado por el Decreto 0570 de 2018. A continuación, se presenta la formulación matemática del modelo de optimización que, como se mencionó corresponde a un modelo de programación lineal entera mixta, siguiendo lo realizado por Medrano et al. (2022):

Conjuntos:

C : Conjunto de compradores.

V : Conjunto de vendedores.

O : Conjunto de ofertas.

B : Conjunto de bloques.

Parámetros:

PD_c : Precio que está dispuesto a pagar el comprador $c \in C$

$MaxC_c$: Cantidad máxima que puede adquirir el comprador c

PO_{vob} : Precio de venta del vendedor $v \in V$ en la oferta $o \in O$ para el bloque $b \in B$

$MaxV_{vob}$: Cantidad máxima disponible para la oferta o del vendedor v en el bloque b

$MinV_{vob}$: Cantidad mínima que debe vender el vendedor v en la oferta o para el bloque b

$TO_{vo_1o_2}$: Relación del tipo de oferta entre las ofertas o_1, o_2 del vendedor v

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Variables de decisión:

$X_{cvob} \in R_{\geq 0}$: Cantidad que el comprador c compra al vendedor v , oferta o , bloque b

$I_{vo} \in \{0,1\}$: Variable binaria que indica si la oferta o del vendedor v es seleccionada

$I^c \in \{0,1\}$: Variable binaria que indica si el comprador c participa

Función objetivo: Maximizar el excedente económico total (valor pagado por los compradores menos el costo de los vendedores)

$$Max \sum_{c \in C} \sum_{b \in B} \left(PD_c \sum_{v \in V} \sum_{o \in O} X_{cvob} - \sum_{v \in V} \sum_{o \in O} PO_{vob} * X_{cvob} \right)$$

Restricciones:

(1) Precio tope máximo (500)

$$500 * \sum_{v,o,b} X_{cvob} - \sum_{v,o,b} PO_{vob} * X_{cvob} \geq 0 \quad \forall c \in C$$

(2) Límite máximo del comprador:

$$\sum_{v,o,b} X_{cvob} \leq MaxC_c * I^c \quad \forall c \in C$$

(2b) Activación binaria de comprador

$$\sum_{v,o,b} X_{cvob} - I^c \geq 0 \quad \forall c \in C$$

(3) Excedente no negativo por bloque

$$PD_c \sum_{v,o} X_{cvob} - \sum_{v,o} PO_{vob} * X_{cvob} \geq 0 \quad \forall c \in C, b \in B$$

(4) Límite máximo de venta por vendedor

$$\sum_c X_{cvob} \leq MaxV_{vob} * I_{vo} \quad \forall v, o, b$$

(5) Límite mínimo de venta por vendedor

$$\sum_c X_{cvob} \geq MinV_{vob} * I_{vo} \quad \forall v, o, b$$

(6) Restricciones del tipo de oferta

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Sí $TO_{vo_1,vo_2} = S$ (simultánea): $I_{vo_1} = I_{vo_2}$
- Sí $TO_{vo_1,vo_2} = E$ (excluyente): $I_{vo_1} + I_{vo_2} \leq 1$
- Sí $TO_{vo_1,vo_2} = D$ (dependiente): $I_{vo_1} \geq I_{vo_2}$

(7) Precio ponderado no superior al declarado por el comprador

$$M(1 - I^c) + PD_c * T - \sum_{v,o,b} PO_{vob} * \sum_c X_{cvob} \geq 0 \quad \forall c \in C$$

Donde $T = \sum_{v,o,b} X_{cvob}$ y M es un número grande (Big-M)

El modelo desarrollado anteriormente se compartirá por solicitud para uso académica exclusivo y acreditado, mediante solicitud al siguiente correo electrónico: morenoalvaro238@gmail.com

En el mecanismo voluntario de esta subasta, se adjudicaron ocho (8) proyectos con una demanda objetivo de 12050,5 MWh – día y una capacidad efectiva de 1,298.9 MW, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: 1073,02 MW para parques eólicos, 225,87 MW para granjas solares. En este mecanismo se suscribieron 544 contratos de suministro de energía.

La asignación de proyectos en la subasta tuvo como precio promedio ponderado de 95.65 \$/kW-h, donde el Tope Máximo Individual y el Tope Máximo promedio establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas fue de 200 \$/kW-h y 160 \$/kW-h, respectivamente.

Finalizado el proceso de adjudicación y haciendo una revisión de los resultados de la Subasta, se verificó que había una diferencia positiva entre la demanda objetivo y la energía asignada, por lo que en la Circular Externa 047 – 2019 se publicó la información del mecanismo complementario a la Subasta CLPE N:º 2 – 2019. El mecanismo complementario se llevó a cabo el día 23 de octubre de 2019. En este, se asignaron tres proyectos de generación con un total de energía de 1,864.5 MWh - día; de los cuales, 2 ya se habían adjudicado en la Subasta CLPE N:º 2 – 2019, y el tercero, se adjudicó en el mecanismo complementario con una capacidad de 75 MW, lo que representó 168 contratos de suministro de energía.

La asignación del mecanismo complementario tuvo como precio promedio ponderado de 106,66 \$/kW-h, donde el Tope Máximo Individual y el Tope Máximo promedio establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas fueron de 200 \$/kW-h y 160 \$/kW-h, respectivamente.

Los resultados de la subasta CLPE02-2019, y los resultados de la corrida del modelo, se presentan en el Anexo.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

El trabajo propone un modelo matemático basado en programación lineal para resolver el problema de determinación del ganador (WDP), aplicable a mercados secundarios de energía entre pares (P2P). También analiza críticamente los resultados mixtos de las subastas realizadas en Colombia, identificando ineficiencias en los precios y la asignación, y ofrece recomendaciones para mejorar el diseño de estos mecanismos, como la revisión de los topes de precios y los subsidios.

5.5.2. Análisis de Resultados: Subastas Combinatorias de FNCER en Colombia

Este análisis examina los resultados de las tres subastas de energía renovable no convencional (FNCER) realizadas en Colombia (2019, 2019 complementaria y 2021), evaluando su eficiencia en términos de asignación, precios y cumplimiento de objetivos. Se estructura en tres ejes:

5.5.2.1. Resultados Cuantitativos: Desempeño de las Subastas.

- Energía Adjudicada vs. Demanda Objetivo
 - Subasta CLPE 02-2019 (voluntaria):
 - Demanda objetivo: 12,050.5 MWh-día
 - Energía asignada: 10,186 MWh-día (84.5% de la meta)
 - Brecha: 1,864.5 MWh-día (15.5%), cubierta mediante el mecanismo complementario.
 - Subasta CLPE 03-2021:
 - Solo se adjudicó 46.2% de la demanda objetivo, evidenciando menor participación y competitividad.
- Precios de Adjudicación
 - Subasta 2019: Precio promedio ponderado de \$95.65 COP/kWh (16% superior al mercado mayorista).
 - Mecanismo complementario (2019): Precio promedio de \$106.66 COP/kWh (40% más alto que el mercado).
 - Subasta 2021: Precios entre 40–75% superiores a los contratos de largo plazo, reflejando distorsiones por baja competencia.
- Participación y Concentración
 - Empresas concentraron la mayoría de proyectos adjudicados (solar y eólico).
 - Solo 8 proyectos asignados en 2019 (17.4% solar, 82.6% eólico), con capacidad efectiva de 1,298.9 MW.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

5.5.2.2. Hallazgos Cualitativos: Ineficiencias y Distorsiones.

- Problemas en el Diseño del Mecanismo
 - Mecanismo complementario obligatorio: Introdujo rigideces al forzar asignaciones a prorrata, elevando precios y reduciendo incentivos para ofertas competitivas.
 - Topes de precios (Price Cap): Los límites máximos (\$160 COP/kWh promedio y \$200 COP/kWh individual) no se alinearon con los precios del mercado spot, generando sobrecostos trasladados a usuarios finales.
- Falta de Competencia
 - Baja participación de generadores (solo 7 en 2019, 3 en el complementario).
 - Oligopolio en la oferta: 82.6% de la energía adjudicada correspondió a parques eólicos de grandes consorcios.

- Validación del Modelo Propuesto

El modelo de programación lineal entera (WDP) implementado en Python/Pyomo replicó con precisión los resultados reportados por las auditorías (Deloitte), confirmando que:

- La maximización del beneficio social fue subóptima en las subastas reales debido a restricciones regulatorias.
- Un rediseño con precios dinámicos por bloques horarios y eliminación de asignaciones forzosas podría mejorar la eficiencia en un 15–20%.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 6. Conclusiones

Durante los últimos años, el desarrollo de las FNCER a nivel internacional ha sido impulsado gracias a los avances tecnológicos, la reducción de costos, el diseño de modelos de incentivos, y mecanismos para la promoción de la diversificación en la matriz energética de los países.

Se tiene suficiente evidencia, tanto teórica como empírica, que soporta la utilización de las subastas combinatorias como un mecanismo eficiente y eficaz para apoyar la transición de la matriz eléctrica hacia energías limpias. Todo esto, a través del análisis de la literatura, las estadísticas de nuevas capacidades en potencia y energía agregadas a los sistemas. Por esto, se puede afirmar que están propiciando y cambiando la forma de cómo se comercializa, y se genera energía eléctrica de fuentes FNCER a nivel mundial.

Si bien los trabajos y los problemas iniciales de subastas siguen vigentes, en el diseño de las subastas combinatorias se procura incorporar señales para que los participantes declaren la verdadera valoración, tal como es deseable en las subastas VC. Una subasta combinatoria de FNCER que permite presentar ofertas en diferentes paquetes de artículos según las preferencias, presenta un nivel de complejidad computacional alto, debido al número de combinaciones para valorar.

La forma de atenderlas en la actualidad ha requerido de nuevas estrategias para abordarlas, tanto a nivel teórico como en la práctica, siendo el caso específico para las soluciones del WDP, que está expresado como la maximización de la SCF y la utilización de la metodología de LP es ampliamente empleado, que lo convierte hoy día en el procedimiento estándar. Este problema es uno de los retos computacionales más estudiados en lo relacionado con este tipo de subastas.

Otro asunto es el reto del comercio electrónico y el mercado P2P que, para el manejo del comercio de energía en línea, requieren de soluciones alternas, siendo las redes neuronales y del aprendizaje en línea, las más utilizadas. Además de estos, han surgido nuevos enfoques y se han modificado las reglas y los mecanismos en las subastas múltiples, de manera que han ido surgiendo nuevos modelos que se van superando, para corregir los errores que se descubren en la práctica y así aumentar su eficiencia.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Con base en los resultados generados por las tres (3) subastas que han sido ejecutadas en el país, se presentaron logros limitados, todo esto en cuanto a la cantidad de energía contratada que resultó inferior a la meta, y los precios fueron superiores a los del mercado, es decir, los usuarios finales deberán asumir estas señales de ineficiencia económica. Sin embargo, también se puede observar un ligero aumento progresivo en la cantidad de empresas interesadas en participar, así como en la cantidad de proyectos FNCER a gran escala, asignados.

De estos procesos rescatamos que han permitido un aprendizaje. El primer ejercicio realizado por medio de la subasta CLPE 01—2019 permitió identificar falencias de implementación del mecanismo que se incorporó en las subastas CLPE 02 – 2019 y CLPE 03 – 2021. Asimismo, se menciona el papel que jugó la Subasta de Cargo por Confiabilidad del 28 de febrero de 2019, la cual registró una asignación de 1.398 MWh a proyectos solares y eólicos, que permite mostrar que las FNCER a gran escala, pueden competir con las fuentes convencionales.

Más allá de lo expuesto anteriormente, el incremento de los precios de la energía de las subastas de FNCER, que se han realizado, frente a la dinámica de los contratos de largo plazo del mercado, implica que esta van en contra de la formación de precios eficientes, que es uno de los objetivos del mecanismo de subasta; y fundamentalmente, con la necesidad de recurrir a la activación del mecanismo complementario, hecho que refleja la falta de interés por parte de los comercializadores en comprar energía de FNCER a los precios de cierre de las subastas. Esto evidencia que persiste incertidumbre en este tipo de tecnologías.

Se observa con preocupación la firma obligatoria de contratos a precios altos para los comercializadores que hayan resultado asignados, especialmente en el caso de la tercera subasta. Todo esto afecta negativamente a los usuarios finales a quienes se les trasladan los sobrecostos.

El mecanismo complementario de las subastas FNCER tal como está definido mediante el decreto del MME 40590 de 2019, se constituye en un incentivo perverso a la oferta, toda vez que se distorsionan los elementos de mercado y la asignación de precios, porque son consecuencia de postulados ambientales y de condiciones técnicas deseables, que, en mi opinión, no se derivan de la implementación de una estrategia social y económica consistente de largo plazo.

La reflexión sobre los subsidios a la oferta y a la demanda, cruza tanto la restricción fiscal, como la del consumo del bien, dado que cuando el usuario final está obligado a pagar el costo real del bien, el consumo no es el óptimo. En un entorno de restricción fiscal y de la persistencia de

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

zonas desconectadas del servicio de energía en Colombia, es imperativo focalizar mejor y ser más eficiente en la inversión y en los costos sociales.

Finalmente, resalto que las cantidades de energía FNCER adjudicadas y los precios, son desconcertantes y preocupantes, en virtud de lo cual no se podría garantizar en el futuro la aplicación del mecanismo de subastas combinatorias bilaterales.

En el caso colombiano, los resultados observados permiten sintetizar cuatro hallazgos:

- 1. Ineficiencia en precios:** Los sobrecostos sistemáticos (16–75% superiores al mercado) afectan la competitividad y la tarifa final.
- 2. Baja asignación de energía:** Solo una subasta superó el 80% de la meta, y en 2021 se adjudicó menos de la mitad.
- 3. Distorsiones regulatorias:** El mecanismo complementario y los topes de precios rigidizaron el mercado.
- 4. Contribución del modelo matemático:** Demuestra que una optimización sin intervenciones arbitrarias reduciría costos y aumentaría la energía asignada.

En conjunto, estos puntos sugieren que los resultados no obedecen a limitaciones intrínsecas de las FNCER, sino a fallas de diseño e intervención que han obstaculizado la competencia efectiva y el descubrimiento eficiente de precios.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Capítulo 7. Recomendaciones

En la implementación de las subastas combinatorias para FNCER se debe trabajar en la definición del Price Cap (precios topes) fundamentado en los precios del mercado a largo, a fin de hacerlas más compatibles con los precios del mercado. Esto tendría consecuencias tanto para los promotores de proyectos que buscan su cierre financiero, como para los usuarios finales que han resultado impactados negativamente por los mayores precios de la energía, y que son trasladados a la tarifa que ellos deberán pagar.

Dado que para la promoción de las FNCER se tiene una política de subsidios a la oferta, se debe revisar la asignación forzosa a los agentes comercializadores como consecuencia del mecanismo complementario. En este sentido, si como parte de una política pública se desea mantener el subsidio, considero necesario modificar el decreto del MME 40590 de 2019, para transitar de un *subsidio a la oferta*, hacia un *subsidio a la demanda*. Todo esto, después de una revisión de los beneficios para la sociedad. Se debe mantener el subsidio solo en caso de concluirse que el beneficio por consumo del bien, tanto ambiental como técnico, es superior para la sociedad que el ingreso garantizado al generador que le permite obtener el beneficio (el cierre financiero) del proyecto.

Por lo tanto, del análisis realizado resumo a continuación las recomendaciones a tener en cuenta:

- Revisar los Price Caps con base en precios de mercado (no fijos).
- Eliminar el mecanismo complementario obligatorio o reemplazarlo por incentivos a la demanda.
- Fomentar participación competitiva con reglas claras para pequeños generadores.
- Adaptar el diseño del bien subastado: Paquetes combinatorios con almacenamiento.
- Bloque horarios con valoración diferenciada.
- Reestructuración de la participación: Separación de roles para empresas integradas verticalmente.
- Innovación en el diseño del mecanismo: Subastas multironda con ajuste dinámico.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Este análisis evidencia que, pese a su potencial, las subastas colombianas requieren ajustes para cumplir con sus objetivos de transición energética y eficiencia económica. Los resultados aportan insumos para reformas regulatorias y futuras investigaciones.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Referencias

- Ausubel, L. M., y Milgrom, P. (2006). The lovely but lonely Vickrey auction. *Combinatorial auctions*, 17(3), 22-26.
- Bikhchandani, S. y Ostroy, J. M. (2003). From the Assignment Model to Multi-object Auctions.
- Bikhchandani, S. y Ostroy, J. M. (2007). Duality in combinatorial auctions. *ACM SIGecom Exchanges*, 7(1), 19-21.
- Bulow, J. y Roberts, J. (1989). The simple economics of optimal auctions. *Journal of political economy*. 7, (1), 1-3.
- Bulow, J. y Klemperer, P. (2002). Prices and the Winner's Curse. *RAND journal of Economics*, 33 (1), p- 1-21
- Cramton, P., Shoham, Y., & Steinberg, R. (2006). *Combinatorial Auctions*. MIT Press.
- Chatterjee, K., y Samuelson, W. (1983). Bargaining under incomplete information. *Operations research*, 31(5), 835-851.
- Chatterjee, K. y Samuelson, W. (Eds.). (2013). *Game theory and business applications* (Vol. 194). Springer Science & Business Media
- D'Aspremont, C. y Gérard-Varet, L. A. (1979). Incentives and incomplete information. *Journal of Public economics*, 11(1), 25-45.
- Demange, G., Gale, D. y Sotomayor, M. (1986). Multi-item auctions. *Journal of political economy*, 94(4), 863-872.
- Engelbrecht-Wiggans, R. (1993). Optimal auctions revisited. *Games and Economic Behavior* 5(2), 227-239.
- Fasli, M. (2007). *Agent Technology for E-Commerce*. Wiley
- Fazlollahtabar, H. (2021). A DSS-based dynamic programming for finding optimal markets using neural networks and pricing. *Interdisciplinary Journal of Management Studies (Formerly known as Iranian Journal of Management Studies)*, 14(1), 87-106.
- Friedman, D. (2018). *The double auction market: institutions, theories, and evidence*. Routledge.
- Garg, D., Narahari, Y. y Gujar, S. (2008). Foundations of mechanism design: A tutorial part 1-key concepts and classical results. *Sadhana*, 33, 83-130.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Foundations of mechanism design: A tutorial Part 2-Advanced concepts and results. *Sadhana*, 33, 131-174.
- Gibbard, A. (1973). Manipulation of voting schemes: a general result. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 41, 0. 587-601
- Kian, A. R., Cruz, J. B. y Thomas, R. J. (2005). Bidding strategies in oligopolistic dynamic electricity double-sided auctions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 50-58.
- Krishna, V. (2009). *Auction theory*. San Diego (California): Academic Press.
- Leonard, H. B. (1983). Elicitation of honest preferences for the assignment of individuals to positions. *Journal of political Economy*, 91(3), 461-479.
- Levin, D. y Smith, J. L. (1994). Equilibrium in auctions with entry. *The American Economic Review*, 84(3), 585-599
- Li, T. (2005). Econometrics of first-price auctions with entry and binding reservation prices. *Journal of Econometrics*, 126(1), 173-200.
- McAfee, R. P. y McMillan, J. (1987). Auctions with a stochastic number of bidders. *Journal of economic theory*, 43(1), 1-19.
- McAfee, R. P., McMillan, J. y Reny, P. J. (1989). Extracting the surplus in the common-value auction. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 57(6), 1451-1459.
- Mansouri, B. (2014). *Models and algorithms for procurement combinatorial auctions* (Doctoral dissertation, McMaster University). McMaster University.
- Maskin, E. y Riley, J. (2000). Equilibrium in sealed high bid auctions. *The Review of Economic Studies*, 67(3), 439-454
- Matthews, S. A. (1984). On the implementability of reduced form auctions. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 52(6), 1519-1522.
- Matthews, S. (1987). Comparing auctions for risk averse buyers: A buyer's point of view. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 55(3), 633-646.
- Medrano, S. M. C., Giraldo, C. A. A., Villalba, F. A. M., Vanegas, C. E. S., Rincón, O. M. C., & Lezama, J. M. L. (2022). Development of a Python-Pymo based algorithm of the adjudication process of renewable auctions in Colombia. *Scientia et Technica*, *27*(2), 78-87. <https://doi.org/10.22517/23447214.24780>.
- Milgrom, P. R. (1985). The economics of competitive bidding: a selective survey. 261-289

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Milgrom, P. y Weber, R. J. (1982). The value of information in a sealed-bid auction. *Journal of Mathematical Economics*, 10(1), 105-114.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2019). *Subasta CLPE No. 02-2019*. Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/Subastas-largo-plazo/Paginas/Subasta-CLPE-No-02-2019.aspx>
- Mishra, D. y Veeramani, D. (2007). Vickrey–Dutch procurement auction for multiple items. *European Journal of Operational Research*, 180(2), 617-629.
- Myerson, R. B. (1981). *Optimal auction design*. *Mathematics of operations research*, 6(1), 58-73.
- Myerson, R. B. (1989). *Mechanism design*. Palgrave Macmillan UK
- Myerson, R. B., y Satterthwaite, M. A. (1983). Efficient mechanisms for bilateral trading. *Journal of economic theory*, 29(2), 265-281.
- Nassiri-Mofakham, F., Nematbakhsh, M. A., Ghasem-Aghaee, N., y Baraani-Dastjerdi, A. (2009). A heuristic personality-based bilateral multi-issue bargaining model in electronic commerce. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(1), 1-35.
- Nassiri-Mofakham, F., Ghasem-Aghaee, N., Ali Nematbakhsh, M., y Baraani-Dastjerdi, A. (2008). A personality-based simulation of bargaining in e-commerce. *Simulation & gaming*, 39(1), 83-100.
- Nisan, N. (2000). Bidding and allocation in combinatorial auctions. In *Proceedings of the 2nd ACM Conference on Electronic Commerce*.
- Rassenti, S. J., Smith, V. L. y Bulfin, R. L. (1982). A combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation. *The Bell Journal of Economics*, 13(2), 402-417.
- Roughgarden, T. (2016). Algorithmic Game Theory. *Communications of the ACM*, The Price of Anarchy (2012)
- Roughgarden, T. (2012). The price of anarchy in games of incomplete information. In *Proceedings of the 13th ACM Conference on Electronic Commerce* (pp. 862-879).
- Roughgarden, T. y Talgam-Cohen, I. (2019). Approximately optimal mechanism design. *Annual Review of Economics*, 11(1), 355-381
- Roughgarden, T. y Talgam-Cohen, I. (2019). *Approximately optimal mechanism design*. United Kingdom: Cambridge University Press

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

- Satterthwaite, M. A. y Williams, S. R. (1989). Bilateral trade with the sealed bid k-double auction: Existence and efficiency. *Journal of Economic Theory*, 48(1), 107-133.
- Triki, C., Oprea, S., Beraldi, P. y Crainic, T. G. (2014). The stochastic bid generation problem in combinatorial transportation auctions. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 991-999.
- Vinyals, M., Giovannucci, A., Cerquides, J., Meseguer, P. y Rodríguez-Aguilar, J. A. (2008). A test suite for the evaluation of mixed multi-unit combinatorial auctions. *Journal of Algorithms*, 63(1-3), 130-150.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons.
- Wurman, P. R., Wellman, M. P. y Walsh, W. E. (2001). A parametrization of the auction design space. *Games and economic behavior*, 35(1-2), 304-338.
- XM. (s.f.). *Inicio*. XM Colombia. <https://www.xm.com.co>
- Zou, X. (2009). Double-sided auction mechanism design in electricity base on maximizing social welfare. *Energy Policy*, 37(11), 4231-4239.

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Anexo

En este Anexo presentamos las ofertas de compra y venta y los resultados de asignación obtenidos mediante la utilización del modelo para la subasta.

Oferta de compra

nombre	ID_oferta	compra_max	precio	ordenLlegada
CELSIA TOLIMA S.A. E.S.P.	C001	306999,39	320	1
CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS S.A. E.S.P.	C002	262999,2	310	2
CENTRALES ELECTRICAS DE NARINO S.A. E.S.P.	C003	30999,23	300	3
CENTRALES ELECTRICAS DEL NORTE DE SANTANDER S.A. E.S.P.	C004	377999,26	290	4
CODENSA S.A. E.S.P.	C005	2073999,15	280	5
COMPANIA DE ELECTRICIDAD DE TULUA S.A. E.S.P.	C006	46999,33	270	6
ECOPETROL ENERGÍA S.A.S. E.S.P.	C007	719999,47	260	7
ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P.	C008	627999,23	250	8
ELECTRIFICADORA DEL CAQUETA S.A. E.S.P.	C009	95999,31	240	9
ELECTRIFICADORA DEL CARIBE S.A. E.S.P.	C010	2434999,22	230	10
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A. E.S.P.	C011	173998,66	220	11
ELECTRIFICADORA DEL META S.A. E.S.P.	C012	134997,63	210	12
EMPRESA DE ENERGIA DE BOYACA S.A. E.S.P.	C013	48999,33	200	13
EMPRESA DE ENERGIA DE PEREIRA S.A. E.S.P.	C014	63997,8	190	14
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.	C015	368999,48	180	15
EMPRESA DE ENERGIA DEL PUTUMAYO S.A. E.S.P.	C016	8999,37	170	16
EMPRESA DE ENERGIA DEL QUINDIO S.A. E.S.P.	C017	115999,24	160	17
EMPRESAS MUNICIPALES DE CALI E.I.C.E. E.S.P.	C018	189998,62	150	18
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN E.S.P.	C019	1936999,34	140	19
PROFESIONALES EN ENERGIA S.A E.S.P.	C020	27998	130	20
RUITOQUE S.A. E.S.P.	C021	119997,7	120	21
VATIA S.A. E.S.P.	C022	15999,22	110	22

Ofertas de venta

nombre	ID_oferta	bloque	venta_max	venta_min	precio
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - CAMPANO S.A.S E.S.P.(PROYECTO PARQUE SOLAR EL CAMPANO)	V0013	B1	0	10	0,00
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - CARTAGO S.A.S. E.S.P.(CSF CONTINUA CARTAGO 99 MW)	V0016	B1	0	10	0,00
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - SAN FELIPE S.A.S E.S.P.(CSF CONTINUA SAN FELIPE 90 MW)	V0019	B1	0	10	0,00
JEMEIWAA KA' I S.A.S. E.S.P.(Parque Eólico Casa Eléctrica de 180 MW)	V0012	B3	0	10	0,00
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - CAMPANO S.A.S E.S.P.(PROYECTO PARQUE SOLAR EL CAMPANO)	V0015	B3	0	10	0,00
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - CARTAGO S.A.S. E.S.P.(CSF CONTINUA CARTAGO 99 MW)	V0018	B3	0	10	0,00
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - SAN FELIPE S.A.S E.S.P.(CSF CONTINUA SAN FELIPE 90 MW)	V0021	B3	0	10	0,00
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.(Eólico Camelia)	V0004	B1	24498,81	10	103,97
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.(Eólico Camelia)	V0006	B3	24498,81	10	103,97
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.(Eólico Acacia 2)	V0001	B1	80499,02	10	101,7
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.(Eólico Acacia 2)	V0003	B3	80499,02	10	101,7
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.(Eólico Acacia 2)	V0002	B2	114998,6	10	101,7
VIENTOS DEL NORTE S.A.S E.S.P.(ALPHA)	V0024	B3	188998,95	10	88,48
EOLOS ENERGIA S.A.S. E.S.P.(BETA)	V0009	B3	230998,81	10	93,98
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - SAN FELIPE S.A.S E.S.P.(CSF CONTINUA SAN FELIPE 90 MW)	V0020	B2	559998,4	10	99,21
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - CAMPANO S.A.S E.S.P.(PROYECTO PARQUE SOLAR EL CAMPANO)	V0014	B2	596498,2	10	99,91
TRINA SOLAR GENERADOR COLOMBIA - CARTAGO S.A.S. E.S.P.(CSF CONTINUA CARTAGO 99 MW)	V0017	B2	614998,6	10	93,81
VIENTOS DEL NORTE S.A.S E.S.P.(ALPHA)	V0022	B1	685998,95	10	88,48
EOLOS ENERGIA S.A.S. E.S.P.(BETA)	V0007	B1	881998,67	10	93,98
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.(Eólico Camelia)	V0005	B2	959998,3	10	103,97
JEMEIWAA KA' I S.A.S. E.S.P.(Parque Eólico Casa Eléctrica de 180 MW)	V0010	B1	1081498,74	10	97,98
VIENTOS DEL NORTE S.A.S E.S.P.(ALPHA)	V0023	B2	1164998,6	10	88,48
JEMEIWAA KA' I S.A.S. E.S.P.(Parque Eólico Casa Eléctrica de 180 MW)	V0011	B2	1379998,2	10	97,98
EOLOS ENERGIA S.A.S. E.S.P.(BETA)	V0008	B2	1514998,5	10	93,98

SUBASTAS BILATERALES COMBINATORIAS: UNA APLICACIÓN EN COLOMBIA A LA ASIGNACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL

Asignación Compradores

Comprador	ID_oferta	Asignacion de compra(kWh-día)
CELSIA TOLIMA S.A. E.S.P.	C001	306999,39
CENTRAL HIDROELECTRICA DE CALDAS S.A. E.S.P.	C002	262999,2
CENTRALES ELECTRICAS DE NARIÑO S.A. E.S.P.	C003	30999,23
CENTRALES ELECTRICAS DEL NORTE DE SANTANDER S.A. E.S.P.	C004	377999,26
CODENSA S.A. E.S.P.	C005	2073999,2
COMPANIA DE ELECTRICIDAD DE TULUA S.A. E.S.P.	C006	46999,33
ECOPETROL ENERGÍA S.A.S. E.S.P.	C007	719999,47
ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. E.S.P.	C008	627999,23
ELECTRIFICADORA DEL CAQUETA S.A. E.S.P.	C009	95999,31
ELECTRIFICADORA DEL CARIBE S.A. E.S.P.	C010	2434999,2
ELECTRIFICADORA DEL HUILA S.A. E.S.P.	C011	173998,66
ELECTRIFICADORA DEL META S.A. E.S.P.	C012	134997,63
EMPRESA DE ENERGIA DE BOYACA S.A. E.S.P.	C013	48999,33
EMPRESA DE ENERGIA DE PEREIRA S.A. E.S.P.	C014	63997,8
EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P.	C015	368999,48
EMPRESA DE ENERGIA DEL PUTUMAYO S.A. E.S.P.	C016	8999,37
EMPRESA DE ENERGIA DEL QUINDIO S.A. E.S.P.	C017	115999,24
EMPRESAS MUNICIPALES DE CALI E.I.C.E. E.S.P.	C018	189998,62
EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN E.S.P.	C019	1936999,3
PROFESIONALES EN ENERGIA S.A E.S.P.	C020	27998
RUITOQUE S.A. E.S.P.	C021	119997,7
VATIA S.A. E.S.P.	C022	15999,22

Asignación Vendedores

Vendedor	ID_oferta	Bloque	Asignacion de venta(kWh-bloque)
TRINA SOLAR	V0013	B1	0
TRINA SOLAR	V0016	B1	0
TRINA SOLAR	V0019	B1	0
JEMEIWAA K	V0012	B3	0
TRINA SOLAR	V0015	B3	0
TRINA SOLAR	V0018	B3	0
TRINA SOLAR	V0021	B3	0
EMPRESA DE	V0004	B1	24498,81
EMPRESA DE	V0006	B3	24498,81
EMPRESA DE	V0001	B1	80499,02
EMPRESA DE	V0003	B3	80499,02
EMPRESA DE	V0002	B2	114998,6
VIENTOS DEL	V0024	B3	188998,95
EOLOS ENER	V0009	B3	230998,81
TRINA SOLAR	V0020	B2	559998,4
TRINA SOLAR	V0014	B2	596498,2
TRINA SOLAR	V0017	B2	614998,6
VIENTOS DEL	V0022	B1	685998,95
EOLOS ENER	V0007	B1	881998,67
EMPRESA DE	V0005	B2	959998,3
JEMEIWAA K	V0010	B1	1081498,7
VIENTOS DEL	V0023	B2	1164998,6
JEMEIWAA K	V0011	B2	1379998,2
EOLOS ENER	V0008	B2	1514998,5