

Auctions for Distributed Energy Resource for Electric Utilities

Subastas de Recursos Energéticos Distribuidos para Empresas Eléctricas de Distribución

D. Arias¹

P. Gavela²

W. Intriago³

¹Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Facultad de Postgrado, Departamento de Maestría en Gestión de Energías Renovables, San Pedro Sula, Honduras, 21101, Universidad Técnica de Cotopaxi
E-mail: diego.arias@unitec.edu, diego.arias9130@utc.edu.ec

²Escuela Politécnica Nacional
E-mail: ximena.gavela@epn.edu.ec

³Agencia de Regulación y Control de Energía
E-mail: edison.intriago@controlrecursosyenergia.gob.ec

Abstract

This article proposes a methodology to auction distributed generation projects, based on the solution of a simplified mixed-integer optimization problem (MILP- *Mixed-integer linear programming - MILP*) that assigns the accepted projects for their incorporation in the Companies of Distribution (ED).

The optimization problem selects the optimal projects by activating a binary variable, which considers as a restriction the maximum capacity of energy and power pre-established for the auction process, based on previous planning. For this purpose, an application (APP) with a graphical interface is also developed that facilitates the user to enter data and analyze the results.

Index terms— Auctions, Tenders, Energy Resources Distributed (DER), Distributed Generation, MILP.

Resumen

En este artículo se propone una metodología para la subasta de proyectos de generación distribuida, con base a la solución de un problema de optimización entero mixto (*Mixed-integer linear programming - MILP*) simplificado que asigna los proyectos aceptados para ser incorporados en las Empresas de Distribución (ED).

El problema de optimización selecciona los proyectos óptimos mediante la activación de una variable binaria, que considera como restricción la capacidad máxima de energía y potencia preestablecida para el proceso de subasta, con base a una planificación previa. Para el efecto se desarrolla además una aplicación (APP) con interfaz gráfica que facilita al usuario el ingreso de datos y el análisis de resultados.

Palabras clave— Subastas, Licitaciones, Recursos de Generación Distribuida, Generación Distribuida, MILP.

Recibido: 31-10-2021, Aprobado tras revisión: 18-01-2022

Forma sugerida de citación: Arias D., Gavela, X. Intriago, W. (2021). "Subastas de recursos energéticos distribuidos para Empresas Eléctricas de Distribución" Revista Técnica "*energía*". No. 18, Issue II, Pp. 85-90

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2022 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la planificación de la expansión de los sistemas eléctricos viene evolucionando y experimentando cambios, que se reflejan en nuevas formas de expansión y que constituyen un reto importante para los planificadores, quienes no solo deben considerar el desarrollo de grandes proyectos de generación, sino también la incorporación de generación de pequeña escala embebida en las redes de distribución, con el objetivo de dar solución a problemas puntuales que surgen de estos sistemas, como por ejemplo, el control de niveles de voltaje, reducción de pérdidas técnicas, la atención de usuarios alejados, entre otros [1]–[4].

Dentro de las consideraciones más aceptadas por diversos autores sobre la Generación Distribuida (GD) se tiene que [5][6]:

- La producción de electricidad se realiza con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico y que no están sujetas a despacho centralizado; y,
- La potencia de las instalaciones es reducida, comúnmente por debajo de 1000 kW, aunque se pueden manejar capacidades mayores.

Estos dos aspectos, no son temas menores, sino que justamente son los aspectos que imponen los mayores retos a los planificadores, quienes no solo deben evaluar desde el ámbito técnico las implicaciones técnicas y económicas que conlleva la incorporación de GD, sino también, dentro del enfoque descentralizado, determinar el modelo regulatorio para la habilitación de este tipo de generación, así como las condiciones comerciales y operativas para su participación, con el fin aprovechar de manera óptima todos los beneficios técnicos, económicos y ambientales que representa esta generación para el sector eléctrico de cualquier país.

A nivel internacional se han desarrollado diversos estudios relacionados con criterios para toma de decisiones sobre la expansión de GD; dentro de estado del arte destacan trabajos como el de [7] y [8], quienes proponen el mecanismo Vickrey-Clark-Groves (VCG) para la asignación de GD, bajo el criterio del beneficio social, lo cual permite abordar aspectos importantes que enfrenan los promotores de proyectos de GD, como la incertidumbre de los costos, dado que modelos los comerciales a menudo buscan proteger al usuario de las implicaciones económicas dadas por la complejidad técnica detrás de tecnologías, así como de las estrategias de licitación.

Dentro de este contexto, queda en evidencia la necesidad de desarrollar mecanismos simplificados o al menos complejos de asignación de GD. En este sentido, se identifica la potencialidad del mecanismo de subastas para la incorporación de nuevos proyectos, ya que las mismas pueden ser evaluadas con distintos criterios, que

hoy en día rempazan a mecanismos que se usaron en etapas incipientes del desarrollo de la energía renovable, como el del Feed-in tariff (FIT), que constituyó un importante subsidio para las tecnologías renovables en diferentes países del mundo [9]–[12].

Dentro de los beneficios de las subastas, se identifica el fomento de una mayor penetración de GD con energía renovable, bajo un proceso competitivo que ayuda a reducir o descubrir los costos reales de la energía de los proyectos licitados [13]. Las subastas impulsan la competencia entre los licitadores, que pueden ser productores o consumidores. Para un productor, dentro de su función de ganancia está el beneficio que resulta del precio, la cantidad de electricidad vendida en la subasta y los costos de producirla. Los costos son diferentes para cada productor y dependen del tipo de central eléctrica: la eficiencia de las centrales eléctricas y los precios del combustible y otros factores de entrada son información privada [14][15].

No obstante, la decisión sobre la capacidad y precio óptimo de este tipo de generación no es una tarea sencilla, sino que requiere de la implementación de un proceso sistematizado de análisis que ayude al planificador a tomar la decisión sobre los proyectos de GD que se implementarán, de lo contrario una mala decisión sobre la incorporación de GD sin ningún criterio generaría más problemas de los que se busca resolver.

Bajo estos antecedentes, en este artículo se analiza una metodología completa para el proceso de subasta de proyectos de generación distribuida, dentro del cual se incluye la solución de un problema optimización entero mixto (Mixed-Integer Linear Programming - MILP) simplificado que toma la decisión sobre la subasta de proyectos de GD con tecnologías neutras a ser incorporados en las Empresas de Distribución (ED). Se desarrolla además una aplicación (APP) con interfaz gráfica que facilita al usuario el ingreso de datos y el análisis de resultados.

Para el efecto el documento se ha estructurado de la siguiente manera: En la sección II se presenta la formulación matemática del modelo de optimización MILP, la sección III muestra la metodología aplicada, en la sección IV se presenta el caso de estudio y análisis de resultados. En la sección V se presentan las conclusiones del trabajo.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

La formulación matemática del problema para la selección óptima de los proyectos que serán subastados como proyectos de GD, se ajusta a un problema de optimización lineal entero-mixto (Mixed-Integer Linear Programming - MILP), cuya función objetivo es la minimización de la sumatoria de los bloques de energía y precios por la energía de cada proyecto "i" asociado a una variable binaria x_i .

Las restricciones (2) y (3) representan los límites máximos en energía ED_{max} y potencia P_{max} que la distribuidora dispone para el proceso de subasta.

Función Objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^{Pr} BE_i Pe_i x_i \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{Pr} BE_i \cdot x_i \geq ED_{max} \quad \text{Restricción Energética} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{Pr} P_i \cdot x_i \geq P_{max} \quad \text{Restricción de Potencia} \quad (3)$$

$$Pe_i \leq Pm \quad \forall Pe \dots \quad \text{Restricción de Precio} \quad (4)$$

La restricción (4) evita que proyectos que superen un precio máximo (price cap) resulten seleccionados.

Los bloques de energía se calculan considerando el factor de planta de cada tecnología y el número de horas en el año.

$$BE_i = P_i \cdot fp_i \cdot 8760 \quad (5)$$

Donde:

- BE_i Bloques de energía de proyecto i [MWh]
- Pe_i Precio de energía para proyecto i [USD/MWh]
- x_i Variable binaria para selección de proyectos i (0 – 1)
- P_i Potencia de cada proyecto i [MW]
- ED_{max} Energía máxima de la Empresa Distribuidora (ED) definida previamente a la subasta [MWh]
- P_{max} Capacidad máxima de potencia de la Distribuidora definida a considerar en la subasta [MW]
- Pr Cantidad de proyectos considerados en la subasta
- fp_i Factor de planta de proyecto i
- 8760 Horas en el año
- Pm Precio máximo (Price Cap) [USD/MWh]

3. METODOLOGÍA

3.1. Premisas consideradas para la Subasta

La metodología considera las siguientes premisas para la subasta:

- Los proyectos de generación distribuida tendrán despacho preferente (auto despachadas).
- Durante el desarrollo del proceso de subasta, se requiere definir por la entidad responsable del proceso, la capacidad máxima autorizada, en potencia y energía, para la licitación de proyectos.
- La empresa distribuidora debe definir la capacidad máxima autorizada, en potencia y energía, para la licitación de proyectos.
- Se tiene una fecha preestablecida para la subasta, en la cual ya se tendrán disponibles los proyectos calificados para el proceso.

- El tipo de subasta considerada es del tipo neutra, es decir podrán competir entre diferentes tecnologías de generación.
- El ente rector, regulador o entidad que se designe definirá un “Price Cap” de la subasta.

3.2. Proceso de Subasta

Considerando las premisas del numeral anterior se establece el procedimiento en la Fig. 1.

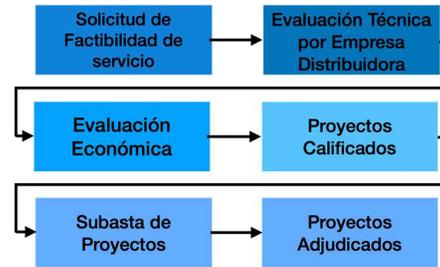


Figura 1. Procedimiento de Subasta

En la evaluación técnica la Empresa Distribuidora realizará los análisis para verificar si el proyecto de GD tiene algún impacto que impida su conexión en el PCC (*Point of Common Coupling*). Generalmente los estudios verifican: capacidad de cortocircuito, capacidad de corriente, niveles y balance de voltaje.

En la evaluación económica se verificará que los proyectos ofertados tengan un precio menor al Price Cap definido previamente.

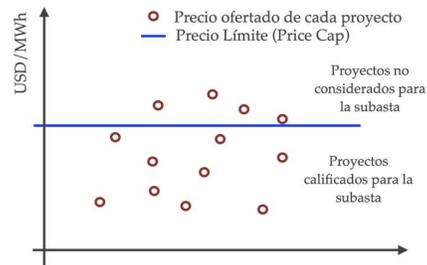


Figura 2. Price Cap

Los proyectos que cumplan la evaluación técnica y económica están calificados para participar en el proceso de subasta con el problema de optimización. Como resultado del MILP se obtiene las variables binarias que indican los proyectos seleccionados.

3.3. Metodología para el Problema de Optimización para Subasta

Los pasos para la solución del problema de optimización se presentan en la Tabla 1.



Tabla 1: Pasos para proceso de optimización para selección de Proyectos

Paso 1	Las opciones de proyectos de GD a subastar, se reduce a los proyectos previamente calificados técnica y económica
Paso 2	Considerar límites máximos para restricciones, derivadas de la planificación del sector eléctrico: <ul style="list-style-type: none"> • Precio máximo • Energía Máxima de la ED • Capacidad Máxima de Potencia de la ED
Paso 3	Adquirir datos del paso 1 y 2 para el problema de Optimización MILP
Paso 4	Problema de Optimización MILP
Paso 5	Obtener resultados: proyectos seleccionados por el problema MILP.

En la Fig. 3 se muestra la interfaz que se usa para la toma de datos de Excel, problema de optimización MILP e interfaz gráfica mediante un aplicativo en el software Matlab.

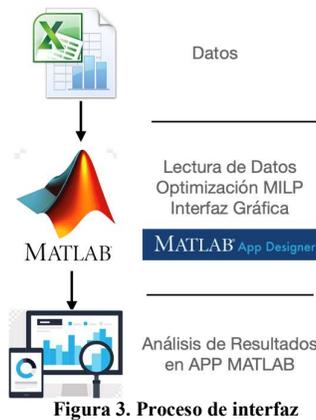


Figura 3. Proceso de interfaz

4. CASO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Caso de Estudio

El caso de estudio se conforma de 15 proyectos menores a 5 MW, los cuales fueron calificados, y pasaron las pruebas con las características mostradas en la Tabla 2.

Al sumar la potencia y energía de todos los proyectos que calificaron para participar en la subasta se obtiene los valores de la Tabla 3.

Tabla 3: Potencia y energía total ofertada por los proyectos

Parámetro	Valores
Σ de Potencia ofertada por todos los proyectos [MW]	35.5
Σ de Energía ofertada por todos los proyectos [GWh]	222.784

Tabla 2: Datos de los Proyectos calificados

Proyectos	Potencia de los Proyectos [MW]	Factor de Planta [%]	Energía Anual [MWh]	Precios de Energía ofertada [USD /MWh]
Proyecto 1	0.9	80%	6307.2	56
Proyecto 2	5.0	70%	30660	60
Proyecto 3	0.8	20%	1401.6	40
Proyecto 4	3.0	80%	21024	105
Proyecto 5	0.7	40%	2452.8	50
Proyecto 6	4.0	75%	26280	55
Proyecto 7	0.9	30%	2365.2	70
Proyecto 8	5.0	65%	28470	65
Proyecto 9	0.5	40%	1752	45
Proyecto 10	4.0	85%	29784	80
Proyecto 11	0.4	18%	630.72	100
Proyecto 12	2.0	70%	12264	110
Proyecto 13	3.0	90%	23652	120
Proyecto 14	4.5	80%	31536	70
Proyecto 15	0.8	60%	4204.8	65

Los límites de Energía y Potencia prestablecidos para la Empresa Distribuidora que se plantean en el caso de estudio son los mostrados en la Tabla 4:

Tabla 4: Límites máximos del problema

Parámetro	Valores
Potencia máxima permitida subastar para la Empresa Distribuidora [MW]	25
Energía máxima permitida subastar para la Empresa Distribuidora [GWh]	150

En la Fig. 4 se muestra los datos en el aplicativo creado en Matlab, el cual permite importar los datos desde un archivo Excel, o pueden ser ingresados manualmente. Mediante el botón “Resolver la subasta” se inicia la resolución del problema de optimización lineal entero mixto.

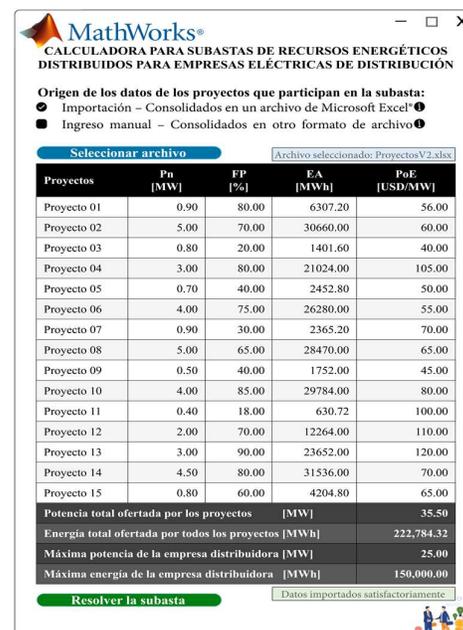


Figura 4. Datos en el Aplicativo de Subasta

4.2. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos del problema de optimización lineal entero mixto, son los mostrados en la Tabla 5, en la cual han sido seleccionados 9 proyectos de los 15 que fueron calificados:

Tabla 5: Resultados: Proyectos Seleccionado

Proyectos	Variable Binaria x_i	Potencia de los Proyectos [MW]	Energía a Anual [MWh]	Ingresos Anuales por Energía [USD]
Proyecto 1	0	0.9	0	0
Proyecto 2	1	5.0	30660	1839600
Proyecto 3	1	0.8	1401.6	56064
Proyecto 4	0	3.0	0	0
Proyecto 5	0	0.7	0	0
Proyecto 6	1	4.0	26280	1445400
Proyecto 7	1	0.9	2365.2	165564
Proyecto 8	1	5.0	28470	1850550
Proyecto 9	1	0.5	1752	78840
Proyecto 10	1	4.0	29784	2382720
Proyecto 11	1	0.4	630.72	63072
Proyecto 12	0	2.0	0	0
Proyecto 13	0	3.0	0	0
Proyecto 14	1	4.5	31536	2207520
Proyecto 15	0	0.8	0	0

La función objetivo evaluada con los resultados obtiene una minimización de los costos de 10,089.33 MUSD. La energía y potencia total adjudicada es la mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados: Potencia y Energía adjudicadas en la ED

Parámetro	Valores
Potencia adjudicada para la ED[MW]	25.1
Energía adjudicada para la ED [GWh]	152.879

En la Fig. 5 se muestra los resultados en el aplicativo APP creado en Matlab, el cual permite visualizar los proyectos seleccionados que resultaron de la resolución del problema de optimización lineal entero mixto (MILP). Mediante el botón “Resolver otra subasta” se puede reiniciar el aplicativo para otra subasta.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se presenta una metodología para subastar proyectos de Generación Distribuida (GD), con base a la solución de un problema de optimización lineal entero mixto (MILP- *Mixed-integer linear programming*) simplificado para incorporar GD en los sistemas eléctricos de Distribución. El problema de optimización selecciona los proyectos óptimos mediante la activación de una variable binaria, considerando como restricción del problema, la capacidad máxima de energía y potencia que la Empresa Distribuidora tendría prestablecido, con base a una planificación sistémica.

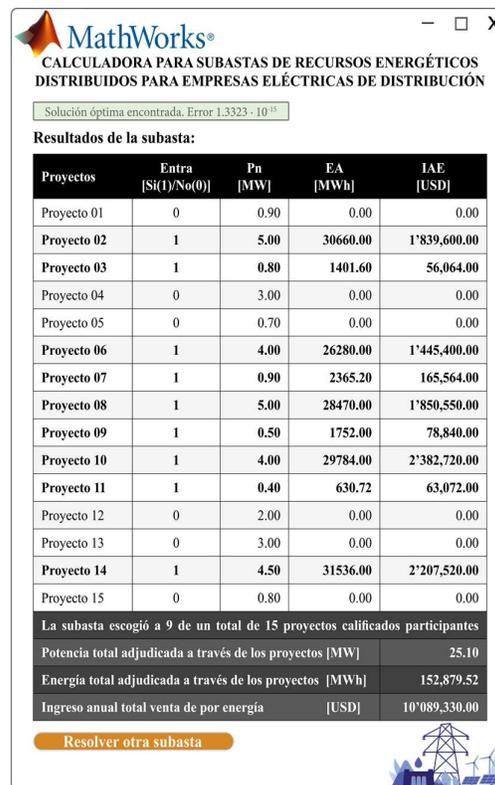


Figura 5. Resultados en el Aplicativo de Subasta

El modelo propuesto fomenta una mayor penetración de GD con energía renovable y de forma descentralizada, pero al ser un proceso competitivo también ayuda a reducir los costos de la energía de los proyectos licitados.

El problema fue aplicado a un caso de estudio en el cual se analizan los resultados y se validan los objetivos propuestos, permitiendo seleccionar los proyectos óptimos para el sistema, a través de un ambiente amigable de la aplicación (APP) desarrollada con interfaz gráfica facilita al usuario el ingreso de datos y el análisis de resultados.

Los retos y trabajos futuros se orientan a la incorporación de restricciones adicionales en el problema de optimización, como la curva de demanda horaria o curva de duración con resolución horaria, restricciones por tecnología, restricciones de cantidad de bloques de energía por oferente, ofertas agrupadas, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la *Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC)* de San Pedro Sula - Honduras por la apertura a las cátedras y al desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] D. Arias Cazco, R. A. Robayo Vasco, and L. Ortiz Matos, “Novel intelligent Step Voltage Regulator



- (SVR) for residential electrical connections,” IEEE Lat. Am. Trans., vol. 14, no. 4, pp. 1656–1661, 2016.
- [2] S. J. Huang, C. W. Hsieh, and H. H. Wan, “Confirming the permissible capacity of distributed generation for grid-connected distribution feeders,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 30, no. 1, pp. 540–541, 2015.
- [3] A. Keane et al., “State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1493–1502, 2013.
- [4] J. M. Sexauer and S. Mohagheghi, “Voltage quality assessment in a distribution system with distributed generation—a probabilistic load flow approach,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 28, no. 3, pp. 1652–1662, 2013.
- [5] IEEE Standard Association, IEEE Std. 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. 2018.
- [6] S. O. VELÁSQUEZ M., “GENERACIÓN DISTRIBUIDA. EL PAPEL EN LA AMPLIACIÓN DEL ACCESO A LA ENERGÍA,” ARIAE, p. Capítulo 13, 1-11, 2008.
- [7] T. Greve and M. G. Pollitt, “A future auction mechanism for distributed generation,” Energy Policy Res. Gr., no. March, pp. 1–15, 2016.
- [8] J. Xu and X. He, “Design of double auction mechanism based on social network,” IEEE Access, vol. 8, pp. 8324–8335, 2020.
- [9] L. Barroso, Y. Haffejee, T. Laabi, N. Saimi, and R. Mitma Ramirez, “Renewable Energy Auctions in Developing Countries,” IRENA, pp. 1–52, 2013.
- [10] IRENA - International Renewable Energy Agency, “Renewable Energy Auctions,” IRENA, 2017.
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable Energy Auctions,” Renewable energy auctions: Status and trends beyond price, pp. 1–102, 2019.
- [12] L. Viscidi and A. Yépez, “Energía Limpia, Subastas en America Latina,” Banco Interamericano de Desarrollo, pp. 1–59, 2020.
- [13] C. Rosen and R. Madlener, “An auction mechanism for local energy markets: Results from theory and simulation,” 2012 IEEE Work. Complex. Eng. COMPENG 2012 - Proc., pp. 43–46, 2012.
- [14] S. Schone, Auctions in the Electricity Market, Bidding when Production Capacity Is Constrained, vol. 614. Berlin, 2008.

- [15] L. Maurer and L. Barroso, Electricity Auctions, An overview of efficient practices. The world bank, 2011.



Diego A. Arias Cazco.- Nació en Riobamba, Ecuador, el 12 de septiembre de 1980. Recibió el título de ingeniero en Electromecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2006. Obtuvo un diploma en redes digitales industriales en Ecuador, 2008. Recibió el grado de magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Eléctrica, en la Universidad de Chile, Chile, 2012. Trabajó como profesor investigador en la Universidad Politécnica Salesiana, durante 5 años (2012-2017). Actualmente es Especialista de Regulación Técnica del Sector Eléctrico en la Agencia de Regulación y Control de Energía de Recursos Naturales No Renovables - ARCERNNR, Quito, Ecuador. También trabaja como profesor a tiempo parcial en la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) y en la Universidad Técnica de Cotopaxi dictando clases de Energía Renovable. Sus temas de interés incluyen: planificación de sistemas eléctricos, mercados eléctricos competitivos, subastas de proyectos energéticos, generación distribuida y optimización de sistemas eléctricos.



Ximena Patricia Gavela Guamán.- Nació en Loja en 1985. Doctora en ingeniería eléctrica. Ha trabajado en la Agencia de Regulación y Control de Electricidad dentro del área de regulación técnica. Actualmente se desempeña como docente en la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de investigación de interés son las técnicas de optimización aplicables a sistemas de potencia, energías renovables, mercados energéticos y aspectos normativos y regulatorios del sector eléctrico.



Walter Intriago Ponce.- Nació en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, el 20 de diciembre de 1983. Desde 2016 es ingeniero Eléctrico y en la actualidad es egresado de la maestría en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería, ambos por la Universidad Politécnica Salesiana en Ecuador. Al presente, labora en la Agencia de Regulación y Control de Energía de Recursos Naturales No Renovables específicamente en la Director de Regulación Técnica del Sector Eléctrico, Ecuador